

# Capítulo 2

## Vulnerabilidad estructural

### Conceptos generales

La vulnerabilidad estructural se refiere a la susceptibilidad que la estructura presenta frente a posibles daños en aquellas partes del establecimiento hospitalario que lo mantienen en pie ante un sismo intenso. Esto incluye cimientos, columnas, muros, vigas y losas.

De acuerdo a los cuadros 1 y 2 del capítulo anterior, es fácil concluir que los hospitales son vulnerables frente a un desastre. Las formas y estrategias para implementar las medidas de prevención y mitigación en establecimientos hospitalarios dependerán de si estos ya existen o están por construirse; por ejemplo, el componente estructural debe ser considerado durante la etapa de diseño y construcción, cuando se trata de un nuevo edificio, o durante una etapa de reparación, remodelación o mantenimiento, cuando se trata de un edificio ya construido.

Por otra parte, en la planificación de un hospital nuevo es necesario tener en cuenta que una de las mayores causas de daños en edificaciones han sido los esquemas arquitectónico-estructurales nocivos. Puede decirse de manera general que el alejamiento de formas y esquemas estructurales simples es castigado fuertemente por los sismos. De cualquier forma, dada la naturaleza errática de los sismos, así como la posibilidad de que se exceda el nivel de diseño, es aconsejable evitar el planteamiento de configuraciones riesgosas, independientemente del grado de sofisticación que sea posible lograr en el análisis de cada caso.

Lamentablemente, en muchos países de América Latina las normas de construcción sismorresistente no han sido efectivamente aplicadas y en otros no se han considerado especificaciones especiales para las estructuras de edificaciones hospitalarias. Por esta razón, no es extraño que cada vez que ocurre un sismo en la región entre las edificaciones más afectadas siempre figuren los hospitales, que deberían ser las últimas en ser afectadas. En otras palabras, la vulnerabilidad estructural de los hospitales es alta, situación que debe ser corregida total o parcialmente con el fin de evitar enormes pérdidas económicas y sociales, en particular en los países en desarrollo.

Debido a que muchas edificaciones hospitalarias fueron construidas hace mucho tiempo y otras no han sido diseñadas ni construidas con normas sismorresistentes, surgen dudas con respecto a la certeza de que dichas edificaciones puedan seguir funcionando con posterioridad a un sismo. En estos casos se hace imperativa una revisión lo más detallada posible sobre la capacidad de la estructura de soportar sismos moderados y fuertes, mediante estudios de vulnerabilidad.

### Daños estructurales

En general, las enseñanzas que han dejado los movimientos sísmicos indican que en los países donde se diseña de acuerdo con una buena normativa sismorresistente, donde la construcción es sometida a una supervisión estricta y donde el sismo de diseño es representativo de la amenaza sísmica real de la zona, el daño sobre la infraestructura es marginal en comparación con el observado en sitios donde no se han dado estas circunstancias.

No obstante, es importante destacar que el solo hecho de diseñar de acuerdo con un código no siempre salvaguarda contra el daño producido por terremotos severos. Los códigos sísmicos establecen requisitos mínimos para proteger la vida de los ocupantes, requisitos que muchas veces no son suficientes para garantizar el funcionamiento del hospital después del sismo.

Desde una perspectiva histórica, un código por sí solo no puede garantizar la seguridad contra el daño excesivo, puesto que los códigos son reglamentos que establecen requisitos MÍNIMOS, los que a su vez experimentan actualizaciones continuas de acuerdo con los avances tecnológicos y las enseñanzas que dejan las investigaciones y los estudios de los efectos causados por terremotos, que no son más que pruebas de laboratorio a escala real. La ductilidad y redundancia estructural han resultado ser los medios más efectivos para proporcionar seguridad contra el colapso, especialmente si los movimientos resultan más severos que los anticipados por el diseño. El daño severo o colapso de muchas estructuras durante sismos importantes es, por lo general, consecuencia directa de la falla de un solo elemento o serie de elementos con ductilidad o resistencia insuficiente.

A causa de sismos fuertes es común que se presenten daños estructurales en columnas, tales como grietas diagonales causadas por cortante y/o torsión, grietas verticales, desprendimiento del recubrimiento, aplastamiento del concreto y pandeo de las barras longitudinales por exceso de esfuerzos de flexocompresión. En vigas, se presentan grietas diagonales y rotura de estribos a causa de cortante y/o torsión, grietas verticales, rotura del refuerzo longitudinal y aplastamiento del concreto por la flexión que impone el sismo arriba y abajo de la sección como resultado de las cargas alternadas.

Las conexiones o uniones entre elementos estructurales son, por lo general, los puntos más críticos. En las uniones viga-columna (nudos) el cortante produce grietas diagonales y es común ver fallas por adherencia y anclaje del refuerzo longitudinal de las vigas a causa del poco desarrollo del mismo y/o a consecuencia de esfuerzos excesivos de flexión.

En las losas se pueden presentar grietas por punzonamiento alrededor de las columnas y grietas longitudinales a lo largo de la placa debido a la excesiva demanda por flexión que en ciertas circunstancias puede imponer el sismo. Este tipo de daños se han visto reiteradamente en muchas edificaciones hospitalarias sometidas a movimientos sísmicos fuertes y moderados.

Las observaciones realizadas en los últimos años, indican que las construcciones rígidas se desempeñan, en general, mejor que las flexibles; particularmente en lo que respecta a la protección de los componentes no estructurales, que sufren menos daños al limitarse el desplazamiento entre pisos.

Irregularidades en altura, traducidas en cambios repentinos de rigidez entre pisos adyacentes, hacen que la absorción y disipación de energía en el momento del sismo se concentren en los pisos flexibles, donde los elementos estructurales se ven sobresolicitados. Las irregularidades en planta de masa, rigidez y resistencia pueden originar vibraciones torsionales que generan concentraciones de esfuerzos difíciles de evaluar, razón por la cual una mayor exigencia en este tipo de aspectos debe tenerse en cuenta a la hora de diseñar arquitectónicamente las edificaciones.

Pocos edificios se diseñan para resistir sismos severos en el rango elástico, por lo cual es necesario proporcionarle a la estructura capacidad de disipación de energía mediante tenacidad y ductilidad en los lugares en que se espera que la resistencia elástica puede ser excedida. Esto se aplica a los elementos y a las conexiones de los elementos, puntos que usualmente son los más débiles.

El ATC-33<sup>1</sup> define varios niveles de seguridad para una edificación en caso de que se presente un evento sísmico importante. El Cuadro 3 presenta las recomendaciones de los requisitos Visión 2000.

**Cuadro 3.**  
**Objetivos de comportamiento sísmico recomendados Visión 2000**

| Nivel de Diseño Sísmico | Comportamiento Requerido |                     |  |                        |
|-------------------------|--------------------------|---------------------|--|------------------------|
|                         | Operación Permanente     | Ocupación Inmediata | Protección de la Vida  | Prevención del Colapso |
| Frecuente (50%/30 años) | ✘                        |                     | <b>Comportamiento Inaceptable</b><br>(para edificios nuevos) |                        |
| Ocasional (50%/50 años) | ◆                        | ✘                   |  |                        |
| Raro (10%/50 años)      | ■                        | ◆                   | ✘  |                        |
| Muy raro (10%/100 años) |                          | ■                   | ◆  | ✘                      |

- = Seguridad crítica, como hospitales, departamentos de bomberos
- ◆ = Instalación esencial o peligrosa, como centrales telefónicas, edificio con químicos tóxicos
- ✘ = Instalación básica o convencional, como edificios de oficinas y de residencias

De acuerdo con esta tabla, un hospital debe ser diseñado de tal forma que continúe en operación después de un sismo "raro" (probabilidad de ocurrencia del 10% en 50 años), y que quede al menos en condición de ocupación inmediata después de un sismo "muy raro" (probabilidad de ocurrencia del 10% en 100 años).

**Nivel de operación permanente.** en este caso, el edificio permanece en condiciones aptas para su uso normal, aunque tal vez con algunas limitaciones. Todos los sistemas de abastecimiento y servicios básicos deben quedar operando. Para cumplir con este nivel, es necesario contar con sistemas redundantes o equipos de emergencia, y se requiere una inspección rigurosa de los sistemas eléctricos y mecánicos para garantizar su correcto funcionamiento después de que han sido fuertemente sacudidos.

**Nivel de ocupación inmediata.** en este caso, únicamente se presentan daños muy limitados en la estructura y en los componentes no estructurales. Los sistemas resistentes a cargas laterales y verticales conservan casi toda la capacidad que tenían antes del evento. El daño no estructural es mínimo, de modo que los accesos y los sistemas de protección tales como puertas, escaleras, ascensores, luces de emer-

<sup>1</sup> ATC (Report 33-03). *Guidelines for Seismic Rehabilitation of Buildings*. 75% Submittal, Third Draft, 3 Volumes. Redwood City, 1995. NEHRP Guidelines for Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 273).

gencia, alarmas contra incendio, etc., permanecen operacionales, siempre que se garantice el suministro de electricidad. Podría presentarse la ruptura de vidrios y pequeños daños en conexiones o lámparas. Se espera que los ocupantes puedan permanecer dentro del edificio, aunque el uso normal del establecimiento podría estar limitado y se hace necesaria la limpieza e inspección. En general, los componentes electromecánicos se encuentran seguros y deberán operar si se lo requiere. Algunos de estos componentes podrían quedar descalibrados o sufrir desalineamientos o daños internos que imposibilitan su uso. Podría haber falta de electricidad, de agua, problemas con las líneas de comunicación y tuberías de gas. El riesgo de lesiones severas es bajo y el edificio puede ser ocupado; sin embargo, es posible que no sea apto para su funcionamiento normal hasta que se hayan efectuado reparaciones.

***Nivel de protección de la vida*** es el estado posterior al sismo en el cual se presenta daño significativo en la estructura, aunque se cuenta con un cierto rango de protección contra el colapso parcial o total. El daño es mayor que en el caso anterior. La mayoría de los componentes estructurales y no estructurales no han caído, y por lo tanto no constituyen una amenaza dentro o fuera del edificio. Las rutas de evacuación permanecen operacionales, aunque limitadas por acumulaciones de escombros no significativas. Se pueden presentar heridos durante el sismo, pero se espera que las lesiones no sean de magnitud tal que puedan cobrar la vida de los afectados. Es posible reparar la estructura, aunque en algunos casos esto podría resultar poco práctico desde el punto de vista económico.

***Nivel de prevención del colapso*** el daño posterior al sismo es tal que la edificación puede sufrir un colapso parcial o total como consecuencia de la degradación de la rigidez o de la resistencia del sistema portante ante las fuerzas laterales, la deformación lateral permanente de la estructura o la disminución de su capacidad para soportar cargas verticales. No obstante, todos los componentes básicos del sistema resistente a cargas gravitacionales pueden continuar funcionando y, aunque el edificio puede mantener su estabilidad, existe un riesgo grave de heridos debido a la caída de objetos. Es probable que no sea práctico reforzar la estructura, y el edificio no es seguro para su ocupación inmediata, puesto que las actividades consecuentes pueden inducir su colapso.

Es indispensable, en el caso de los hospitales, partir del hecho de que el estado de la estructura, sin considerar la magnitud del sismo, será tal que se pueda garantizar el nivel de seguridad de operación permanente. En otras palabras, no es posible efectuar una intervención eficiente y efectiva de la vulnerabilidad no estructural y administrativo-organizativa si no se adelanta de manera simultánea o previa la intervención de la vulnerabilidad estructural. Sin embargo, siempre sirve intervenir la vulnerabilidad no estructural y administrativo-organizativa, ya que estos aspectos son susceptibles de sufrir daños tanto frente a eventos sísmicos pequeños y moderados, que ocurren más frecuentemente, como frente a aquellos que pueden llegar a afectar a los componentes estructurales.

De acuerdo con lo examinado anteriormente, la evaluación del estado de una construcción existente puede hacer surgir serias dudas sobre su capacidad para soportar eventos sísmicos. En algunos países se han desarrollado campañas de refuerzo de edificios existentes a efectos de reducir su vulnerabilidad. En principio, puede pensarse que el refuerzo debería ser obligatorio para edificios esenciales y que resulten vulnerables luego de las evaluaciones de vulnerabilidad estructural.

### Evaluación y refuerzo obligatorio de hospitales<sup>2</sup>

La nueva Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98 (Ley 400 de 1997, Decreto-Ley 33 de 1998) establece que los hospitales existentes de mayor nivel de complejidad localizados en las zonas de más alta amenaza sísmica, deben ser evaluados en su vulnerabilidad e intervenidos o reforzados en un lapso de tres y seis años respectivamente, lo que significa que tanto el Gobierno Nacional como los gobiernos departamentales y municipales deben incluir partidas presupuestarias en los próximos años con ese fin y tener en cuenta este tipo de inversiones en los futuros planes de desarrollo en todos los niveles territoriales.

**GRUPO DE USO IV – Edificaciones Indispensables:** *Son aquellas edificaciones de atención a la comunidad que deben funcionar durante y después de un sismo, cuya operación no puede ser trasladada rápidamente a un lugar alterno, tales como hospitales de niveles de complejidad 2 y 3 y centrales de operación y control de líneas vitales.*

**ART. 54: ACTUALIZACIÓN DE LAS EDIFICACIONES INDISPENSABLES.** *A las construcciones existentes cuyo uso las clasifique como edificaciones indispensables, localizadas en zonas de amenaza sísmica alta e intermedia, se les debe evaluar su vulnerabilidad sísmica, de acuerdo con los procedimientos para el efecto establecidos en esta reglamentación, en un lapso no mayor de tres (3) años contados a partir de la vigencia de la presente ley.*

*Estas edificaciones deben ser intervenidas o reforzadas para llevarlas a un nivel de seguridad sísmica equivalente al de una edificación nueva diseñada y construida de acuerdo con los requisitos de la presente ley y sus reglamentos, en un lapso no mayor de seis (6) años contados a partir de la vigencia de la presente ley.*

El Ministerio de Salud y la Dirección Nacional para la Prevención y Atención de Desastres de Colombia, con este instrumento jurídico podrán fortalecer en todo el país su programa de promoción de estudios de vulnerabilidad sísmica de los hospitales existentes y de su debido refuerzo, en caso de que así se determine. Este trabajo podrá impulsarse concertando los esfuerzos nacionales, departamentales y en algunos casos municipales, mediante procesos de cofinanciación y contrapartidas establecidos por el Ministerio de Salud, el Fondo de Inversión Social y el Fondo Nacional de Calamidades, a la luz de los principios constitucionales de concurrencia, complementariedad y descentralización. En consecuencia, aunque en el tiempo previsto de los tres y seis años indicados por la ley no se logren cubrir todas las edificaciones hospitalarias de nivel de complejidad 2 y 3 en las zonas de amenaza sísmica alta e intermedia, indudablemente la norma ayudará a avanzar en el tema y a estimular la voluntad política de los niveles regionales y locales, quienes en el caso colombiano también son responsables de la aplicación de una ley como la descrita. Si aun no contando con la normativa ya se habían registrado algunos casos de voluntad política regional y local para continuar con la fase de diseño del refuerzo de varios hospitales importantes, con la normativa ya vigente y su debida promoción y divulgación seguramente se logrará una mayor cobertura y mejores resultados, que se traducirán en un aumento de la seguridad y la protección de la infraestructura de salud del país.

## Problemas de configuración arquitectónica y estructural

Por su naturaleza, las construcciones hospitalarias tienden a ser construcciones de gran envergadura y complejidad, lo que conduce a que en muchos casos presenten esquemas de configuración complejos.

<sup>2</sup> Cardona, O.D. *Las edificaciones hospitalarias en la nueva legislación sísmica colombiana*. Conferencia Internacional sobre Mitigación de Desastres en Instalaciones de Salud. OPS, México, 1996.

Por configuración no se entiende la mera forma espacial de la construcción en abstracto, sino el tipo, disposición, fragmentación, resistencia y geometría de la estructura de la edificación, relación de la cual se derivan ciertos problemas de respuesta estructural ante sismos. En el planeamiento de un hospital es necesario tener en cuenta que una de las mayores causas de daños en edificaciones ha sido en el uso de esquemas de configuración arquitectónico-estructural nocivos. Puede decirse de manera general que el alejamiento de formas y esquemas estructurales simples es castigado fuertemente por los sismos. Y además que, lamentablemente, los métodos de análisis sísmico usuales no logran cuantificar adecuadamente la mayoría de estos problemas. De cualquier forma, dada la naturaleza errática de los sismos, así como la posibilidad de que se exceda el nivel de diseño, es aconsejable evitar el planteamiento de configuraciones riesgosas, independientemente del grado de sofisticación que sea posible lograr en el análisis de cada caso<sup>3</sup>.

## Configuración geométrica

A continuación se exponen brevemente los aspectos más relevantes de la incidencia de la configuración geométrica en la respuesta sísmica de las edificaciones, así como los mecanismos correctivos. Debe hacerse énfasis en que, debido a su complejidad, y a su estrecha relación con el planteamiento de espacio y forma de la construcción, los problemas de configuración deben ser enfrentados básicamente desde la etapa de definición del esquema espacial del edificio, y en toda la etapa de diseño (Figura 1). Por esta razón es un tema que debe ser comprendido en toda su amplitud por los arquitectos y diseñadores<sup>4</sup>.

### Problemas de configuración en planta

Los problemas que se mencionan a continuación son referentes a la disposición de la estructura en el plano horizontal, en relación con la forma y distribución del espacio arquitectónico.

Se debe destacar que los problemas de configuración en planta que a continuación se detallan, se presentan cuando las plantas son continuas; cabe destacar también que algunas de las plantas que a simple vista se pueden percibir como complejas y que cuentan con las respectivas juntas de dilatación sísmicas no presentan problemas para el comportamiento frente a sismos.

#### *Longitud*

La longitud en planta de una construcción influye en la respuesta estructural de la misma de una manera que no es fácil determinar por medio de los métodos usuales de análisis. En vista de que el movimiento del terreno consiste en una transmisión de ondas, la cual se da con una velocidad que depende de las características de masa y rigidez del suelo de soporte, la excitación que se da en un punto de apoyo del edificio en un momento dado difiere de la que se da en otro, diferencia que es mayor en la medida en que sea mayor la longitud del edificio en la dirección de las ondas. Los edificios cortos se acomodan más fácilmente a las ondas que los edificios largos.

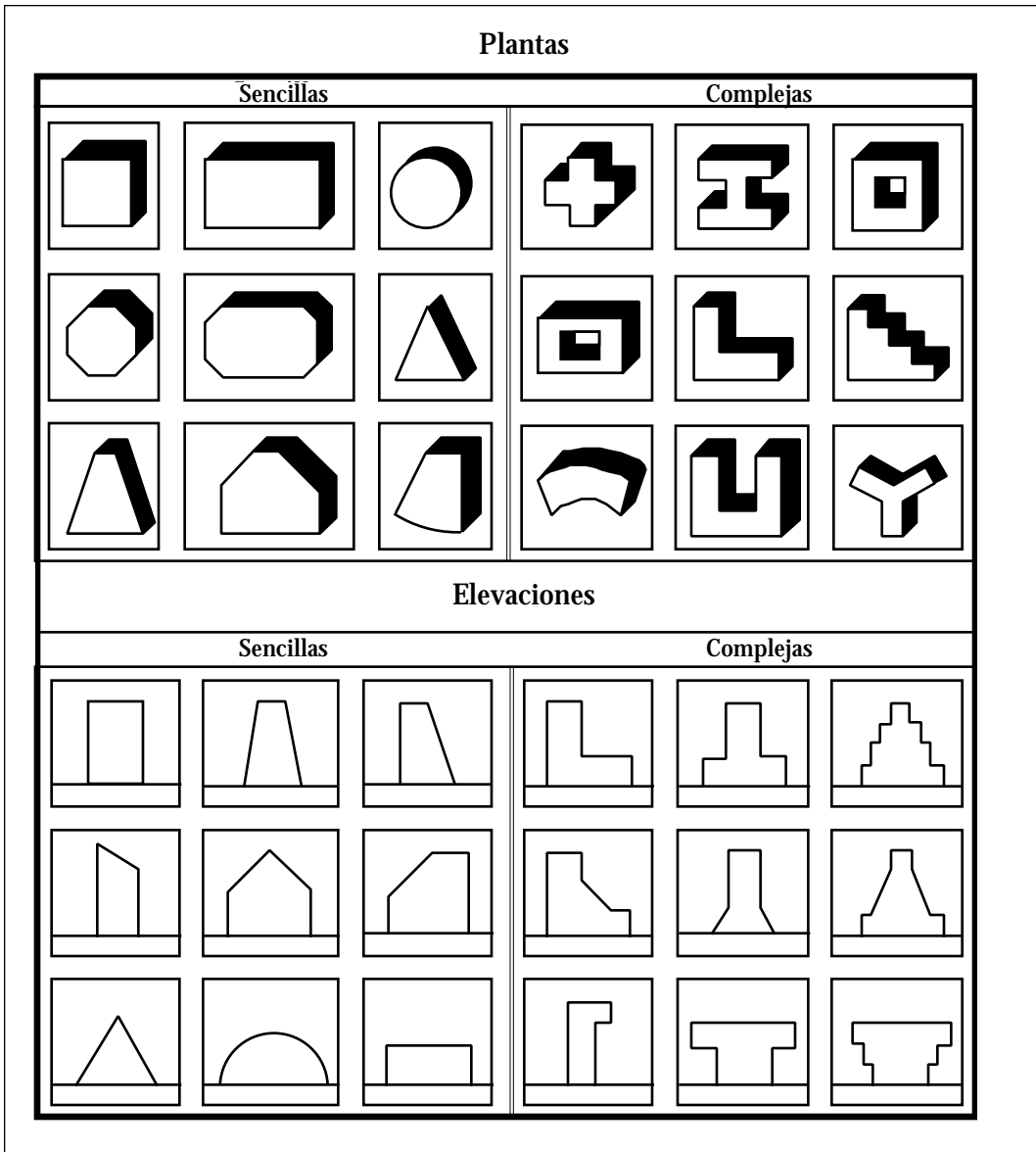
---

<sup>3</sup> Applied Technology Council (ATC) (Report ATC 3-06), *Tentative Provisions for Development of Seismic Regulations for Buildings*. Palo Alto, 1978. [Versión en español por Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Bogotá, 1979.]

<sup>4</sup> Bazán, E., Meli, R., *Manual de diseño sísmico de edificios*, Limusa, México, 1987.

Considerando lo anterior, el correctivo usual para el problema de longitud excesiva de edificios es la partición de la estructura en bloques por medio de la inserción de juntas de dilatación sísmica, de tal manera que cada uno de ellos pueda ser considerado como corto. Estas juntas deben ser diseñadas de manera tal que permitan un adecuado movimiento de cada bloque sin peligro de golpeteo o choque entre los diferentes cuerpos o bloques que componen la edificación.

**Figura 1.**  
**Formas sencillas y complejas en planta y elevación**



Tomado de *Configuración y diseño sísmico de edificios*, Christopher Arnold y Robert Reitherman, México, D.F., Editorial Limusa, 1987, pag. 239. Reimpreso bajo autorización.

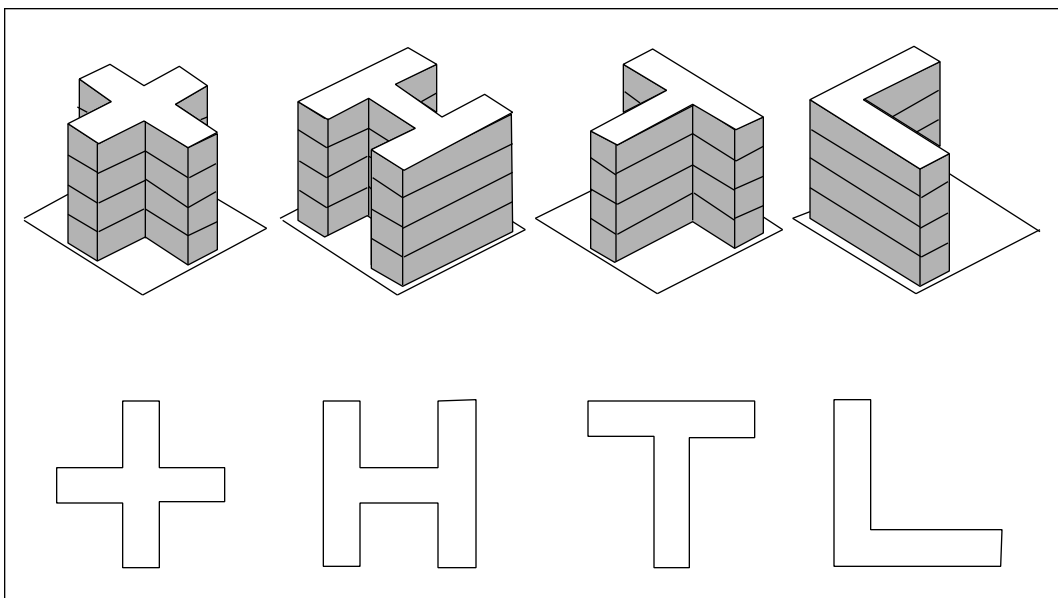
Los edificios largos son también más sensibles a las componentes torsionales de los movimientos del terreno, puesto que las diferencias de movimientos transversales y longitudinales del terreno de apoyo, de las que depende dicha rotación, son mayores.

*Concentración de esfuerzos debido a plantas complejas*

Este problema surge en edificios denominados de plantas complejas y es muy común en edificaciones hospitalarias. Se define como planta compleja a aquella en la cual la línea de unión de dos de sus puntos suficientemente alejados hace su recorrido en buena parte fuera de la planta. Esto se da cuando la planta está compuesta de alas de tamaño significativo orientadas en diferentes direcciones (formas en H, U, L, etc.).

En las plantas irregulares las alas pueden asimilarse a un voladizo empotrado en el cuerpo restante del edificio, sitio en el cual sufriría menores deformaciones laterales que en el resto del ala (Figura 2). Por esta razón aparecen grandes esfuerzos en la zona de transición, los cuales producen con frecuencia daños en los elementos no estructurales, en la estructura vertical y aun en el diafragma de la planta.

**Figura 2.**  
**Formas de la planta**



T. Guevara

Para este caso, la solución corrientemente adoptada consiste en la introducción de juntas de dilatación sísmica, como las mencionadas para el caso de los edificios largos. Estas juntas permiten que cada bloque tenga su propio movimiento sin estar atado al resto del edificio, con lo cual se rompe el esquema de trabajo en voladizo de cada ala. Las juntas, obviamente, deben tener el ancho suficiente para permitir el movimiento de cada bloque sin golpearse<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> Dowrick, D.J. *Diseño de estructuras resistentes a sismos para ingenieros y arquitectos*. México: Limusa, 1984.



O.D.Cardona

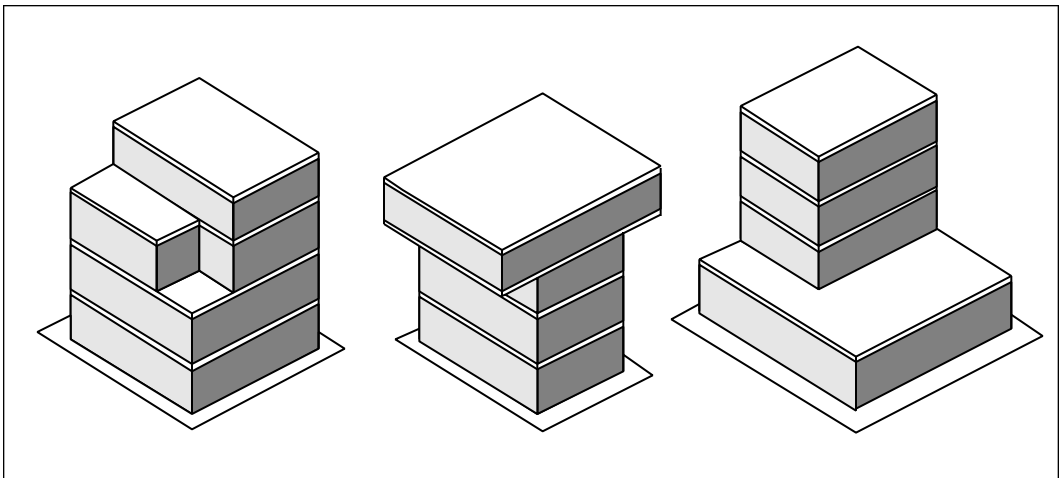
Fotografía 7. Hospital de Caldas en Colombia

## Problemas de configuración en altura

### *Escalonamientos*

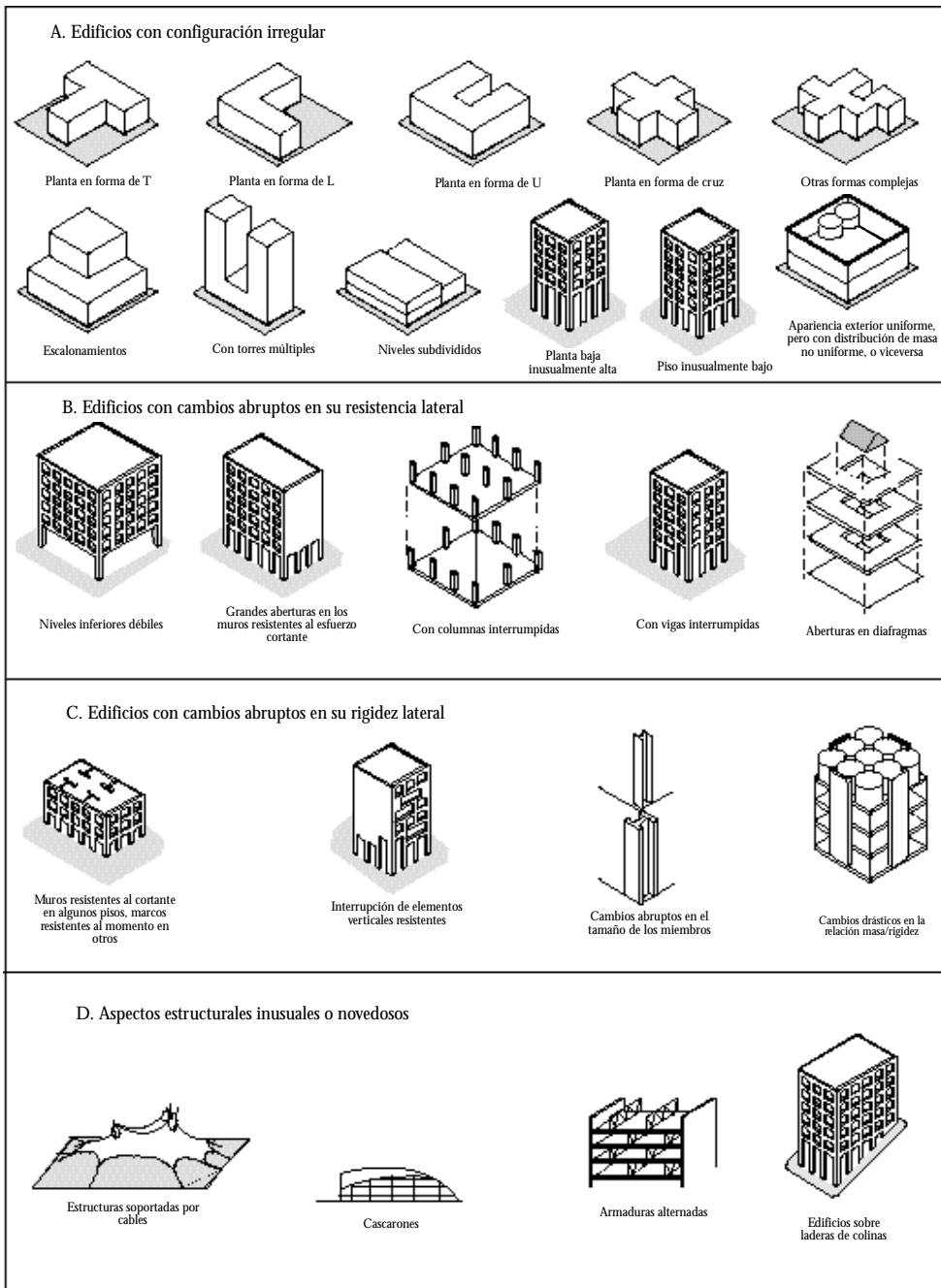
Los escalonamientos en los volúmenes del edificio se presentan habitualmente por exigencias urbanísticas de iluminación, proporción, etc. Sin embargo, desde el punto de vista sísmico, son causa de cambios bruscos de rigidez y de masa; por lo tanto, traen consigo la concentración de fuerzas que producen daño en los pisos aledaños a la zona del cambio brusco (Figura 3). En términos generales, debe buscarse que las transiciones sean lo más suave posible con el fin de evitar dicha concentración.

**Figura 3.**  
Formas irregulares en altura



T. Guevara

**Figura 4.**  
**Irregularidades en estructuras**



**Interpretación gráfica de "irregularidades en estructuras o en sistemas de marcos", del Comentario al SEAOC (Recommended Lateral Force Requirements and Commentary). Tomado de *Configuración y diseño sísmico de edificios*, Christopher Arnold y Robert Reitherman, México, D.F., Editorial Limusa, 1987, pág. 20. Reimpreso bajo autorización.**

La figura 4 muestra algunas características de configuración de edificaciones que deben ser evitadas en instalaciones de salud, debido al comportamiento inadecuado que han experimentado en caso de sismos.

## Configuración estructural

### Concentraciones de masa

El problema en cuestión es ocasionado por altas concentraciones de la masa en algún nivel determinado del edificio que se puede deber a la disposición en él de elementos pesados, tales como equipos, tanques, bodegas, archivos, etc. El problema es mayor en la medida en que dicho nivel pesado se ubica a mayor altura, debido a que las aceleraciones sísmicas de respuesta aumentan también hacia arriba, con lo cual se tiene una mayor fuerza sísmica de respuesta allí y por ende una mayor posibilidad de volcamiento del equipo.

Por lo anterior, en el diseño arquitectónico es recomendable disponer los espacios que representen pesos inusuales en sótanos o en construcciones aisladas aledañas al cuerpo principal del edificio. En casos en los que por razones topográficas se deba tener almacenamientos de agua elevados, debe preferirse construir torres independientes para ese fin, en lugar de adosarlas al edificio principal.



Fotografía 8. Concentraciones de masa, tales como estanques de agua en el techo de hospitales pueden producir daños que comprometan el funcionamiento del hospital.

### *Columnas débiles*

Las columnas dentro de una estructura tienen la vital importancia de ser los elementos que transmiten las cargas a las cimentaciones y mantienen en pie a la estructura, razón por la cual cualquier daño en este tipo de elementos puede provocar una redistribución de cargas entre los elementos de la estructura y traer consigo el colapso parcial o total de una edificación.

Por lo anterior, el diseño sísmico de pórticos (estructuras formadas preferentemente por vigas y columnas) busca que el daño producido por sismos intensos se produzca en vigas y no en columnas, debido al mayor riesgo de colapso del edificio por el de daño en columnas. Sin embargo, muchos edificios diseñados según códigos de sismorresistencia han fallado por esta causa. Estas fallas pueden agruparse en dos clases:

- Columnas de menor resistencia que las vigas.
- Columnas cortas.

Varias son las causas de que el valor de la longitud libre se reduzca drásticamente y se considere que se presenta una columna corta:

- Confinamiento lateral parcialmente en la altura de la columna por muros divisorios, muros de fachada, muros de contención, etc.
- Disposición de losas en niveles intermedios.
- Ubicación del edificio en terrenos inclinados.

Las columnas cortas son causa de serias fallas en edificios bajo excitaciones sísmicas debido a que su mecanismo de falla es frágil.

### *Pisos suaves*

Varios tipos de esquemas arquitectónicos y estructurales conducen a la formación de los llamados pisos débiles o suaves, es decir, pisos que son más vulnerables al daño sísmico que los restantes, debido a que tienen menor rigidez, menor resistencia o ambas cosas:

La presencia de pisos suaves se puede atribuir a:

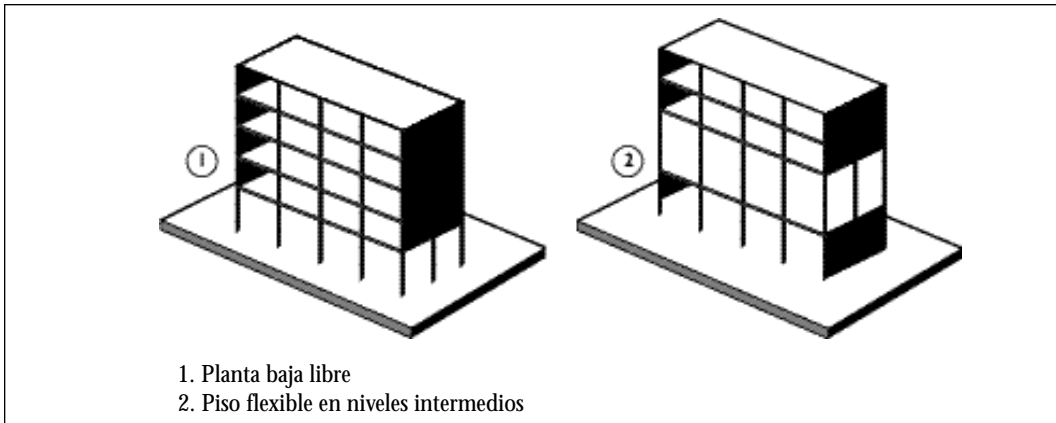
- Diferencia de altura entre pisos.
- Interrupción de elementos estructurales verticales en el piso.



O.D.Cardona

Fotografía 9. Falla en planta baja por piso suave

**Figura 5.**  
Ejemplos<sup>6</sup> de edificios con irregularidad tipo "piso flexible"



El primer caso de la figura anterior (fotografía 10) se da frecuentemente por la búsqueda de volúmenes mayores en ciertos niveles de la construcción, generalmente por razones técnicas (exigencias de equipos, etc.) o estéticas simbólicas (imagen del edificio en los niveles de acceso, etc.). Esto conduce a que en los pisos en cuestión se presente un debilitamiento de la rigidez, debido a la mayor altura de los elementos verticales.

La interrupción de elementos verticales de la estructura ha probado ser la causa de múltiples colapsos parciales o totales en edificios sometidos a sismos, sobre todo cuando la interrupción de los elementos verticales resistentes (muros y columnas) se presenta en los pisos inferiores (fotografía 11). La razón del deslizamiento del piso recae en que el nivel en que se interrumpen los elementos es más flexible que los restantes, con lo que aumenta el problema de estabilidad, pero además porque se origina un cambio brusco de rigidez que ocasiona una mayor acumulación de energía en el piso más débil.

Los casos más usuales de interrupción de elementos verticales, que ocurre generalmente por razones espaciales, formales o estéticas, son los siguientes:

- Interrupción de las columnas.
- Interrupción de muros estructurales (muros de cortante).
- Interrupción de muros divisorios, concebidos erróneamente como no estructurales, alineados con pórticos.

### *Falta de redundancia*

El diseño estructural sismorresistente contempla la posibilidad de daño de los elementos estructurales para los sismos más intensos. Desde este punto de vista, el diseño de la estructura debe buscar que la resistencia a las fuerzas sísmicas dependa de un número importante de elementos, puesto que cuando se cuenta con un número reducido de elementos (poca redundancia) la falla de alguno de ellos puede tener como consecuencia el colapso parcial o total durante el sismo. En este sentido, debe buscarse que la resistencia a las fuerzas sísmicas se distribuya entre el mayor número de elementos estructurales posibles<sup>7</sup>.

<sup>6</sup> Arq. Teresa Guevara, Ph.D. "Recomendaciones para crear diseños arquitectónicos sismo resistentes a la luz de la nueva Norma Colombiana NSR-98", Reunión del Concreto 1998, Cartagena de Indias, Colombia.

<sup>7</sup> OPS/OMS, *Análisis de riesgo en el diseño de hospitales en zonas sísmicas*. Washington, D.C., 1989.



O.D.Cardona

Fotografía 10. Interrupción de muro estructural en la planta baja

- No aprovechamiento de la ductilidad disponible.

### *Excesiva flexibilidad del diafragma*

Un comportamiento excesivamente flexible del diafragma de piso implica deformaciones laterales no uniformes, las cuales son en principio perjudiciales para los elementos no estructurales adosados al diafragma. Adicionalmente, la distribución de fuerzas laterales no se hará de acuerdo a la rigidez de los elementos verticales. (figura 6)

### *Excesiva flexibilidad estructural*

La excesiva flexibilidad de la edificación ante cargas sísmicas puede definirse como la susceptibilidad a sufrir grandes deformaciones laterales entre los diferentes pisos, conocidas como derivas. Las principales causas de este problema residen en la excesiva distancia entre los elementos de soporte (claros o luces), las alturas libres y la rigidez de los mismos. Dependiendo de su grado, la flexibilidad puede traer como consecuencias:

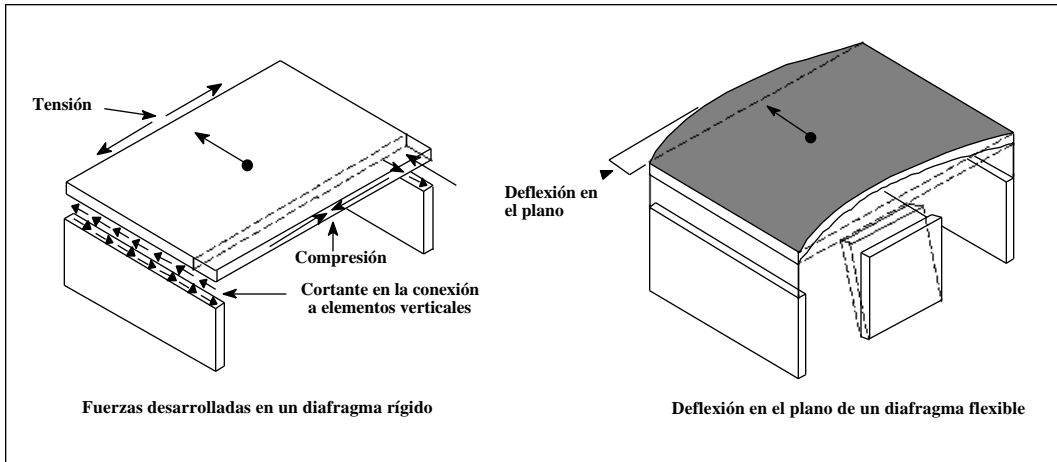
- Daños en los elementos no estructurales adosados a niveles contiguos.
- Inestabilidad del o los pisos flexibles, o del edificio en general.



O.D.Cardona

Fotografía 11. Colapso estructural debido a la discontinuidad de elementos verticales

**Figura 6.**  
**Comportamiento rígido y flexible del diafragma**



Son varias las razones por las cuales puede darse este tipo de comportamiento flexible. Entre ellas se encuentran las siguientes:

- *Flexibilidad del material del diafragma.*
- *Relación de aspecto (largo/ancho) del diafragma.* Por tratarse de un trabajo a flexión de este tipo de elementos, mientras mayor sea la relación largo/ancho del diafragma, mayores pueden ser sus deformaciones laterales. En general, los diafragmas con relaciones de aspecto superiores a 5 pueden considerarse flexibles.
- *Rigidez de la estructura vertical.* La flexibilidad del diafragma debe juzgarse también de acuerdo con la distribución en planta de la rigidez de los elementos verticales. En el caso extremo de un diafragma en el que todos los elementos verticales tengan igual rigidez es de esperarse un mejor comportamiento del diafragma que en el caso en el cual tengan grandes diferencias en este punto.
- *Aberturas en el diafragma.* Las aberturas de gran tamaño practicadas en el diafragma para efectos de iluminación, ventilación y relación visual entre los pisos, ocasionan la aparición de zonas flexibles dentro del diafragma, las cuales impiden el ensamblaje rígido de las estructuras verticales.

Las soluciones al problema de excesiva flexibilidad del diafragma son múltiples, y dependen de la causa que la haya ocasionado. Las grandes aberturas en el diafragma deben estudiarse con cuidado, con el fin de proveer mecanismo de rigidización o, si esto no es posible, segmentación del edificio en bloques.

### *Torsión*

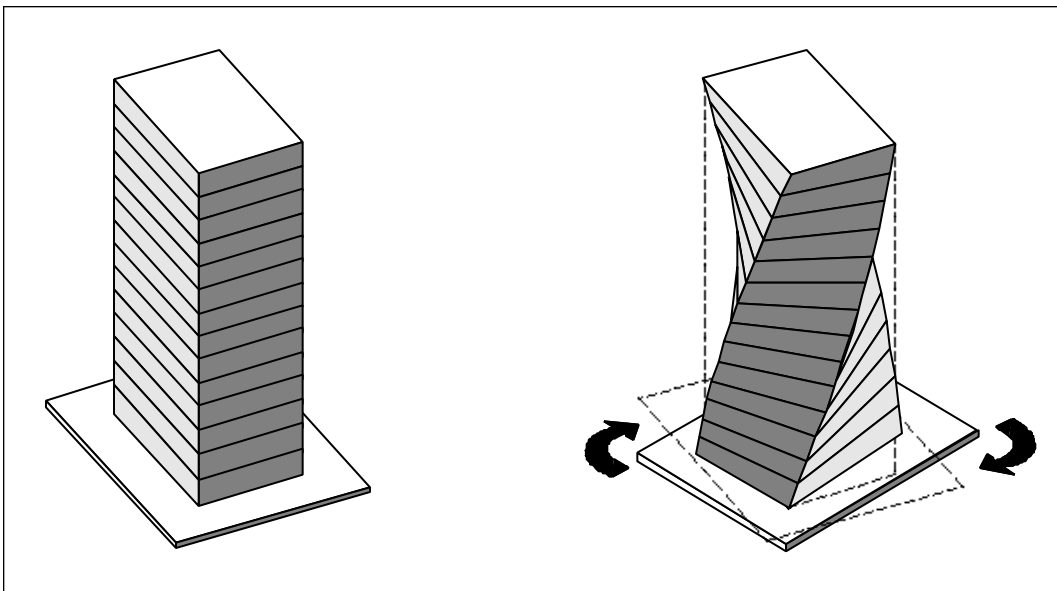
La torsión ha sido causa de importantes daños de edificios sometidos a sismos intensos, que van desde la distorsión a veces visible de la estructura (y por tanto su pérdida de imagen y confiabilidad) hasta el colapso estructural (Figura 7).

La torsión se produce por la excentricidad existente entre el centro de masa y el centro de rigidez. Algunos de los casos que pueden dar lugar a dicha situación en planta son:

- Posición de elementos rígidos de manera asimétrica con respecto al centro de gravedad del piso.
- Colocación de grandes masas en forma asimétrica con respecto a la rigidez.
- Combinación de las dos situaciones anteriores.

Debe tenerse presente que los muros divisorios y de fachada que se encuentren adosados a la estructura vertical tienen generalmente una gran rigidez y, por lo tanto, habitualmente participan estructuralmente en la respuesta al sismo y pueden ser causantes de torsión, como en el caso corriente de los edificios de esquina.

**Figura 7.**  
**Torsión**



T. Guevara

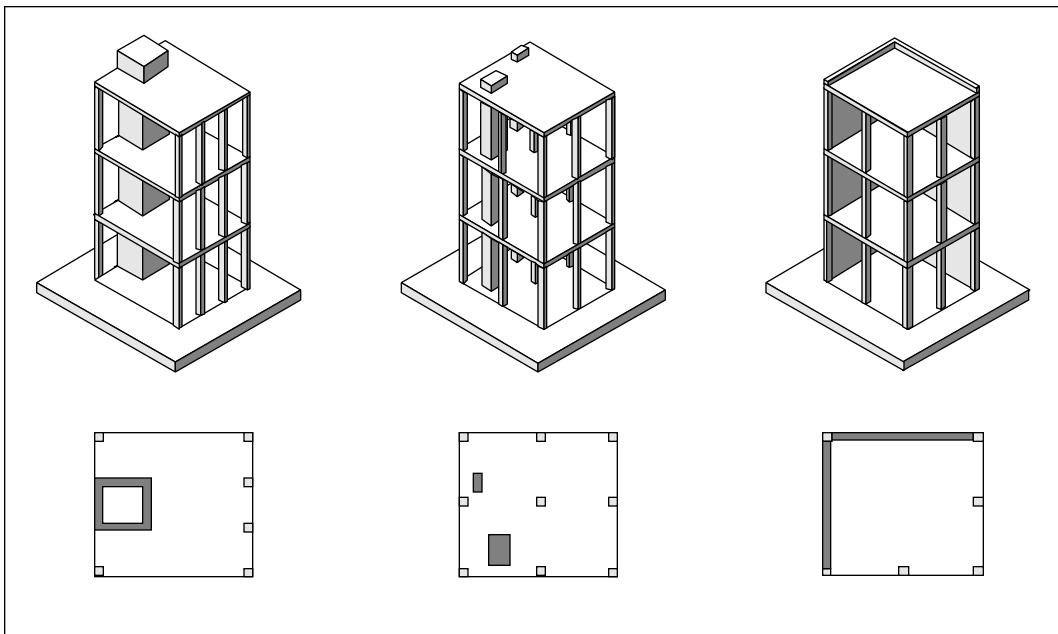
Cuantitativamente, puede considerarse que una excentricidad entre el centro de la masa y de rigidez es grande cuando supera el 10% de la dimensión en planta bajo análisis. En un caso así deben tomarse medidas correctivas en el planteamiento estructural del edificio (Figura 8).

Si se contempla además la situación en altura, el panorama de la torsión puede complicarse aún más cuando hay irregularidades verticales, como los escalonamientos. En efecto, la parte superior del edificio transmite a la inferior un cortante excéntrico, lo cual provoca torsión del nivel de transición hacia abajo, independientemente de la simetría o asimetría estructural de los pisos superiores e inferiores.

Como todos los problemas de configuración, el de la torsión debe ser enfrentado desde la etapa de diseño espacial y de forma de la edificación. Los correctivos necesarios para el problema de la torsión pueden resumirse en general en los siguientes puntos:

- Las torsiones deben ser consideradas inevitables, debido a la naturaleza del fenómeno y a las características de la estructura. Por esta razón, se sugiere proveer a los edificios de rigidez, mediante la cual se busca reducir la posibilidad de giro en planta.
- A efectos del control de la torsión, debe estudiarse con cuidado el planteamiento de la estructura en planta y en altura, así como la presencia y la necesidad de aislamiento de los muros divisorios no estructurales que puedan intervenir estructuralmente en el momento de un sismo. Finalmente, el objetivo debe ser proveer a la estructura con la mayor simetría posible de la rigidez con respecto a la masa.

**Figura 8.**  
**Torsión por muros excéntricos**



T. Guevara

## Diseño sismorresistente

El diseño sismorresistente de estructuras posee un nivel de complejidad superior al que caracteriza el diseño para cargas estáticas de gravedad, debido a los factores que se deben tener en cuenta en él. Entre estos se encuentran los siguientes:

- a) La naturaleza azarosa de las características del sismo.
- b) La incertidumbre sobre la respuesta de la estructura, debida a la heterogeneidad de la calidad de los materiales, la interacción con los elementos no estructurales, la variación de las cargas de servicio, las variaciones presentadas en la construcción, etc.
- c) Los mecanismos de falla y disipación de energía que impliquen el menor riesgo para la vida humana y sus propiedades.
- d) El costo social asociado a la falla de edificios, especialmente en el caso en que sean esenciales para la atención de un desastre, como el caso de los hospitales.

De acuerdo con esto, el diseño sismorresistente debe tratar de atender de la mejor manera posible todos estos aspectos<sup>8</sup>. Normalmente, los códigos de diseño enmarcan algunos de estos problemas por medio de fórmulas cuantitativas sobre seguridad global o local. A menudo el seguimiento irreflexivo de estas normas en el diseño habitual de estructuras, hace que el contenido de fondo de tales simplificaciones sea frecuentemente desconocido u olvidado. Sin embargo, en el diseño de cualquier edificio, y en especial en el de aquellos que deban permanecer en el mejor estado posible después de un sismo, deben tenerse presentes las implicaciones de cada decisión importante de acuerdo con los principios y avances de la ingeniería sísmica, y bajo la óptica de la presencia de la construcción en un medio social.

A continuación se revisan las implicaciones en el diseño sísmico de hospitales de los aspectos mencionados anteriormente.

## Espectro de diseño

En el espectro de diseño recomendado por los códigos de sismorresistencia se encuentran implícitas decisiones sobre:

- a) *La probabilidad de excedencia del sismo de diseño en un período de tiempo considerado como de vida útil media de los edificios.* Normalmente, se considera una probabilidad de excedencia del 10% en un período de vida media útil de 50 años. En el caso de hospitales, sin embargo, la vida útil supera ampliamente ese valor.

La dinámica de la construcción de centros hospitalarios es decididamente menor que la de construcción de viviendas y otro tipo de construcciones. Esto es especialmente crítico en los países en desarrollo, en los que la construcción de grandes centros hospitalarios es escasa debido a que resulta altamente onerosa. Por esta razón la perdurabilidad de dichos centros es muy alta en algunos países, y, en consecuencia, debe pensarse con detenimiento la selección de estas variables.

- b) *Las frecuencias dominantes y respuestas máximas.* Normalmente, los espectros de sismos exhiben sectores estrechos de frecuencias donde se encuentran las respuestas máximas. Sin embargo, para cubrir las incertidumbres asociadas a la distancia de ocurrencia del evento y a su contenido de frecuencias, los espectros de diseño presentan una amplia planicie de respuestas máximas así como factores de amplificación de las respuestas en terrenos blandos con respecto a las de terreno firme, de acuerdo a comportamientos observados en varios sitios del mundo. No obstante, en el caso de edificaciones especiales, puede ser conveniente la elaboración de un espectro de diseño de acuerdo a las características geológicas y geotécnicas del sitio de construcción.

## Comportamiento no lineal

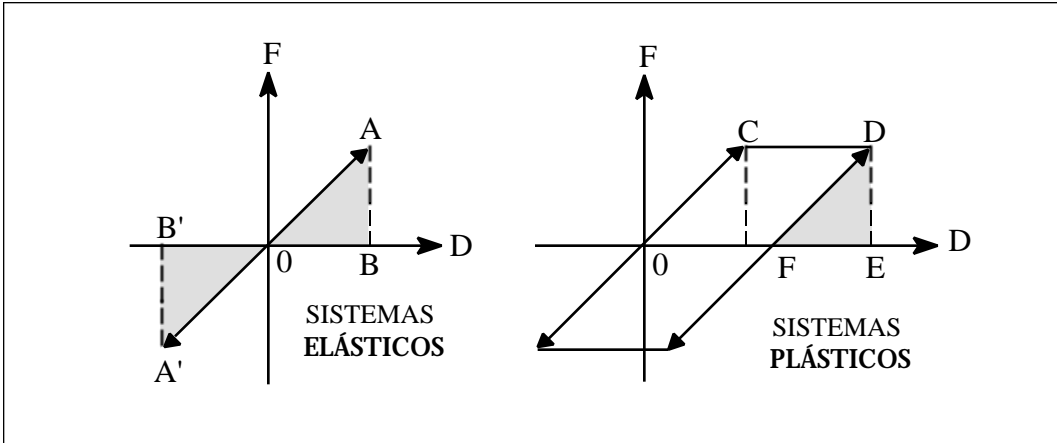
El criterio de diseño tradicional, de edificios sometidos a sismos fuertes, ha sido el de permitir el ingreso de los materiales en el rango no lineal con el fin de absorber energía bajo deformaciones permanentes. La Figura 9 ilustra este criterio para un sistema elasto-plástico. La línea OA representa el diagrama esfuerzo máximo - deformación máxima de un sistema perfectamente elástico en un sismo

---

<sup>8</sup> AIS, *Normas colombianas de diseño y construcción sismo resistente NSR-98*, Ley 400 de 1997, Decreto Ley 33 de 1998, Santa Fe de Bogotá, 1998.

determinado, mientras que la línea OCD representa un sistema elasto-plástico. Existen varias hipótesis sobre la simplificación que debe ser asumida para evaluar de manera sencilla el comportamiento del sistema elasto-plástico.

**Figura 9.**  
Absorción y disipación de energía



La estructura debe ser diseñada para unos esfuerzos menores que los dados por la respuesta del sistema elástico. Si con las fuerzas así obtenidas se realiza un análisis elástico, se obtendrían unas deformaciones que, a su vez, deben ser multiplicadas por el factor de ductilidad para estimar las deformaciones máximas de la estructura, lo cual es de gran importancia para el estudio del comportamiento de elementos no estructurales y la estabilidad de los diferentes pisos. Los elementos estructurales deben entonces garantizar que se logre alcanzar dichas deformaciones inelásticas. Para ello debe disponerse en dichos elementos de ductilidad suficiente, por medio de los mecanismos que se detallará más adelante.

Muchos códigos de construcciones tienen el defecto de considerar una reducción de fuerzas debido al comportamiento inelástico solamente en relación con la deformación máxima alcanzada en cualquier instante del sismo, o a la máxima energía disipada en un ciclo, sin atender a su duración. Esto hace que se dejen de lado factores tan importantes como los asociados a la fatiga progresiva de los materiales, tales como la degradación de la rigidez, la disminución de la resistencia, el aumento progresivo de las deformaciones y, por ende, el colapso progresivo. Por esta razón, en los últimos años han adquirido un gran énfasis los métodos que de una u otra manera involucran la duración total del sismo en el diseño, generalmente a través de la energía total disipada o del número de ciclos de carga.

## Disposición de la ductilidad

En vista de que los métodos de diseño no lineal simplificado exigen la capacidad de la estructura de permitir grandes deformaciones sin colapso, los elementos de la misma deben ser diseñados para atender adecuadamente esta demanda de deformaciones, pero se debe buscar el equilibrio en el que los desplazamientos de la estructura no afecten o produzcan daños en el contenido (elementos no estructurales).

A continuación se examinan los mecanismos esenciales para obtener altas capacidades de ductilidad en los sistemas estructurales de concreto reforzado.

En el diseño de estructuras de concreto reforzado deben tenerse en cuenta los siguientes criterios básicos, a fin de obtener la ductilidad requerida:

- *Confinamiento.* El confinamiento del concreto garantiza la preservación del material ante la alternación de esfuerzos dada en los sismos y, en consecuencia, permite el desarrollo de deformaciones inelásticas mayores que las que se podrían presentar en una estructura en la que el concreto se deteriore.
- *Control de falla a cortante.* La falla a cortante es una falla que compromete seriamente la integridad de la sección de cualquier elemento de concreto reforzado. Por esta razón los códigos de diseño generalmente obligan a un diseño a cortante tal que garantice que la resistencia a cortante sea superior a la resistencia a flexión. Esto se logra utilizando como cortante de diseño un valor que sea como mínimo el correspondiente a la plastificación por flexión en los nudos extremos.
- *Control de la reducción de la ductilidad disponible debido a la carga axial.* La carga axial de compresión reduce drásticamente la ductilidad disponible en un elemento de concreto sometido a ella. El fenómeno, que es más fuerte en columnas que en muros estructurales, generalmente se debe a que a mayores cargas de compresión se reduce el trabajo a tensión del acero, el cual puede darse con valores del esfuerzo de trabajo menores del esfuerzo de fluencia, lo que implica un uso insuficiente del acero a efectos de desarrollar grandes deformaciones inelásticas y disipar energía por ese medio. Sin embargo, no siempre es posible diseñar las secciones de columnas de manera que haya esfuerzos altos de tracción en el acero, por razones arquitectónicas y económicas.

El efecto de la duración de un sismo en el comportamiento estructural ha sido tradicionalmente ignorado en los códigos de diseño. Ello se debe, en parte, a que el espectro de aceleraciones resulta insensible a la duración del sismo, pues recoge solamente la información referente a la máxima aceleración de respuesta ocurrida en algún momento del sismo, e ignora lo que sucede en adelante. Sin embargo, en sismos largos, pueden ocurrir complejos fenómenos de degradación de la rigidez y la resistencia, debido al elevado número de ciclos de carga que deben soportar los elementos estructurales. Debido a ello, el diseño debería ser diferente para sismos cortos y largos, independientemente de la aceleración de diseño.

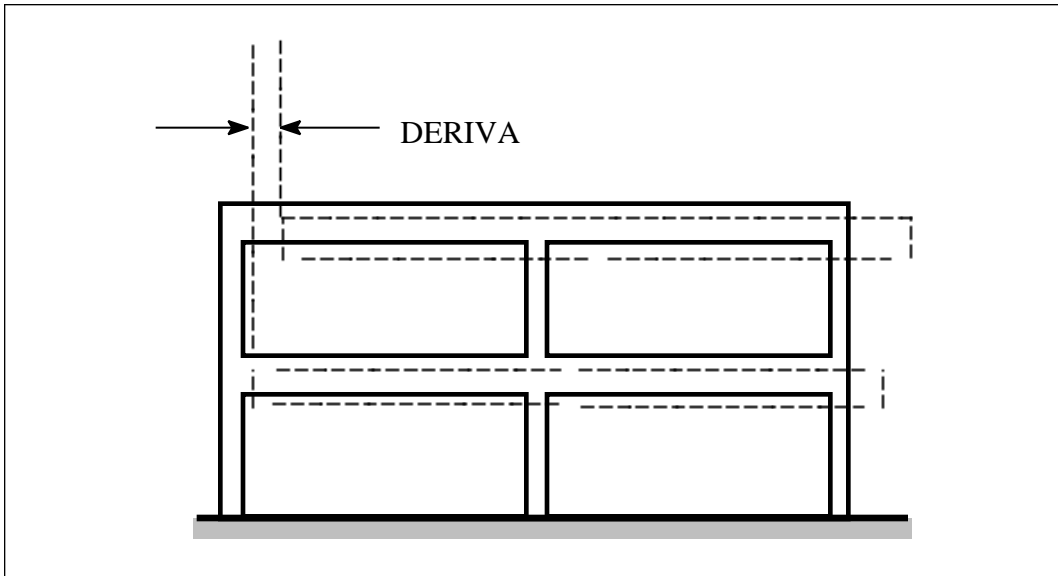
De acuerdo a varios estudios realizados en diferentes países, la duración de un sismo está en relación creciente con la magnitud del sismo y la distancia epicentral. Al contrario, la aceleración del suelo por lo general tiende a decrecer con dicha distancia. De esta manera, pueden tenerse sismos de igual aceleración pico, lo que produciría un igual espectro de aceleraciones de diseño, pero grandes diferencias en la duración, lo que produciría efectos nocivos que no serían detectados por dicho espectro.

Lo anterior conduce a que en el diseño de hospitales se deba tener presente la información sísmológica relativa a magnitudes y distancias epicentrales de las fuentes probables de liberación de energía que puedan afectarlos, de manera que si hay fuentes de magnitudes probables altas situadas a grandes distancias epicentrales, pueden esperarse de ellas sismos mucho más largos y, posiblemente, más destructivos que sismos cercanos. El sismo de México de 1985 es no solamente una muestra de los efectos de amplificación del suelo, sino también de los correspondientes a la alta duración, debido a la alta magnitud (8,1) y lejanía del epicentro (350 km de la ciudad de México).

## Derivas (desplazamiento relativo entre pisos)

En principio, los grandes desplazamientos laterales ponen en peligro la seguridad de la construcción en su totalidad, debido al daño que pueden representar para los elementos no estructurales en general. Sin embargo, cuando son aún mayores traen consigo el riesgo de colapso parcial o total de la edificación (Figura 10).

**Figura 10.**  
Derivas y estabilidad



El daño en elementos no estructurales adosados a la estructura es particularmente grave en el caso de hospitales, razón por la cual este tema será tratado específicamente cuando se describa el comportamiento de los elementos no estructurales. Por lo pronto, es necesario tener presente que dicho daño está asociado al valor del desplazamiento relativo inelástico de un nivel con respecto al inmediatamente anterior, o deriva. Se ha establecido que no son deseables valores de la deriva que superen el 1 o el 1,5 por mil de la altura libre entre los dos niveles. Sin embargo, este límite depende estrechamente de la fragilidad y la resistencia de los materiales de los elementos no estructurales.

De acuerdo con lo anterior, para un análisis adecuado de los problemas de derivas y estabilidad resulta de gran importancia el cálculo de unos valores adecuados de desplazamiento inelástico. Ser conservador en este aspecto es más conveniente en el caso de hospitales que en el de otras construcciones, debido a las implicaciones que los daños en elementos no estructurales y estructurales tienen para los ocupantes y la comunidad en general.

## Análisis de la vulnerabilidad estructural

Las secciones anteriores han versado sobre los aspectos que deben ser considerados en el planeamiento, el análisis y diseño de edificaciones, de acuerdo a las teorías recientes sobre sismorresistencia. En estos casos se hace imperativa una revisión lo más detallada posible de la capacidad de la estructura de soportar sismos moderados y fuertes. El diseño del refuerzo debe pasar necesariamente por un análisis de la capacidad disponible de resistencia y ductilidad ante sismos, así como de la vulnerabilidad funcional, organizativa y administrativa del hospital, antes de realizar su intervención.

Un estudio de vulnerabilidad busca, entre otras cosas, determinar la susceptibilidad o el nivel de daño esperado en la infraestructura, equipamiento y funcionalidad de un establecimiento hospitalario frente a un desastre determinado; por lo tanto, para iniciar un estudio de vulnerabilidad deben caracterizarse el o los fenómenos a ser considerados.

Para el caso de sismos, vale la pena seleccionar y caracterizar aquellos eventos que podrían presentarse durante la vida del establecimiento hospitalario, ya que algunos sismos frecuentes y de baja magnitud podrían afectar a los elementos no estructurales; en cambio, aquellos sismos menos frecuentes pero más violentos pueden afectar tanto a elementos estructurales como no estructurales.

A continuación se comentan los principales métodos para la realización de la revisión estructural. Debe destacarse, que dicha revisión será insuficiente si no se acompaña de una detallada revisión de los elementos no estructurales.

Para la realización de estudios de análisis de vulnerabilidad sísmica de una construcción, la literatura internacional presenta diversos métodos; un amplio listado de los mismos se encuentra en la bibliografía de esta publicación pero, en términos generales, los métodos pueden clasificarse en los siguientes grupos:

- **Métodos cualitativos:** Generalmente estos métodos han sido utilizados cuando se evalúa la vulnerabilidad de una muestra numerosa de edificaciones. O también cuando se tiene certeza acerca de la seguridad de una determinada estructura y se pretende corroborar dicho nivel de seguridad.
- **Métodos cuantitativos:** Estos métodos son utilizados cuando la importancia de la edificación así lo amerita, o bien cuando los métodos cualitativos no han sido determinantes con respecto a la seguridad de la edificación.

### Métodos cualitativos

Los métodos cualitativos son diseñados para evaluar de manera rápida y sencilla un grupo de edificaciones diversas, y seleccionar aquellas que ameriten un análisis más detallado. Estos métodos se utilizan principalmente para la evaluación masiva de edificios con fines de cuantificación del riesgo sísmico en una región amplia de una ciudad, y sus resultados, fuera de lo necesario para realizar dicha selección, no pueden tomarse realmente como concluyentes en ningún caso particular<sup>9</sup>, salvo que corroboren la seguridad de una edificación.

---

<sup>9</sup> Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS), *Programa para la mitigación de los efectos de los terremotos en la región andina*, Proyecto SISRA, Lima, 1985.

Algunos de estos métodos constituyen el primer nivel de evaluación de los métodos analíticos, como el caso del método japonés<sup>10</sup>, la evaluación diseñada por Iglesias<sup>11</sup> para el caso de Ciudad de México y el método ATC-21<sup>12</sup>. En términos generales, puede decirse que son métodos eminentemente cualitativos, en los que la construcción recibe una calificación determinada de acuerdo a aspectos tales como su estado de conservación, su irregularidad en planta y en altura, su relación con el suelo, etc., calificación que en general no precisa de cálculos muy sofisticados de oficina. Sin embargo, el primer nivel del método japonés, por el contrario, requiere del cómputo de ciertas variables, y sus ecuaciones están estrechamente relacionadas con las de los niveles superiores del método. En el anexo 1 se presentan algunos de los métodos cualitativos más usados en Latinoamérica para determinar la vulnerabilidad sísmica de edificaciones hospitalarias.

### Un diagnóstico para la priorización\*

En Chile se ha considerado como especialmente destructivo para la infraestructura del sector de la salud al sismo de 1985, evento que dañó 180 establecimientos de los 536 existentes en el área de influencia y dejó fuera de servicio 2796 de las 19.581 camas disponibles. Como resultado de esta experiencia y debido a la importancia que se le ha dado al tema de la prevención de los desastres naturales en ese país en los últimos años, se decidió realizar un programa de identificación y evaluación de la vulnerabilidad hospitalaria a efectos de priorización e intervención del riesgo de la infraestructura de salud<sup>13</sup>.

Contando con un equipo multidisciplinario idóneo, el compromiso político de las autoridades sectoriales y la información científica sobre la amenaza sísmica, se planteó la necesidad de disponer de un diagnóstico global del estado de los hospitales del país, desde el punto de vista de su vulnerabilidad sísmica. Se formuló un proyecto con el objetivo de identificar acciones de reducción de vulnerabilidad para los hospitales más importantes de cada uno de los 26 servicios de salud en que está dividido el país.

Se seleccionó una muestra inicial de 26 hospitales, que luego fue reducida a 14 dadas las similitudes en los sistemas estructurales, de modo que en el grupo final se contó con una muestra representativa de los diferentes tipos, y en el nivel de exposición a la amenaza sísmica. El desarrollo de esta metodología fue útil en dos sentidos: por una parte, para proporcionar una herramienta que no existía en el momento en el ámbito latinoamericano y, paralelamente, para identificar los problemas individuales y sus soluciones para cada hospital estudiado.

Cada uno de los hospitales fue sometido a un intenso trabajo de evaluación, incluyendo aspectos estructurales, no estructurales, funcionales y organizacionales. El proceso de evaluación, consignado en una ficha práctica, se inicia con la estructura y la seguridad de la vida.

El proyecto contempló las siguientes actividades:

<sup>10</sup> Hirosawa, M., *Evaluation of Seismic Safety and Guidelines on Seismic Retrofitting Design of Existing Reinforced Concrete Buildings*, Tokyo 1976, VI Seminar on Seismology and Earthquake Engineering for Structural Engineers, 1988. Véase también Hirosawa, M. et al., "Seismic Evaluation Method and Restoration Techniques for Existing and Damaged Buildings Developed in Japan". *IDNDR International Symposium on Earthquake Disaster Reduction Technology*, Tsukuba, Japan, 1992.

<sup>11</sup> Iglesias, J., Evaluación de la capacidad sísmica de edificios en la ciudad de México. Secretaría de Obras, México, 1986.

<sup>12</sup> ATC (Report ATC-21), *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook*, Redwood City, 1988 (FEMA Report 154, July 1988)

<sup>13</sup> Ministerio de Salud de Chile, *Seminario sobre mitigación de vulnerabilidades hospitalarias*, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, 1997.

\* Boroschek R., Astroza, M., Osorio, C., Kausel, E., *Análisis de vulnerabilidad y preparativos para enfrentar desastres naturales en hospitales de Chile*, Universidad de Chile, estudio realizado para OPS/OMS-ECHO, Santiago, Chile, 1996.

### Un diagnóstico para la priorización (cont.)

- Descripción del sistema de salud.
- Breve reseña de la sismicidad chilena.
- Capacitación del personal.
- Análisis de vulnerabilidad estructural y no estructural.
- Estimación de la vulnerabilidad del sector y desarrollo de planes de mitigación.

La efectividad de la metodología se comprobó cuando se presentó un sismo de magnitud 7,3 Richter, el 31 de julio de 1995, que afectó la ciudad de Antofagasta. El hospital de la ciudad, que había sido evaluado pocos días antes, perdió parcialmente su capacidad de operación debido a la ruptura de tuberías de agua potable, ruptura de vidrios y sistemas de iluminación, daños a equipos (hemodiálisis y calderas) y daños generales y deterioro en los sistemas estructural y no estructural, lo que inclusive llevó a que se pensara en evacuar el hospital en forma urgente.

### Vulnerabilidad hospitalaria de una ciudad<sup>14</sup>

Ecuador también cuenta con un historial extenso de sismos destructivos. En la ciudad de Guayaquil, ubicada a 200 kilómetros de la trinchera donde colisionan las grandes placas tectónicas de Nazca y Sudamericana, existe un 90% de suelos aluviales o suaves que pueden amplificar sismos con epicentros a 200 o 300 kilómetros, afectando en mayor medida edificaciones comprendidas entre cinco y quince pisos de altura, predominantemente construidas en hormigón armado. Un fuerte sismo con este origen se presentó en mayo de 1942, con una magnitud de 7,9 en la escala de Richter, y dañó severamente el casco comercial de la ciudad, con el colapso de dos edificios con las características antes citadas. En 1980 se presentó un sismo de magnitud 6,1, que provocó daños de mediana consideración en edificaciones de pobre calidad o sísmicamente muy vulnerables.

Se estaba finalizando un estudio denominado "Vulnerabilidad sísmica de estructuras importantes de la ciudad de Guayaquil", ejecutado por el Instituto de Investigación y Desarrollo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Guayaquil (IIFI-UC), cuando se planteó la necesidad de profundizar la evaluación de la vulnerabilidad de los hospitales de la ciudad, como estructuras críticas para el manejo de las emergencias. En este caso, se contaba con la información científica básica, inclusive a nivel de microzonificación de la ciudad, con un equipo profesional de ingenieros de alto nivel, con la preocupación puntual de algunos de los directores de los hospitales, y con el apoyo incondicional de la Dirección Nacional de Defensa Civil, organismo rector a nivel nacional para el manejo de emergencias.

El proyecto fue formulado por profesionales del IIFI-UC, con la coordinación general de la Dirección Nacional de Defensa Civil y el apoyo técnico de la OPS/OMS. El objetivo inicial fue la ejecución de diagnósticos preliminares de vulnerabilidad de los 16 hospitales más importantes de la ciudad, que fue ampliado para cubrir 20 hospitales, 12 de los cuales fueron evaluados cuantitativamente y los 8 restantes en forma cualitativa. La metodología empleada incluyó las siguientes actividades:

- Relevamiento estructural y censo de los hospitales: se investigaron las variables estructurales que inciden en mayor grado en el comportamiento sismorresistente de los hospitales, así como los daños estructurales y no estructurales producidos por sismos anteriores, y un inventario de los servicios que poseen los hospitales, incluyendo existencia de planes de emergencia.
- Selección de los 16 hospitales más importantes de Guayaquil: por definición, estos son los que disponen de los servicios necesarios para la atención masiva de una emergencia causada por un desastre natural. La muestra final se seleccionó en base a las recomendaciones de la Dirección Nacional de Defensa Civil.
- Definición de las solicitaciones sísmicas probables: en base a los espectros de respuesta obtenidos en la microzonificación sísmica de la ciudad.
- Evaluación experimental de la resistencia del hormigón de una muestra de 10 hospitales: ya que el 95% de los 16 hospitales poseen estructuras de hormigón armado, se extrajeron núcleos de hormigón de las columnas de la planta baja en 10 de ellos, para ser sometidos a ensayos de compresión simple.
- Evaluación experimental de características dinámicas de los 16 hospitales más importantes: el objetivo de esta fase fue evaluar la participación de los elementos no estructurales en la respuesta sísmica de la edificación, mediante la medición experimental de las características dinámicas para vibraciones ambientales.
- Análisis matemático cuantitativo del comportamiento sismo-resistente de 12 hospitales: mediante análisis de la resistencia de fluencia, de la ductilidad, de los mecanismos de falla y de las distorsiones de pisos.
- Diagnósticos cualitativos y cuantitativos de vulnerabilidad estructural y no estructural.
- Capacitación del personal técnico a cargo de las emergencias en los hospitales: se efectuaron encuentros de difusión de las actividades y resultados preliminares del proyecto, en los cuales también participaron funcionarios del Ministerio de Salud y de la Dirección Nacional de Defensa Civil.
- Categorización de la seguridad sismorresistente y nivel de operatividad del sistema hospitalario, mediante una escala novedosa de 6 niveles, siendo la primera categoría la correspondiente a pequeños daños no estructurales y la sexta la correspondiente a posibilidad de colapso total.
- Conclusiones y recomendaciones para reducir la vulnerabilidad estructural y no estructural: acciones prácticas, a corto plazo, y de bajo costo.

Este proyecto, con fuerte énfasis en aspectos de ingeniería y liderado por ingenieros estructurales, logró alcanzar a la opinión pública, mediante una cobertura muy completa que otorgaron los medios de comunicación de la ciudad a las diversas fases. El resultado más significativo fue el intercambio de inquietudes entre el equipo a cargo del proyecto y los profesionales del sector de la salud, en un idioma comprensible para todos.

<sup>14</sup> Argudo, J., Yela, R., *Vulnerabilidad Estructural de Hospitales de Guayaquil - Ecuador*, Estudio inédito realizado para la OPS/ECHO, Guayaquil 1995.

## Métodos cuantitativos

Para la recuperación post-sísmica de edificios esenciales, resulta deseable la realización de un análisis más riguroso; para lo cual se dispone de los métodos cuantitativos. Asimismo, los métodos cuantitativos sirven para profundizar en los resultados obtenidos de los métodos cualitativos, cuando estos últimos no entreguen resultados determinantes sobre la seguridad de la estructura.

Para realizar un análisis de vulnerabilidad, utilizando métodos cuantitativos es necesario contar con cierta información básica como: características de los materiales utilizados en la edificación, caracterización del suelo donde se encuentra emplazada la estructura y planos estructurales entre otra información. Generalmente los análisis cuantitativos son realizados mediante modelaciones matemáticas de la estructura, en las cuales se deben considerar aspectos tales como:

- Interacción de la estructura con los elementos no estructurales.
- Cargas reales a las que está sometida la estructura.
- Análisis para los diferentes sismos que se pueden presentar.

### Propuesta de una comunidad científica<sup>15</sup>

Se realizaron estudios de vulnerabilidad del Hospital Departamental Evaristo García y el Hospital Universitario de Caldas de la ciudad de Manizales, Colombia. Ambos estudios fueron realizados por especialistas de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), aplicando varios métodos con fines de calibración y comparación. En primera instancia se utilizaron el método ATC-22 (FEMA 178), el método japonés y el método de energía de Akiyama, y por otra parte se aplicó un método propio, denominado AIS-150, desarrollado por la AIS en 1985 y que después se convertiría en el capítulo A.10, análisis de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones existentes, de las nuevas Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente.

Aparte de la contribución que este proyecto significó para la aplicación y el desarrollo de metodologías de carácter técnico, uno de los aspectos más interesantes de esta experiencia fue el estímulo y la toma de conciencia que los estudios generaron en las autoridades, tanto de los hospitales como de los servicios de salud de las dos ciudades. Las administraciones locales, posteriormente, contrataron con recursos propios la segunda fase de los estudios, correspondiente al diseño del reforzamiento y rehabilitación sismorresistente.

Pese a que ya se habían realizado estudios de rehabilitación de hospitales con anterioridad en el país, debido a problemas de deterioro y remodelación, estos dos estudios fueron los primeros que trataron explícitamente el tema de la vulnerabilidad sísmica hospitalaria en forma preventiva, sirviendo de ejemplo para el Ministerio de Salud y la Dirección Nacional para la Prevención y Atención de Desastres (DNPAD), organismos que a partir de ese momento iniciaron el proceso de estimular el reforzamiento preventivo de edificaciones hospitalarias en las zonas de mayor amenaza sísmica del país.

---

<sup>15</sup> AIS, *Análisis de vulnerabilidad sísmica del Hospital Universitario de Caldas*, Comité de Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico AIS-400, Manizales 1992. Véase también AIS, *Análisis de vulnerabilidad sísmica del Hospital Departamental Evaristo García*, Comité de Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico AIS-400, Cali 1992.

## Intervención y reducción de la vulnerabilidad estructural

Probablemente muchos de estos establecimientos de salud sean vulnerables en grados variables a daños por fuerzas sísmicas, fuerzas de vientos huracanados u otras amenazas naturales; sin embargo, existe la posibilidad de que puedan mejorarse. La experiencia indica que con la aplicación de medidas relativamente poco costosas, se puede mejorar la seguridad de estructuras existentes.

Muchas edificaciones hospitalarias existentes no cumplen con los requisitos técnicos necesarios para asegurar su funcionamiento con posterioridad a desastres naturales. Esto significa que su vulnerabilidad a ciertas amenazas naturales puede ser tan alta que su riesgo puede exceder ampliamente los niveles aceptados actualmente. Por lo tanto, deben llevarse a cabo medidas de mitigación de acuerdo con los requisitos ingenieriles actuales de cada país, asegurándose de que consideren las características de ocupación de la edificación a fin de reducir el riesgo y garantizar un comportamiento adecuado.

La ejecución de un proyecto de reestructuración debe obedecer a un programa de trabajo detallado que involucre aspectos que aseguren el menor impacto en el normal funcionamiento del hospital en cada etapa del proceso, para lo cual debe definirse una debida coordinación con el personal administrativo, de atención médica y de mantenimiento del hospital. Experiencias previas han demostrado lo importante de dicha coordinación para que la reestructuración se cumpla en los plazos determinados, no interfiera en la prestación de los servicios de salud y se coordinen los recursos humanos adecuadamente.

### Reestructuración o rehabilitación

De acuerdo con lo examinado anteriormente, la evaluación del estado de una construcción existente puede hacer surgir algunas dudas sobre su capacidad para soportar eventos sísmicos<sup>16</sup>, lo cual puede conducir a la necesidad de reestructurar o rehabilitar, total o parcialmente, la edificación, con el fin de reducir su vulnerabilidad, previamente a la ocurrencia del evento. Dicha reducción debe ser obligatoria para edificios esenciales para la atención de emergencias derivadas de sismos.

### Diseño del refuerzo

El análisis y el diseño del modelo estructural, así como la construcción del refuerzo, deben realizarse considerando:

1. Aspectos físicos y funcionales
  - El sistema de refuerzo no debe afectar la operatividad del hospital.
2. Aspectos de seguridad estructural
  - Reducir la vulnerabilidad a niveles aceptables que permitan el funcionamiento del hospital con posterioridad a un sismo.
3. Sistemas constructivos
  - El sistema de refuerzo debe considerar la utilización de sistemas constructivos que tengan el menor impacto en el funcionamiento normal del hospital, ya que éste se ejecuta por lo general en un hospital que se encuentra en operación.
4. Costo de intervención

De acuerdo con lo anterior, la intervención de la estructura debe buscar la reducción de la vulne-

<sup>16</sup> Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), *Adición, modificación y remodelación del sistema estructural de edificaciones existentes antes de la vigencia del decreto 1400/84*. Norma AIS-150-86. Bogotá, 1986.

rabilidad existente, atendiendo a los problemas de comportamiento existentes. La reestructuración estructural pretende lograr:

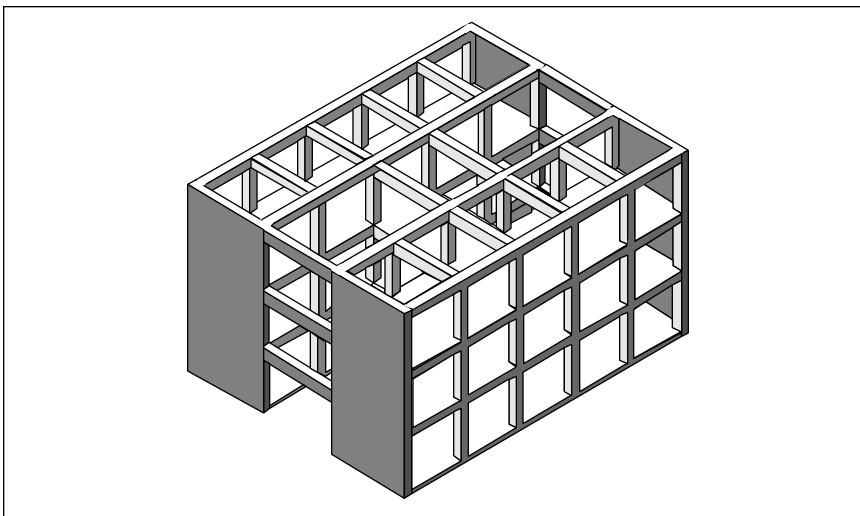
- a) Aumento de resistencia
- b) Aumento de rigidez y por lo tanto una disminución de los desplazamientos
- c) Aumento de la ductilidad
- d) Lograr una distribución adecuada de las fuerzas entre los diferentes elementos resistentes, tanto en planta como altura.

Los sistemas usuales de refuerzo de estructuras suelen recurrir a la inserción de los siguientes elementos adicionales<sup>17</sup>:

#### *Muros en el exterior del edificio*

Esta solución se emplea generalmente cuando las limitaciones de espacio y de continuidad de uso del edificio hacen preferible el trabajo en la periferia. Para asegurar la transmisión de esfuerzos por medio del diafragma a los muros se emplean vigas colectoras en los bordes de la losa. No es recomendable para edificios muy largos. (Figura 11).

**Figura 11.**  
**Muros estructurales en la periferia**



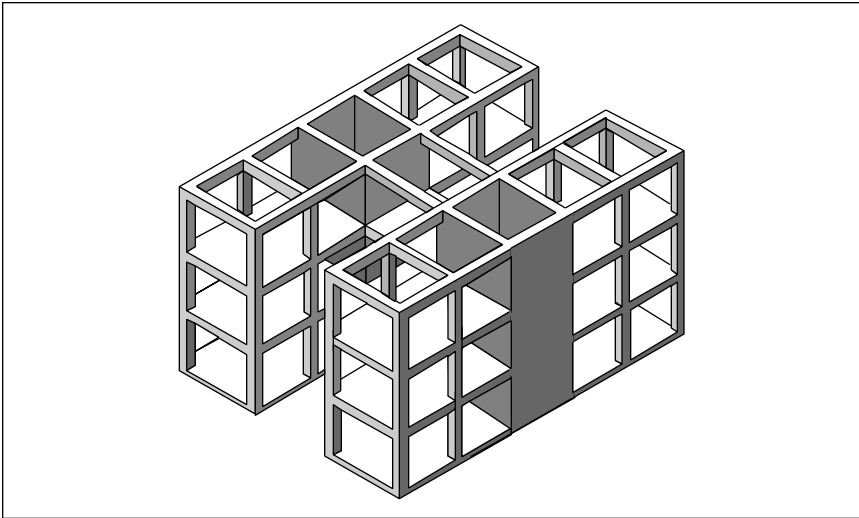
T. Guevara

#### *Muros en el interior del edificio*

Cuando las posibilidades de trabajo en el interior del edificio lo permitan, son una alternativa de necesaria consideración en edificios largos, en los cuales la flexibilidad del diafragma deba ser reducida. Se insertan generalmente por medio de perforaciones en los diafragmas, a través de las cuales pasan las barras de refuerzo. Este método de refuerzo fue utilizado en el Hospital Nacional de Niños en Costa Rica (Figura 12).

<sup>17</sup> Iglesias, J., *Evaluación de la capacidad sísmica de edificios en la Ciudad de México*. Secretaría de Obras, México, 1986.

**Figura 12.**  
**Muros estructurales al interior**



T. Guevara

### *Muros de relleno de pórticos*

Tanto en el interior como en el exterior de edificios, una solución práctica al problema de rigidez y resistencia es el relleno de vanos de pórticos con muros de concreto o de mampostería reforzada. Debido a la unión con la columna, los esfuerzos en éstas cambiarán sustancialmente. Si el refuerzo de la columna es suficiente para el nuevo estado, la unión con el muro podrá realizarse solamente por medio de pasadores soldados. En caso contrario, se debe construir un encamisado de la columna, monolítico con el muro.

### *Pórticos contrafuertes*

A diferencia de los elementos anteriores, su colocación es perpendicular a la cara del edificio. Además de aportar rigidez, son útiles para tomar el momento de vuelco en edificios esbeltos. El hospital de cardiología del Instituto Mexicano de Seguridad Social cuenta con este tipo de refuerzo (Fotografía 12). Debido a las limitaciones de espacio no siempre son factibles.

### *Pórticos arriostrados*

Otra solución frecuente consiste en incluir varios pórticos de acero con diagonales anclados fuertemente a los diafragmas, como sustituto de los muros de rigidez. (Fotografía 13)

### *Encamisado de columnas y vigas*

Empleado para sistemas de pórtico, este sistema se realiza generalmente sobre una gran parte de las columnas y vigas de un edificio, con el fin de aumentar tanto su rigidez como su resistencia y ductilidad.



OFS/OMS, C. Osorio

Fotografía 12. Hospital de Cardiología del Instituto Mexicano del Seguro Social que fue reforzado usando pórticos contrafuerzas luego del sismo de México 1985.

### *Construcción de un nuevo sistema aporticado*

En ocasiones es posible llevar a cabo una reestructuración total adosando la antigua estructura a nuevos pórticos perimetrales externos, como los usados en el reforzamiento del Hospital México en San José de Costa Rica (Fotografía 14). Usualmente se combina con la incorporación de muros estructurales internos perpendiculares al sentido longitudinal de los pórticos.



O.D.Cardona

Fotografía 13. Refuerzo con diagonales

**Figura 13.**  
**Soluciones conceptuales**

| Soluciones de refuerzo                                       |  | Beneficios   |
|--|--|--|
| Muros incorporados   |  | Aumento de resistencia y reducción de la deriva                |
| Adición de diagonales o arriostramientos                     |  | Aumento de resistencia y reducción de la deriva                |
| Adición de contrafuertes                                     |  | Confinamiento y reducción de la deriva                         |
| Adición de pórtico interior o exterior resistente al momento |  | Confinamiento y reducción de la deriva                         |
| Rehabilitación completa                                      |  | Alta capacidad sismo resistente y control de daño convencional |
| Aislamiento en la base del edificio                          |  | Protección de la edificación mediante el control del daño      |

### **Demostración de voluntad política**

Los estudios de vulnerabilidad de los hospitales en Costa Rica se iniciaron en 1984, en la Universidad de Costa Rica, como proyectos de investigación y en respuesta a la preocupación creciente en el medio de que se repitiera la experiencia de 1983 en San Isidro de Pérez Zeledón. La Escuela de Ingeniería Civil se vio motivada a iniciar esta labor gracias al incentivo que le diera el Fondo Nacional de Emergencias de ese entonces y al interés mostrado por las autoridades políticas de la Caja Costarricense del Seguro Social (CCSS). La OPS/OMS fue otro de los entes impulsores de esta iniciativa, ya que se presentaba como un campo de investigación nuevo en América Latina.

Después del estudio del Hospital Calderón Guardia, en 1984, la Universidad solicitó al año siguiente al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICIT) la financiación para estudiar la vulnerabilidad del total de hospitales del país. El CONICIT aprobó parcialmente el financiamiento solicitado, así que la Universidad dio inicio al proyecto con el estudio del Hospital México en 1986. Este financiamiento se logró, entre otros factores, gracias a que prestigiosos médicos de la CCSS apoyaron decididamente el proyecto. El estudio del Hospital México fue el primero sobre vulnerabilidad sísmica integral que se ejecutó en el país, ya que en él se tocaron los diferentes niveles de riesgos a que estaba expuesto, aspectos estructurales, no estructurales y los de índole operativo que presentaba el hospital (Figura 14).

La reestructuración de los tres edificios que conforman el complejo consistió básicamente en colocar columnas y vigas adicionales a los marcos de concreto por su parte exterior y desligar todas las paredes del sistema estructural. En forma adicional, los muros de las escaleras de emergencia se ligaron a la estructura del edificio, con el objeto de evitar su volcamiento. Con esta alternativa se aumentó la rigidez de los edificios, lo que implica una disminución de los desplazamientos laterales debidos a sismos, lo que a su vez significa reducir el daño no estructural, limitando la probabilidad de daño estructural<sup>18</sup>.

Los trabajos de reforzamiento se iniciaron en mayo de 1989 y el proceso requirió 31 meses de trabajo. El costo de las obras fue de US\$ 2.350.000 dólares, que representan el 7.8% del valor del hospital. Durante todo el proceso el hospital tuvo que reducir su número de camas de 600 a 400, con la consecuente acumulación de pacientes en espera de atención.

Aparte del Hospital México, la CCSS contrató también los estudios de vulnerabilidad, los diseños del refuerzo y la construcción de las respectivas rehabilitaciones del Hospital de Niños y el Hospital Monseñor Sanabria. También en estos dos casos se presentaron dificultades en el proceso de construcción, fundamentalmente por no involucrar debidamente a la administración del hospital en el proceso. Sin embargo, estas experiencias permitieron identificar los aspectos de coordinación y trabajo multidisciplinario que deben tenerse en cuenta, con el fin de evitar sobrecostos y problemas de funcionalidad.

Varios sismos han ocurrido desde 1990 que han demostrado la bondad de haber reforzado los hospitales antes mencionados. Particularmente, se cree que el Hospital Monseñor Sanabria no hubiera sobrevivido al sismo del 25 de marzo de 1990. Por otra parte, los daños ocurridos en el Hospital Tony Facio, que no había sido reforzado cuando

ocurrió el sismo del 22 de abril de 1991, han ratificado la importancia de continuar con el proceso. De hecho, la CCSS incorporó formalmente el diseño sismorresistente y los análisis de vulnerabilidad desde la fase de formulación de los proyectos. En el diseño del nuevo Hospital San Rafael de Alajuela, por ejemplo, se utilizaron las técnicas más desarrolladas del estado del conocimiento con un enfoque integrador. El diseño de este hospital es un ejemplo de trabajo multidisciplinario en el cual participaron profesionales de sismología, ciencias de la tierra, ingenieros, arquitectos y personal relacionado con la salud pública<sup>19</sup>.



Fotografía 14. Refuerzo del Hospital México

M. Cruz

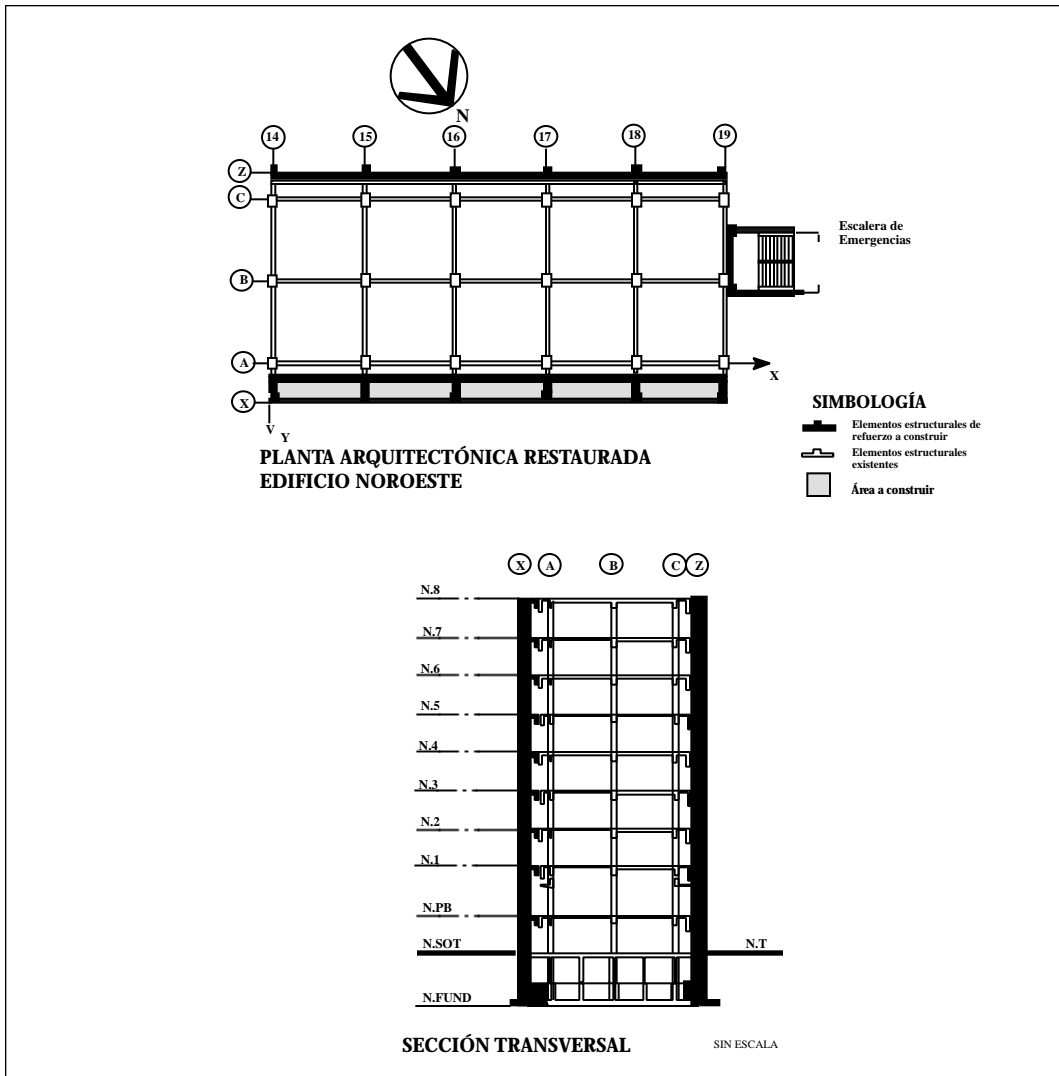
### *Control de vibraciones*

Las técnicas de aislamiento en la base y control de vibración han tenido un incremento notorio en su uso en construcciones localizadas en zonas sísmicas en los últimos años, como alternativa a la disipación de energía, por medio de la tolerancia de daño por ingreso de los elementos estructurales en el campo no lineal. Esto los convierte en sistemas que sin duda llegarán a ser de gran importancia en la construcción de edificios en general, debido a las crecientes exigencias de seguridad estructural y no estructural ante sismos fuertes, y de comodidad ante vibraciones ambientales.

<sup>18</sup> Cruz, M.E., “Comportamiento de hospitales en Costa Rica durante los sismos de 1990”, Taller Regional de Capacitación para la Administración de Desastres, OPS/PNUD/UNDRO/OEA/ONAD, Bogotá, 1991.

<sup>19</sup> Cruz, M.E., Acuña, R., *Diseño sismo-resistente del Hospital de Alajuela: un enfoque integrador*, Conferencia Internacional sobre Mitigación de Desastres en Instalaciones de Salud, OPS, México 1996.

**Figura 14.**  
**Reestructuración del edificio noroeste**



### Coordinación de la reestructuración

Para una adecuada coordinación de los trabajos de reestructuración o reforzamiento de un establecimiento hospitalario, deben intervenir los diferentes agentes involucrados en el normal funcionamiento del hospital y los profesionales directamente encargados de la ejecución de las medidas de mitigación. Por lo anterior, en la estrategia a seguir en las obras de reestructuración deben intervenir el director del hospital, administrador, encargados de los servicios clínicos y de apoyo que se verán afectados, jefe de mantenimiento y servicios generales, así como todos los profesionales involucrados en el diseño y ejecución de las obras de refuerzo.

Por otra parte, las acciones de coordinación se deben realizar en el trabajo de diseño de las medidas de mitigación, en la planificación de las obras, así como en su ejecución. Se debe tratar de que en los diferentes momentos de la coordinación siempre participen las mismas personas.

La intervención de la vulnerabilidad sísmica de la estructura de una edificación hospitalaria es una tarea usualmente más compleja que la que se puede realizar en otro tipo de edificaciones. Varios son los aspectos que hacen diferente este tipo de trabajo en las instalaciones de la salud. Entre ellos se pueden destacar los siguientes:

- Normalmente la edificación no se puede desocupar a efectos de llevar a cabo el refuerzo.
- La programación de los trabajos debe tener en cuenta la operación de los diferentes servicios de atención médica, con el fin de no causar graves trastornos al funcionamiento del hospital o la inoperancia injustificada de cierto tipo de servicios.
- Se debe prever que habrá un amplio número de labores imprevistas debido a la dificultad de identificar con precisión detalles del proceso constructivo con anterioridad a la iniciación de los trabajos.
- Deben conocerse los elementos no estructurales y los efectos sobre los acabados arquitectónicos, previamente al inicio de la intervención estructural.

Por lo anterior, el desarrollo de una reestructuración debe obedecer a un programa de trabajo muy detallado que involucre aspectos relativos a la función de los servicios en cada etapa del proceso. De la misma manera, debe definirse una debida coordinación con el personal administrativo, de atención médica y de mantenimiento del hospital.

## Costos de intervención

El costo de una intervención de la vulnerabilidad de un hospital no es posible conocerlo si no se realiza un diseño detallado de la solución estructural y de sus implicaciones en relación con los elementos no estructurales. Sin embargo, esta situación no debe impedir la formulación de un plan de avance con algún grado de precisión que se ajuste lo menos posible en el proceso.

Los costos adicionales para hacer un edificio resistente a huracanes, sismos o inundaciones pueden considerarse como un seguro. Se han hecho estudios que han demostrado que los costos de una edificación diseñada y construida desde su inicio considerando especificaciones contra amenazas como la sísmica, pueden incrementarse entre el 1% y el 4% del costo total del edificio.

Si se analiza el problema en términos del costo para proteger un equipo determinado, la diferencia podría también ser sorprendente. Por ejemplo, la interrupción de electricidad en un hospital como consecuencia de daños severos de un generador de electricidad cuyo costo puede acercarse a la cifra de US\$ 50.000 puede ser evitada mediante la instalación de aisladores sísmicos y restricciones para evitar su volcamiento cuyo costo puede ser de escasos US\$ 250.

En todos los casos se ha demostrado la alta rentabilidad económica y social de mejorar el comportamiento estructural de las edificaciones hospitalarias vulnerables. El costo de una reestructuración, aunque puede considerarse alto en algunas ocasiones, siempre será un valor poco significativo en relación con el presupuesto del servicio o en relación con el costo de su reparación o reposición física. Unas buenas preguntas figurativas que podrían formularse en cada caso podrían ser, por ejemplo: ¿el costo de la reestructuración sería equivalente a cuántos escanógrafos? y ¿cuántos escanógrafos tiene el hospital? Las respuestas podrían dar resultados sorprendentes, sin tener en cuenta todos los demás ele-

mentos, equipos y bienes que en general aloja la edificación; esto por supuesto sin tener en cuenta las vidas humanas involucradas directa o indirectamente y en general el costo social que significa la pérdida del servicio.

De acuerdo con la experiencia en la región, el valor de los estudios de vulnerabilidad sísmica estructural y diseño del refuerzo puede situarse en un rango entre 0.3% y 0.5% del valor total del hospital y el costo de la rehabilitación o refuerzo podría situarse entre el 4% y el 8% del mismo valor. En otras palabras, con una inversión en refuerzo que signifique una cifra inferior al 10% del costo por cama, podría evitarse una pérdida de no menos del 20% de las camas existentes en el caso de un sismo fuerte<sup>20</sup>. Estas cifras, si bien no pueden tomarse como evaluaciones económicas precisas, sí dan un orden de magnitud de la relación costo-beneficio económico que se logra al aplicar las medidas de mitigación.

#### Costos de reforzamiento de hospitales en Costa Rica

| Hospital                   | Camas | Duración de las obras (meses) | Valor reforzamiento (US\$) | % del valor total del hospital |
|----------------------------|-------|-------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| Hospital México            | 600   | 31                            | 2.350.000                  | 7,8                            |
| Hospital Nacional de Niños | 375   | 25                            | 1.100.000                  | 4,2                            |
| Hospital Monseñor Sanabria | 289   | 34                            | 1.270.000                  | 7,5                            |

<sup>20</sup> OPS, *Lecciones aprendidas en América Latina de mitigación de desastres en instalaciones de salud*. Aspectos de Costo - Efectividad, DHA, Secretariado del IDNDR, OPS, Washington 1997.

## Bibliografía recomendada para este capítulo

- ACI, *Seismic Design for Existing Structures*, Seminar Course Manual SCM-14(86), Detroit 1986.
- AIA/ACSA Council on Architectural Research, *Buildings at Risk: Seismic Design Basis for Practicing Architects*, American Institute of Architects, Association of Collegiate Schools of Architecture, Washington, D.C., 1994.
- Aoyama, H, *A Method for the Evaluation of the Seismic Capacity of Existing Buildings Reinforced Concrete in Japan*, Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol.14, No. 3, 1981.
- Applied Technology Council (ATC) (Report ATC 3-06), *Tentative Provisions for Development of Seismic Regulations for Buildings*, Palo Alto, 1978. [Versión en español por Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Bogotá, 1979.]
- ATC (Report ATC-14), *Evaluating the Seismic Resistance of Existing Buildings*, Redwood City, 1987.
- ATC (Report ATC-21), *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook*, Redwood City, 1988 (FEMA Report 154, July 1988).
- ATC (Report ATC-22), *A Handbook for Seismic Evaluation of Existing Buildings*, Redwood City, 1989.
- ATC (Report ATC 22-1), *Seismic Evaluation of Existing Buildings: Supporting Documentation*, Redwood City, 1989. (FEMA 175, 1989)
- ATC (Report ATC 33-03), *Guidelines for Seismic Rehabilitation of Buildings*, 75% Submittal, Third Draft, 3 Volumes, Redwood City, 1995; NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, (FEMA 273).
- ATC (Report ATC 40), *Sismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, 2 Volumes, Seismic Safety Commission, Redwood City, 1996.
- Argudo, J., Yela, R., *Vulnerabilidad estructural de hospitales de Guayaquil - Ecuador*, estudio inédito realizado para la OPS/ECHO, Guayaquil, 1995.
- Arnold C., Durkin M., *Hospitals and the San Fernando Earthquake*, Building Systems Development Inc., 1983.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), *Adición, Modificación y Remodelación del Sistema Estructural de Edificaciones Existentes antes de la Vigencia del Decreto 1400/84*. Norma AIS-150-86. Bogotá, 1986.
- AIS, *Análisis de Vulnerabilidad Sísmica del Hospital Universitario de Caldas*, Comité de Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico AIS-400, Manizales, 1992.
- AIS, *Análisis de Vulnerabilidad Sísmica del Hospital Departamental Evaristo García*, Comité de Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico AIS-400, Cali, 1992.

- AIS, *Código colombiano de construcciones sismo resistentes, comentarios, manuales y especificaciones*. Bogotá, 1991.
- AIS, *Normas colombianas de diseño y construcción sismo resistente NSR-98*, Ley 400 de 1997, Decreto Ley 33 de 1998, Santa Fe de Bogotá, 1998.
- AIS, *Seminario sobre vulnerabilidad sísmica de edificaciones y de líneas vitales*, Boletín Técnico No. 50, AIS/Universidad de los Andes, Bogotá, junio 1996.
- Akiyama, H., *Earthquake-Resistant Limit-State Design for Buildings*. Tokio, 1985.
- Aktan A.E., I-Kang Ho, "Seismic Vulnerability Evaluation of Existing Buildings", *EERI Earthquake Spectra*, 6(3): 439-472, 1990.
- Bazán, E., Meli, R., *Manual de diseño sísmico de edificios*, Limusa, México, 1987.
- Bellido, J. et al, *Vulnerabilidad no-estructural del Hospital Nacional Guillermo Almenara Irigoyen*, OPS, Lima, 1997.
- Bertero, V., "Rehabilitación Sísmica de Edificios Existentes", *Terremoto de Caracas 30 Años Después*, Caracas, 1997.
- Bitrán, D., Estrategias y políticas para hospitales más seguros en América Latina y el Caribe, documento inédito para la OPS, Preliminar, enero 1998.
- Blejwas T., Bresler B., *Damageability in Existing Buildings* (Informe no. UCB/EERC-78/12). Earthquake Engineering Research Center, University of California, agosto 1979.
- Boroschek, R., Astroza, M., Osorio, C., Kausel, E., *Análisis de vulnerabilidad y preparativos para enfrentar desastres naturales en hospitales de Chile*, Universidad de Chile, estudio realizado para OPS/OMS-ECHO, Santiago, Chile, 1996.
- Boroschek, R., Astroza, M., Osorio, C., *Capacidad de respuesta de Hospitales ante desastres sísmicos: Aspectos No Estructurales*, Conferencia Internacional sobre Mitigación de Desastres en Instalaciones de Salud, OPS, México, 1996.
- Boroschek, R., Astroza, M., *Estudio de vulnerabilidad física del hospital San Martín de Quillota*, Ministerio de Salud de Chile, OPS, Santiago, 1994.
- Cardona, O.D., *Análisis de vulnerabilidad sísmica y diseño del reforzamiento del Hospital Kennedy de Santa Fe de Bogotá*, Ingeniar Ltda: Ingenieros y Arquitectos Consultores, ECHO:3/OPS, Bogotá, 1996.
- Cardona, O.D., *Estudios de vulnerabilidad y evaluación del riesgo sísmico: planificación física y urbana en áreas propensas*. Boletín Técnico No. 33, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Bogotá, diciembre 1986.
- Cardona, O.D., *Las edificaciones hospitalarias en la nueva legislación sísmica colombianas*, Conferencia Internacional sobre Mitigación de Desastres en Instalaciones de Salud, OPS, México, 1996.
- Cardona, O.D., "Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones y centros

- urbanos", *VII Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismo-Resistente - IX Jornadas Estructurales*, SCI/AIS/MOPT, Bogotá, octubre 1991.
- Cardona O.D., Hurtado J.E., "Análisis de vulnerabilidad sísmica de estructuras de concreto reforzado", *Reunión del Concreto*, ASOCRETO, Cartagena, 1992.
- Clough, R., Penzien, J., *Dynamics of Structures*. Tokio: McGraw-Hill Kogakusha, 1975.
- Crawley, S.W., Ward. D. B., *Seismic and Wind Loads in Architectural Design: An Architect's Study Guide*, American Institute of Architects. 2nd Edition, 1990.
- Cruz, M. F., "Comportamiento de hospitales en Costa Rica durante los sismos de 1990", *Taller regional de capacitación para la administración de desastres*, OPS/ PNUD/ UNDRO/ OEA/ ONAD, Bogotá, 1991.
- Cruz, M.F., Acuña, R., *Diseño sismo-resistente del Hospital de Alajuela: un enfoque integrador*, Conferencia Internacional sobre Mitigación de Desastres en Instalaciones de Salud, OPS, México, 1996.
- Department of Energy, *Seismic Safety Manual: A Practical Guide for Facility Managers and Earthquake Engineers*, Office of Environment, Safety and Health, Office of Nuclear and Facility Safety, University of California, Livermore, 1996.
- Department of Defense, *Seismic Design Guidelines for Upgrading Existing Buildings*. Technical Manual, Army TM 5-809-10-2, Navy NAVFAC P-355.2, Air Force AFM 88-3, Capítulo 13, Sección B, septiembre 1988.
- Dowrick, D.J. *Diseño de estructuras resistentes a sismos para ingenieros y arquitectos*. México: Limusa, 1984.
- EERI, *Reducing Earthquake Hazards: Lessons Learned from the 1985 Mexico Earthquake* (Publication No. 89-02). Oakland, California: EERI, 1989.
- EERI, *Reducing Earthquake Hazards: Lessons Learned from Earthquakes*. (Publication No. 86-2). Oakland, California, 1986.
- Englekirk R.E., Sabol T.A., "Strengthening Buildings to Life Safety Criterion," *EERI Earthquake Spectra*, 7(1): 81-87, 1991.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA), *NEHRP Handbook for Seismic Evaluation of Existing Buildings*. (FEMA 178), Washington, 1992; *Handbook for Seismic Evaluation of Buildings: A Prestandard*. (FEMA 310), Washington, D.C., 1998.
- FEMA, *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings*. (FEMA 222A, 223A), Washington, 1995.
- FEMA, *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: Supporting Documentation* (Report ATC-21-1). (FEMA 155) Washington, D.C., 1988.
- FEMA, *Typical Costs for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*, Volume I Summary (FEMA 156), Volume II Supporting Documentation (FEMA 157), Washington, D.C., 1988.

- García, L.E., *Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico*, Universidad de los Andes, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Bogotá, 1998.
- Grases, J. et al, *Evaluación sismorresistente de instalaciones de la ciudad universitaria DR. Enrique Tejera, Valencia, Estado Carabobo, Venezuela*. Informe de Estudio para la OPS, inédito. Caracas, 1995.
- Guevara, L.T., *Evaluación preliminar de la respuesta ante el sismo del 09-07-97 del Hospital Antonio Patricio de Alcalá, Cumaná, Edo. Sucre, Venezuela: aspectos arquitectónicos-funcionales del departamento de emergencia y medicina crítica*. Informe inédito para la OPS, Caracas, 1997.
- Hirosawa, M., *Evaluation of Seismic Safety and Guidelines on Seismic Retrofitting Design of Existing Reinforced Concrete Buildings*, Tokyo 1976, VI Seminar on Seismology and Earthquake Engineering for Structural Engineers, 1988.
- Hirosawa, M. et al, "Seismic Evaluation Method and Restoration Techniques for Existing and Damaged Buildings Developed in Japan". *IDNDR International Symposium on Earthquake Disaster Reduction Technology*, Tsukuba, Japan, 1992.
- Iglesias, J., *Evaluación de la capacidad sísmica de edificios en la Ciudad de México*. Secretaría de Obras, México, 1986.
- Iglesias, J. et al., *Reparación de estructuras de concreto y mampostería*. Universidad Autónoma Metropolitana, México, 1988.
- Lomnitz, C., Rosenblueth, E. (eds), *Seismic Risk and Engineering Decisions*. Amsterdam, 1976.
- Meek, J., *Matrix Structural Analysis*. Tokio: McGraw-Hill Kogakusha, 1971.
- National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER), *Manual of Repair Methods for Civil Engineering Structures Damaged by Earthquakes*. State University of New York at Buffalo, 1990.
- Newmark, N. M., Rosenblueth, E., *Fundamentos de ingeniería sísmica*. México, 1976.
- Ohkubo M., *Current Japanese System for Evaluation of Seismic Capacity of Existing Reinforced Concrete Buildings Structures*. Tsukuba, Japón: International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, diciembre 1991.
- OPS, *Guías para la mitigación de riesgos naturales en las instalaciones de la salud de los países de América Latina*. Washington, D.C., 1992.
- OPS, *Lecciones aprendidas en América Latina de mitigación de desastres en instalaciones de salud, aspectos de costo - efectividad*, DHA, Secretariado del IDNDR, OPS, Washington, D.C., 1997.
- OPS, *Programa de reconstrucción y reordenamiento de los servicios de salud*. Secretaría de Salud, México, 1986.
- Pan American Health Organization (PAHO), *Disaster Mitigation Guidelines for Hospitals and Other Health Care Facilities in the Caribbean*. Washington, D.C., 1992.
- Park, R., Paulay, T., *Estructuras de concreto reforzado*. México: Editorial Limusa, 1978.

- Park, Y.J. Ang, A. H-S, and Wen, Y.K., *Seismic Damage Analysis and Damage-Limiting Design of R/C Buildings*, Civil Engineering Studies, Report SRS 516, University of Illinois, Urbana, 1984.
- Park, Y.J., Reinhorn, A.M. and Kunnath, S.K. *IDARC : Inelastic Damage Analysis of Reinforced Concrete Frame - Shear Wall Structures*, Report NCEER-87-0008, State University of New York at Buffalo, 1987.
- Perbix T.W., Burke P., "Toward a Philosophy for Seismic Retrofit: The Seattle Experience," *EERI Earthquake Spectra*, 5(3): 557-569, 1990.
- Platt C.M., Shepherd R., "Some Cost Considerations of the Seismic Strengthening of Pre-Code Buildings" *EERI Earthquake Spectra*, 1(4): 695-720, 1985.
- Priestley, M.J. N., Calvi, G. M., "Towards a Capacity-Design Assessment Procedure for Reinforced Concrete Frames," *EERI Earthquake Spectra* 7(3): 413-437, 1991.
- Reinhorn, A.M. et al, *IDARC 2D Versión 4.0 : A Program for Inelastic Damage Analysis of Buildings*, Users Manual, Report NCEER-96.0010, University of Buffalo, New York, 1996.
- Rivera de Uzcátegui, I., *Evaluación primaria de edificios bajos ante solicitaciones sísmicas, aplicación al Hospital Universitario de Mérida*. Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes, 1989.
- Rodríguez M., Park R., "Repair and Strengthening of Reinforced Concrete Buildings for Seismic Resistance," *EERI Earthquake Spectra*, 7(3): 439-459, 1991.
- Rosenblueth, E. (ed.), *Design of Earthquake Resistant Structures*. Nueva York, 1981.
- Sarria, Alberto, *Ingeniería sísmica*. Ediciones Uniandes, Bogotá, 1990.
- Scott, J.G., *Architecture Building Codes*, Van-Nostrand Reinhold, New York 1997.
- Sugano S., *Seismic Strengthening of Existing Reinforced Concrete Buildings in Japan*. Tsukuba, Japan: International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, diciembre 1991.
- Tassios T.P., *Evaluation of the Relative Seismic Risk of Existing Buildings by Means of Simplified Vulnerability Techniques*. (Informe del proyecto Popayán, presentado en Atenas, Grecia, diciembre 1989).
- University of Antioquia, WHO Collaborating Center. *The Status of Instruction on Emergency Health Management after Disasters at the Postgraduate Level in Latin America*, PAHO/WHO, 1990.
- URS/JOHN A. BLUME & ASSOCIATES, ENGINEERS, *Selected Seismic Rehabilitation Techniques and Their Costs*, NEHRP, Contract No. EMW-87-C-2527, FEMA,
- Wiegel, R. (ed.), *Earthquake Engineering* Englewood Cliffs, 1970.
- Williams, M.S., Sexsmith, R.G., "Seismic Damage Indices for Concrete Structures: A State-of-the-Art Review", *EERI Earthquake Spectra*, Vol. 11 No. 2, May 1995.