

# EVALUACION Y REDUCCION DE LA VULNERABILIDAD

### ANALISIS DE VULNERABILIDAD

Los capítulos anteriores han versado sobre los aspectos que deben ser considerados en el análisis y diseño de edificaciones hospitalarias nuevas, de acuerdo a las teorías recientes sobre sismorresistencia. Sin embargo, surgen dudas con respecto a la seguridad ofrecida por los hospitales existentes, y principalmente cuando éstos son necesarios para la atención de una emergencia sísmica y han sido diseñados solamente para atender las cargas de gravedad. En estos casos se hace imperativa una revisión lo más detallada posible de la capacidad de la estructura de soportar sismos moderados y fuertes. Debe tenerse presente que la dificultad de construir nuevas instalaciones hospitalarias en zonas sísmicas, debido a su alto costo, hace imperativo el reforzar las existentes. 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.

En el presente capítulo se exponen los métodos principales para la realización de dicha revisión estructural. Debe destacarse, además, que dicha revisión será insuficiente si no se acompaña de una detallada revisión de los elementos no estructurales, el colapso o falla de los cuales puede causar serios problemas de vulnerabilidad funcional en edificaciones esenciales.

Para fines de análisis de vulnerabilidad sísmica detallada de una construcción, la literatura internacional presenta diversos métodos, un amplio listado de los mismos se encuentra en la bibliografía (anexo 3). En términos generales, los métodos pueden clasificarse en los siguientes grupos:

- ↳ Métodos cualitativos.
- ↳ Métodos experimentales.
- ↳ Métodos analíticos.

Los primeros son métodos diseñados para evaluar de manera rápida y sencilla un grupo de edificaciones diversas, y seleccionar aquellas que ameriten un análisis más detallado. El uso principal de estos métodos es 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 (14). Algunos de estos métodos constituyen el primer nivel de evaluación de los métodos analíticos, como el caso del método japonés y la evaluación diseñada por Iglesias (15) para el caso de Ciudad de México. Además de ellos, es digno de mención el método ATC-21 (16). 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 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.

Para la recuperación post-sísmica de edificios esenciales, resulta deseable la realización de un análisis más juicioso; para lo cual se dispone de los métodos analíticos y de los experimentales. Estos últimos determinan el comportamiento dinámico de la estructura por medición directa de vibraciones ambientales. Por ello, tienen la desventaja de que no aportan más información que la correspondiente a las características dinámicas de la construcción bajo vibraciones de pequeña amplitud, lo cual los hace insuficientes para responder inquietudes sobre resistencia, disipación de energía, etc., razón por la que deben ser necesariamente complementados con los métodos puramente analíticos.

Los métodos puramente analíticos son los usualmente utilizados para la evaluación en detalle de la vulnerabilidad posible de una estructura ante sismos de diferente orden de magnitud. En términos generales, todo análisis no lineal e histerético de una estructura sometida a movimientos del terreno, constituye un análisis de vulnerabilidad de la misma. Sin embargo, la aplicabilidad de estos métodos es discutible por varias razones:

- ☞ La alta complejidad del modelo, que sólo justifica su utilización en casos muy especiales, pero al mismo tiempo de gran sencillez, condiciones que pocas veces coinciden.
- ☞ La necesidad de realizar el análisis utilizando varios tipos de registros de sismos, para cubrir las varias posibilidades de acción sobre la estructura, lo que complica la situación.

Por estas razones, se han desarrollado diversos métodos analíticos más cercanos a las prácticas usuales de diseño. De ellos son destacables los siguientes: el «método japonés», el «método norteamericano» y el «método de energía».

### **Método Japonés**

Este método (17, 18), expedido oficialmente en Japón por el Ministerio de Construcción, para la revisión de edificios de concreto construidos en zonas sísmicas, dispone de tres niveles de evaluación, que van de lo simple a lo detallado, y es en general un método supremamente riguroso. Se basa en la calificación del comportamiento sísmico de cada piso de la estructura por medio de un índice en el que se incorpora los siguientes aspectos, a través de los subíndices respectivos:

- ☞ Resistencia de los elementos verticales (columnas y muros),  
**C.**
- ☞ Capacidad de ductilidad de los mismos, **F.**
- ☞ Estado de la construcción y comportamiento en sismos anteriores,  
**T.**

↳ Influencia de la forma, la asimetría en planta, las concentraciones de masa y rigidez, las aberturas en el diafragma, etc.,  $S_d$ .

↳ Influencia de las condiciones topográficas y geotécnicas,  $G$ .

Los dos primeros índices son combinados en un máximo de tres grupos por piso, a través del índice:

$$E = C.F$$

y, a su vez, los índices  $E$  de un piso son promediados de manera probabilística para obtener un índice  $E$  único por piso, por medio del método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados. Los grupos en mención son grupos de comportamiento dúctil, formados de acuerdo al factor de ductilidad característico, obtenido como se explica más adelante.

Para cada grupo se obtienen a continuación los índices  $T$  y  $S_d$ , y finalmente el índice  $I_s$ , que tiene por valor:

$$I_s = E.S_d.G.T$$

Los valores de  $I_s$  mayores que un valor de referencia  $I_{so}$  aseguran, según este método, un comportamiento adecuado del piso.

El valor de  $I_{so}$  se calcula como:

$$I_o + E_s.Z.G.U$$

donde:

$E_s$  = valor básico de comportamiento sísmico, relacionado sólo con el método de evaluación.

$Z$  = factor de zona sísmica, tomado en relación con la amenaza probable en la zona, con valor máximo de 1.0.

$U$  = factor de importancia de la construcción para la recuperación después de un terremoto.

El método dispone de tres niveles de evaluación, de los cuales el primero es el comentado más arriba. Para la aplicación del segundo es necesario tener conocimiento de las armaduras de los elementos estructurales verticales, y el tercero, la pertinente además a las vigas. La característica más importante de este método es que confiere mayor importancia al análisis de resistencia que al de los esfuerzos internos que eventualmente podría presentar un sismo dado en los elementos de la estructura. Puede decirse que para la aplicación de este método no es necesario en general realizar un análisis detallado de dichos esfuerzos internos. Además, el método confiere

gran importancia al establecimiento de los mecanismos de falla y disipación de energía de los elementos, los cuales resultan clasificados en diversos grupos de acuerdo a su comportamiento y tipo de falla. Para este análisis, se parte de la evaluación del factor de capacidad de ductilidad  $m$  de cada elemento, dado por:

$$m = m_o - k_1 - k_2$$

$$m_o = 10 \cdot \left( \frac{V_n}{Q_n} - 1 \right)$$

donde:

$V_n$  = resistencia nominal a cortante de los soportes verticales. En el caso de columnas se calcula teniendo en cuenta la carga axial del elemento.

$Q_n$  = resistencia a cortante suministrada por la plastificación de los extremos de la columna, es decir,

$$Q_n = 2 \frac{M_n}{L}$$

siendo  $M_n$  la resistencia nominal a flexión del elemento y  $L$  su longitud.

$k_1, k_2$  = factores que conciernen al posible pandeo de las barras de refuerzo y al nivel de esfuerzos cortantes.

A partir del cálculo de  $Q_n$  se puede establecer fácilmente el modo posible de falla de cada elemento, de suerte que valores de  $Q_n < V_n$  arrojan fallas a flexión y al contrario, fallas de cortante, es decir, frágiles.

Una vez realizada esta evaluación, cada tipo de elemento se subdivide en un máximo de tres grupos, de acuerdo a valores representativos de  $m$ , y se obtiene los índices  $C$  y  $F$  respectivos, de lo cual resulta el índice común  $E$ , que califica conjuntamente la resistencia y la ductilidad disponible en la estructura.

### **Métodos Norteamericanos**

El ATC-14 y ATC-22, (19, 20, 21), avalados por la Federal Emergency

Management Agency de los Estados Unidos, son métodos que proponen una revisión simplificada de la estructura, por medio de ecuaciones aproximadas para la estimación de esfuerzos y deformaciones. El método ATC-14 está elaborado en relación con la concepción de diseño de SEAOC de esfuerzos de trabajo, mientras que el ATC-22 lo está en relación con la concepción de diseño límite del ATC-3. En ambos casos, la revisión busca obtener relaciones demanda/capacidad (al contrario en el ATC-14) de los elementos estructurales sometidos a los diferentes esfuerzos.

A diferencia del anterior, este método confiere gran importancia al análisis de esfuerzos internos, tanto como a la resistencia de los elementos a los mismos, pues su objetivo final es la evaluación de las relaciones demanda sísmica de fuerza/capacidad redundante de resistencia a la misma,  $D_e/C_e$ :

donde  $Q_e$  = Fuerza interna causada sólo por la carga sísmica.

$Q_n$  = Resistencia del elemento a la misma.

$Q_v$  = Fuerza interna causada por la carga vertical.

Estos valores deben ser ordenados de manera descendente, de suerte que los mayores reflejan aquellos elementos que están en una situación de mayor riesgo de falla.

Sin embargo, el método tiene la grave deficiencia de no disponer de herramientas para evaluar de manera clara la capacidad de ductilidad de la estructura en sus diferentes tipos de elementos y diferentes pisos, como sí lo hace el método anterior. En lugar de ello, clasifica los edificios según un indicativo global de ductilidad de acuerdo a su sistema estructural, según una tabla un poco más detallada que el Código ATC-3. La experiencia reciente en sismos fuertes y los métodos teóricos de energía muestran, no obstante, diferencias sustanciales en las demandas de ductilidad entre los diferentes pisos de una estructura, y aún entre diferentes elementos, tal como se mostrará más adelante, razón por la cual la calificación global de la capacidad de absorción de energía en todo el edificio por medio de un índice único es claramente insuficiente.

### **Método de energía**

El método de energía (8), mencionado en el capítulo 2 de este documento, presenta un enfoque radicalmente diferente del usual tanto para el diseño como para la revisión de edificios sometidos a movimientos sísmicos. Para efectos de revisión de estructuras existentes tiene la virtud de establecer claramente los pisos débiles de la estructura, los elementos de los mismos que tienen tendencia a fallar en primer lugar, las demandas de ductilidad asociadas a la energía absorbida en cada piso y, en consecuencia, refleja de manera adecuada la situación probable del edificio

en relación con un sismo fuerte.

## **REDUCCION DE LA VULNERABILIDAD**

De acuerdo con lo examinado anteriormente, la evaluación del estado de una construcción existente puede hacer surgir serias dudas sobre la capacidad de la misma para soportar eventos sísmicos (22). En algunos países se han desarrollado campañas de reforzamiento de edificios existentes para efectos de reducir su vulnerabilidad, previamente a la ocurrencia del evento. En principio, puede pensarse que dicha reducción debería ser obligatoria para edificios esenciales para la atención de emergencias derivadas de terremotos, que resulten inadecuados desde el punto de vista de las evaluaciones mencionadas en el capítulo anterior, de acuerdo a uno o varios aspectos.

### **Problemas comunes**

A partir del diagnóstico realizado de acuerdo con los métodos esbozados en el capítulo anterior, pueden dictaminarse las causas de debilidad de la estructura. La lista siguiente enuncia algunas de dichas causas (23):

- *Poca capacidad global de disipación de energía.* Este problema es usual en edificios construidos bajo normas de diseño que no contemplan la resistencia a sismos. En ellos se observan grandes separaciones de estribos en vigas y columnas, así como poco refuerzo a compresión en vigas en las zonas cercanas a los nudos, y ausencia de confinamiento de éstos.
- *Poca resistencia en exceso de la requerida para la atención de las cargas de gravedad.* Esto es lógico en diseños realizados solamente para la atención de dichas cargas, al menos en lo que se refiere a vigas. En cuanto a columnas, la situación puede ser más o menos crítica debido a la complejidad de la interacción momento-fuerza axial.
- *Errores en el modelo estructural.* Pueden encontrarse errores e inconsistencias de diverso orden en la concepción original de la estructura sometida a cargas verticales. Entre ellos pueden estar el haber ignorado los momentos de flexión en el diseño de columnas, la concepción de las vigas como simplemente apoyadas al tiempo con su construcción como elementos continuos, etc.
- *Deficiencia de rigidez y resistencia en una o dos direcciones.* En la concepción del diseño exclusivamente para cargas de gravedad con losas en una dirección, no resulta necesaria la presencia de vigas en la dirección de trabajo de la losa. Por esta razón son omitidas frecuentemente. Esto hace que la estructura sea particularmente flexible y débil en este sentido. En el caso de losas en dos direcciones, por otra parte, el problema puede ser mayor si éstas han sido construidas sin vigas, ya que los problemas mencionados se dan en las dos direcciones, y debido a que las losas no están preparadas usualmente para soportar los esfuerzos de corte derivados del sismo.

Además de estos problemas, suelen ser comunes los relacionados con la configuración y con los muros de relleno, los cuales han sido examinados en los capítulos correspondientes.

### **Diseño del reforzamiento**

De acuerdo con lo anterior, la intervención de la estructura debe buscar la reducción de estos problemas, a través de mecanismos necesarios, los

cuales pueden clasificarse en cuatro grupos:

- ↳ Aumento de la capacidad global de disipación de energía.
- ↳ Aumento de la resistencia.
- ↳ Disminución de la concentración de energía en planta y en altura.
- ↳ Rigidización.

El análisis y el diseño del modelo estructural de la estructura reforzada debe realizarse en consideración clara de aspectos como los siguientes:

- ↳ El impacto de la variación de rigidez sobre la respuesta espectral.  
En el espectro de aceleraciones la variación de la rigidez puede afectar significativamente la respuesta global de la estructura.
- ↳ La respuesta de los elementos viejos que no hayan sido intervenidos, pero cuya conexión con el diafragma los lleve a intervenir en la respuesta global de un piso.
- ↳ El impacto del aislamiento de muros de relleno sobre la rigidez de cada piso.
- ↳ Los elementos adicionales que deben ser construidos en el caso de creación de juntas de movimiento sísmico en los diafragmas.
- ↳ La interrelación entre los mecanismos de rigidización, aumento de resistencia y ductilidad.
- ↳ El cambio de esfuerzos en el suelo y la cimentación.
- ↳ La relación del sistema constructivo con el mantenimiento del uso del edificio.
- ↳ El costo de la intervención.
- ↳ Los aspectos arquitectónicos, funcionales y estéticos del reforzamiento.

Los sistemas usuales de reforzamiento de estructuras suelen recurrir a la inserción de los siguientes elementos adicionales (24). (Ver anexo 2.)

- ↳ *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.
- ↳ *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. Debido a las limitaciones de espacio no siempre son factibles.
- ↳ *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.
- ↳ *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 misma 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 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. Igualmente, pueden construirse solamente las diagonales unidas a los pórticos existentes cuando éstos demuestran ser resistentes ante las fuerzas demandadas por ellos con el nuevo sistema, en especial, ante las fuerzas axiales en las columnas y de corte en los nudos.
- ↳ *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, resistencia y ductilidad. Los sistemas de encamisado, en la mayoría de los casos, se diferencian básicamente en la manera como se une el recubrimiento nuevo a la columna existente.
- ↳ *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. Usualmente se combina con la incorporación de muros estructurales internos perpendiculares al sentido longitudinal de los pórticos.

### **Coordinación de la reestructuración**

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.

- ↳ Normalmente la edificación no se puede desocupar para efectos de llevar a cabo el reforzamiento, particularmente cuando la intervención estructural se realiza como medida preventiva antes de la ocurrencia de un sismo probable.
- ↳ 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 traumatismos al funcionamiento del hospital o la inoperancia injustificada de cierto tipo de servicios.
- ↳ Es necesario 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.
- ↳ De igual forma, debe conocerse la complejidad de los elementos no-estructurales y la difícil identificación de cambios o 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.

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 requiera de mínimos ajustes durante el proceso.

Usualmente los costos de un reforzamiento son relativamente altos si se ejecutan en un corto plazo. No obstante, si el trabajo se realiza por etapas, la aplicación de los recursos es más pausada y factible dentro de los márgenes de gastos relacionados con el mantenimiento del hospital.

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 restructuración, 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:

- ① Cuántos escanógrafos serían equivalentes al costo de la restructuración?
- ② Cuántos escanógrafos tiene el hospital? Las respuestas podrían dar resultados sorprendentes, sin tener en cuenta todos los demás elementos, 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.