

CAPÍTULO 4

VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICACIONES ESENCIALES

4.1. INTRODUCCIÓN

La efectividad de un plan de emergencia o respuesta sísmica parte del supuesto que las edificaciones esenciales mantienen en todo momento su capacidad de prestar atención a la crisis sísmica. En este sentido, el riesgo sísmico de una comunidad está estrechamente ligado al desempeño de sus edificaciones esenciales. En general, el riesgo sísmico se caracteriza por su variabilidad en el tiempo y en el espacio, al depender no sólo de la sismicidad de la región sino también, de la densidad de la población, el nivel de desarrollo económico y el grado de preparación para hacer frente a una crisis sísmica, condiciones que pueden dar lugar a una catástrofe sísmica. Obviamente, la posible catástrofe es mayor, cuanto más grande sea el terremoto, cuanto más cerca esté de un centro urbano, cuanto más numerosa sea la población, mayor el desarrollo económico y *más bajo el nivel de preparación* (Bertero, 1992), o bien expresado en términos de riesgo sísmico, cuanto mayor sean la peligrosidad, la vulnerabilidad y el valor de los elementos expuestos.

Las medidas de prevención y mitigación contra los efectos de un desastre sísmico deben considerarse como parte fundamental de un proceso de desarrollo integral a nivel regional y urbano, con el fin de reducir el riesgo existente, pues estos eventos pueden causar un grave impacto en el desarrollo de las comunidades por lo que las autoridades competentes deben necesariamente conocer el riesgo existente.

Desde este punto de vista, todos los centros urbanos están expuestos a un riesgo sísmico potencial cuyo conocimiento es determinante para definir estrategias de atención adecuadas a la emergencia planteada y en este punto, el conocimiento de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones esenciales juega un papel preponderante, pues en ella se fundamenta el despliegue de cualquier plan de emergencia y atención a la crisis sísmica. Es por tanto necesario que un estudio de la vulnerabilidad sísmica de los edificios que albergan instalaciones esenciales esté dirigido no sólo a la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de la edificación que la contiene, sino que necesariamente debe ir más allá, para permitir estimar en qué medida impacta a una comunidad la degradación de la capacidad de prestar sus servicios o funciones.

En este capítulo se introduce el concepto de vulnerabilidad sísmica y su relación con conceptos como la amenaza y el riesgo sísmico que servirá de marco para el desarrollo del presente trabajo. Se destaca la necesidad de la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones esenciales desde un punto de vista amplio que englobe tanto la afectación funcional como el daño físico descrito en términos de la vulnerabilidad funcional, no estructural y estructural.

4.2. DEFINICIONES

Utilizando como base las definiciones propuestas por la Oficina de las Naciones Unidas para Casos de Desastres – UNDR0 (1979), en el marco del Decenio Internacional

para la Reducción de Desastres Naturales (OPS, 1993), se entiende por *Amenaza o Peligro Sísmico*, la probabilidad que se presente un sismo potencialmente desastroso durante cierto período de tiempo en un sitio dado. Representa un factor de riesgo externo al elemento expuesto, un peligro latente natural asociado al fenómeno sísmico, capaz de producir efectos adversos a las personas, los bienes y/o el medio ambiente.

Se entiende por *Riesgo Sísmico*, el grado de pérdida, destrucción o daño esperado debido a la ocurrencia de un determinado sismo. Está relacionado con la probabilidad que se presenten o manifiesten ciertas consecuencias, lo cual está íntimamente vinculado al grado de exposición, su predisposición a ser afectado por el evento sísmico y el valor intrínseco del elemento.

De manera que la diferencia fundamental entre la amenaza y el riesgo sísmico, es que la amenaza sísmica está relacionada con la probabilidad de ocurrencia del evento sísmico, mientras que el riesgo sísmico está relacionado con la probabilidad de que se produzca una pérdida de valor como consecuencia de un sismo (OPS, 1993). La relación entre estos conceptos puede expresarse como:

$$R_{ie} = (A_i^t, V_e, C_e) \quad (4.1)$$

A_i^t ... Representa la amenaza o peligro sísmico, entendida como la probabilidad que se presente un evento sísmico con intensidad mayor o igual que i , durante un periodo de exposición t .

V_e ... Representa la vulnerabilidad sísmica, entendida como la predisposición intrínseca de un elemento expuesto e , a ser afectado por la ocurrencia de un evento con una intensidad i .

C_e ... Representa el valor o coste del elemento expuesto e .

R_{ie} ... Representa el riesgo sísmico, entendido como la probabilidad que se presente un daño sobre el elemento expuesto e , como consecuencia de la ocurrencia de un evento con intensidad mayor o igual que i .

En este contexto, la *Vulnerabilidad Sísmica* se define como el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo, resultado de la probable ocurrencia de un evento sísmico desastroso. Es una propiedad intrínseca de la estructura, una característica de su comportamiento, que puede entenderse como la predisposición intrínseca de un elemento o grupo de elementos expuesto a ser afectado o ser susceptible a sufrir daño, ante la ocurrencia de un evento sísmico determinado. Una medida de los daños probables inducidos sobre edificaciones por los diferentes niveles de movimiento de suelos debidos a sismos, convencionalmente expresada en una escala que va desde 0 - sin daño, hasta 1 - pérdida total (OPS, 1993).

Estos conceptos están íntimamente relacionados entre sí y en ocasiones, tienden a confundirse o emplearse incorrectamente, por lo que es necesario puntualizarlos en todo momento.

4.3. NECESIDAD DE EVALUACIÓN

Con el fin de obtener estimaciones aceptables del riesgo sísmico es necesario evaluar la vulnerabilidad sísmica de los elementos expuestos. Esta condición es propia de cada edificación y su evaluación es un proceso complejo y laborioso. En el caso de edificaciones esenciales, las características de su ocupación, la especial importancia que tienen para afrontar situaciones de emergencia debido a sismos, el carácter vital y estratégico de la preservación de su funcionalidad, los elevados costos de reposición de daños y sobre todo para edificaciones de la salud, las características de su equipamiento y contenido, la alta dependencia de los servicios, las características de materiales y suministros utilizados, así como la complejidad de sus instalaciones, hacen que *dichas instalaciones sean especialmente vulnerables ante la acción de un sismo*.

La definición de vulnerabilidad sísmica lleva implícito términos genéricos como son la afectación y el daño, los cuales conviene sean acotados con el fin de garantizar una clara interpretación. La *afectación*, se refiere al nivel de perturbación funcional que puede sufrir una instalación y está directamente relacionada con la llamada *vulnerabilidad funcional*. El *daño*, se refiere al deterioro físico que pueden sufrir los diversos elementos de una edificación. Al nivel de deterioro que pueden sufrir estos elementos se conoce como *grado de daño* (Yépez, 1996) y generalmente se expresa en una escala que va desde 0 (sin daño), hasta 1 (pérdida total). Desde el punto de vista cualitativo, el daño sísmico puede ser de dos tipos; el daño estructural y el daño no estructural, dependiendo si el elemento en cuestión forma parte o no del sistema resistente de la edificación. Estos daños están respectivamente relacionados con la llamada *vulnerabilidad estructural* y *vulnerabilidad no estructural*.

Dependiendo de las características de uso de una edificación, cada uno de los tipos de vulnerabilidad mencionados tendrá una importancia relativa. Así por ejemplo, para edificaciones convencionales donde la filosofía de diseño sísmico tiene como objetivo fundamental, prevenir la pérdida de vidas humanas asociada al colapso de las edificaciones, la evaluación de la vulnerabilidad estructural se considera determinante y gobierna la toma de decisiones. En este caso, la evaluación de la vulnerabilidad no estructural es menos relevante y es prácticamente intrascendente la evaluación de la vulnerabilidad funcional.

Para edificaciones esenciales el planteamiento es totalmente diferente, ya que el carácter relevante de estas instalaciones, cuyo funcionamiento en condiciones de crisis sísmica es vital para afrontar la situación de emergencia, hace que tanto la vulnerabilidad funcional, como la no estructural y la estructural sean determinantes para la evaluación del riesgo sísmico.

4.4. ANALISIS DE VULNERABILIDAD

4.4.1. Vulnerabilidad Funcional

En situaciones de emergencia o crisis sísmicas, las edificaciones esenciales se caracterizan por presentar un incremento abrupto en la demanda de sus servicios, mientras que la capacidad de prestar dichos servicios puede haber decrecido como consecuencia del

impacto del sismo, creando una situación crítica caracterizada por un incremento brusco del riesgo asociado que puede inclusive llevar a un colapso funcional.

De hecho, la naturaleza de las edificaciones esenciales exige que ante una crisis sísmica, sus instalaciones o dependencias deben mantenerse en funcionamiento para atender las consecuencias inherentes al evento y la situación de emergencia planteada. Ello implica un incremento abrupto de la demanda de sus servicios respecto a los niveles de demanda existente en condiciones ordinarias, que debe estar en capacidad de atender independientemente de los daños físicos (estructurales y no estructurales) de los cuales puede ser objeto la edificación y que redundarán en una disminución de su capacidad operativa y funcional. Esta incapacidad de respuesta funcional sobreviene inmediatamente con la ocurrencia del evento sísmico y generalmente tiende a reducirse con el tiempo una vez superada la situación de crisis sísmica.

Para ilustrar esta situación, la Fig. 4.1., muestra la relación Demanda-Capacidad de prestar servicios típica para un hospital, antes y después de la ocurrencia de un sismo, donde se evidencia una situación crítica inmediatamente después de la ocurrencia del evento sísmico, que tiende a reducirse con el tiempo, una vez superada la situación de emergencia sísmica.

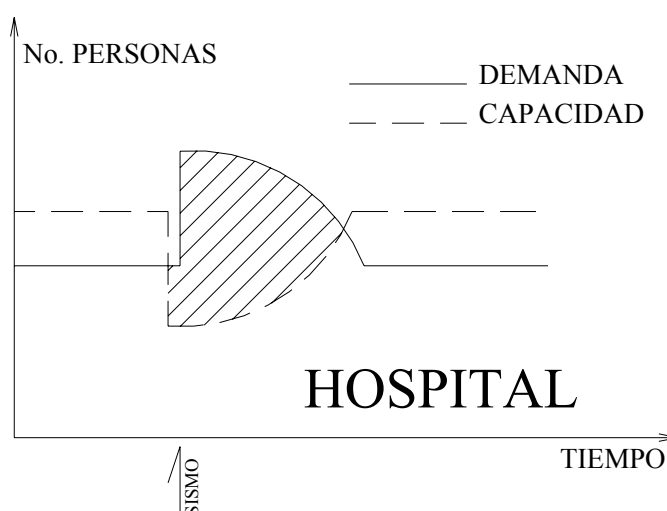


Fig. 4.1. Relación Demanda-Capacidad de prestar servicio de un hospital

El colapso funcional se produce cuando la instalación, aunque no haya sufrido ningún daño en su estructura física, se ve incapacitada de brindar los servicios inmediatos de atención de la emergencia sísmica y la posterior recuperación de la comunidad afectada (Guevara, 2000).

La vulnerabilidad funcional describe la predisposición de la instalación de ver perturbado su funcionamiento como consecuencia del incremento de la demanda de sus servicios. Son diversos los factores que pueden contribuir a incrementar el nivel de perturbación funcional, aumentando así la vulnerabilidad funcional de estas instalaciones (OPS, 1993), entre los que destacan:

- Una distribución inadecuada de las áreas de servicios, lo cual para edificaciones de la salud es determinante, si se tiene en cuenta que las mismas deben estar en capacidad de prestar atención masiva a pacientes.

- La ausencia de un probado plan de emergencia, que permita hacer frente a la crítica situación, sobre todo en lo referente al manejo de información.
- La dotación inapropiada de infraestructura, que permita atender las exigencias de la crisis sísmica.
- Una inadecuada distribución y relación entre espacios arquitectónicos, así como ineficientes sistemas de evacuación y vías de escape.
- Inapropiados sistemas de comunicación, señalización y vialidad de acceso.

En fin, debe prestarse atención a todos aquellos requerimiento que garanticen en mayor o menor grado, el mantenimiento de las condiciones de funcionalidad y utilidad ante un sismo, ya que por ejemplo los esquemas arquitectónicos de instalaciones sanitarias usualmente utilizados en los países occidentales, no incluyen dentro de sus lineamientos de diseño los aspectos funcionales necesarios para la atención de una crisis sísmica (Guevara, 2000). Para comprender mejor esta situación, conviene destacar que un hospital generalmente está compuesto por cinco áreas básicas, con funciones bien determinadas y propias pero a su vez, una con otras deben garantizar apropiadas interrelaciones vitales para su buen funcionamiento. Las relaciones entre dichas áreas (administración, servicios intermedios o ambulatorios, consulta externa y urgencia, servicios generales y hospitalización) pueden resultar críticas si en el diseño no se consideró su funcionamiento y distribución en el caso de atención masiva de pacientes (OPS, 1993) y más aún, puede conducir al colapso funcional del hospital como consecuencia de esta situación, lo cual es sólo detectado en el momento en el que ocurre una emergencia como la debida a un sismo. A las áreas antes señaladas es importante adicionarle una de especial utilidad en casos de desastres como son las áreas exteriores, que tradicionalmente juegan un rol de particular importancia en la atención de desastres.

Si bien éste parece un aspecto que escapa del alcance del técnico especializado en el diseño y parece más bien un aspecto responsabilidad del administrador de las instalaciones, lo cierto es que un estudio multidisciplinario permitiría garantizar una mayor eficiencia de la utilización del recurso, pues de muy poco servirá una instalación que sobrepase con éxito el impacto de un sismo desde el punto de vista estructural y no estructural, si desde el punto de vista funcional no es capaz de atender la demanda del servicio planteada por la situación de emergencia. En este sentido, cualquier programa para reducir la vulnerabilidad sísmica de edificaciones esenciales debe incluir además del estudio de los componentes estructurales y no estructurales, una adecuación que garantice la funcionalidad apropiada ante una crisis sísmica.

4.4.2. Vulnerabilidad No Estructural

La vulnerabilidad no estructural está asociada a la susceptibilidad de los elementos o componentes no estructurales de sufrir daño debido a un sismo, lo que se ha llamado *daño sísmico no estructural* (Cardona, 1999). El mismo comprende el deterioro físico de aquellos elementos o componentes que no forman parte integrante del sistema resistente o estructura de la edificación y que, como se ha visto en el capítulo anterior, pueden clasificarse en componentes arquitectónicos (tabiquerías, puertas, ventanas, plafones, etc.) y componentes

electromecánicos (ductos, canalizaciones, conexiones, equipos, etc.) que cumplen funciones importantes dentro de las instalaciones de la edificación (ATC-29-1, 1998).

La experiencia de sismos pasados ha puesto de manifiesto la importancia de la vulnerabilidad no estructural de las edificaciones. Quizás esta ha sido la principal lección aprendida de los terremotos de Loma Prieta y Northridge (Bertero, 1992), donde una gran cantidad de edificios diseñados y construidos de acuerdo a los códigos sísmicos vigentes se comportaron satisfactoriamente desde el punto de vista estructural, pero sufrieron importantes niveles de daños en componentes no estructurales que condujeron a pérdidas cuantiosas e incluso interrumpieron el funcionamiento de diversas edificaciones esenciales entre las que destacan varios hospitales, que se vieron obligados a cortar sus servicios y evacuar a los pacientes.

Se ha visto cómo la proporción de equipamiento y contenido, así como el impacto del fallo de los servicios sobre la funcionalidad, es determinante sobre todo en instalaciones de la salud. Por lo tanto, la preservación durante un sismo de los componentes no estructurales en las edificaciones esenciales es un aspecto vital, ya que ellos se relacionan directamente con el propósito y función de la instalación, definiendo de alguna manera su razón de ser. Paradójicamente, éstos componentes o elementos tienden a ser los que más fácilmente se ven afectados por los terremotos e igualmente los de más fácil y menos costosa readaptación y prevención de destrucción o afectación (OPS, 1993).

En definitiva, no es suficiente que las edificaciones no colapsen, sencillamente deben seguir funcionando durante la ocurrencia de cualquier tipo de terremoto, lo que nos alerta sobre la impostergable necesidad de revisar los criterios y filosofías de diseño de los códigos sísmicos, tanto para las edificaciones nuevas como para las existentes, a fin de garantizar un adecuado desempeño sísmico.

Desde el punto de vista práctico y del diseño convencional, conviene mencionar que la importancia de estos elementos no estructurales ha sido subestimada y en algunos casos, con severas implicaciones. Como muestra de ello, vale la pena destacar situaciones en donde algunos componentes no estructurales pueden incidir o propiciar la ocurrencia de fallos estructurales o pueden modificar significativamente la respuesta dinámica esperada en el diseño. Por ejemplo, la presencia de escaleras, elementos de mamposterías y pesados revestimientos, pueden alterar las propiedades dinámicas de la edificación, introduciendo excentricidades y otros efectos torsionales indeseables. La interacción entre los componentes no estructurales y los estructurales puede ser determinante, prueba de ello es el llamado efecto “columna corta” que tanto daño ha ocasionado y sigue ocasionando. La subestimación en los diseños de anclajes de equipos, la falta de control de los niveles de vibración tolerables de los mismos, la prevención de su volcamiento o desplazamiento, la inapropiada disposición de instalaciones y los efectos de los llamados elementos no intencionalmente estructurales, hacen que las sofisticadas técnicas de modelaje, análisis y diseño estructural y arquitectónico, sean en sí vulnerables y ponen de manifiesto la importancia de un apropiado sentido común y sensibilidad del profesional involucrado en el diseño.

El problema puede verse incrementado cuando las estructuras son intervenidas, modificadas, remodeladas y/o ampliadas, como suele suceder sobre todo en el caso de las edificaciones esenciales, cuyo nacimiento y crecimiento depende de innumerable condicionantes, propias de cada caso. Durante estos cambios, generalmente se pretende

crear nuevos espacios, modificando y/o añadiendo áreas, sin contemplar los efectos sobre los elementos estructurales durante un sismo. Se añaden nuevos equipos, se reubican instalaciones, interrumpiendo en algunos casos elementos estructurales, se modifican los patrones de carga y usos de ambientes, en fin, se modifica en general la vulnerabilidad sísmica de la edificación y en particular, la vulnerabilidad de sus componentes no estructurales (OPS, 1993).

4.4.3. Vulnerabilidad Estructural

La vulnerabilidad estructural está asociada a la susceptibilidad de los elementos o componentes estructurales de sufrir daño debido a un sismo, lo que se ha llamado *daño sísmico estructural*. El mismo comprende el deterioro físico de aquellos elementos o componentes que forman parte integrante del sistema resistente o estructura de la edificación y es el que tradicionalmente ha merecido la atención prioritaria de los investigadores.

El nivel de daño estructural que sufrirá una edificación depende tanto del comportamiento global como local de la estructura. Está relacionado con la calidad de los materiales empleados, las características de los elementos estructurales, su configuración, esquema resistente y obviamente, con las cargas actuantes. La naturaleza y grado de daño estructural pueden ser descritos en términos cualitativos o cuantitativos, y constituye un aspecto de primordial importancia para verificar el nivel de deterioro de una edificación, así como su situación relativa con respecto al colapso estructural, que representa una situación límite donde se compromete la estabilidad del sistema.

Desde el punto de vista cualitativo, normalmente se establecen diferentes niveles o descripciones de daño, cuya localización se fundamenta en la observación e identificación de deterioros característicos de los diversos elementos estructurales verificados después de la ocurrencia de un sismo.

El desarrollo de modelos de daño ha permitido evaluar el daño estructural desde un punto de vista cuantitativo, utilizando parámetros que representan la respuesta estructural tales como, distorsiones de piso, deformaciones de los elementos, demanda de ductilidad, energía disipada, etc. Mediante funcionales de estos parámetros, se obtienen los llamados indicadores de daño los cuales pueden considerarse como una medida representativa de la degradación estructural, tanto a nivel local como global de la estructura. Cuando estos indicadores son normalizados respecto un estado de fallo específico, se denominan índices de daño (Yépez, 1996). La cuantificación del daño es un problema complejo, sobre el que no existe un criterio unificado, razón por la cual existe una gran diversidad de modelos e índices de daños, que nacen de un intento de facilitar su aplicación a un gran número de tipologías de edificios y estructuras de diferentes características.

4.5. RESUMEN Y DISCUSIÓN

El conocimiento de la vulnerabilidad sísmica de los diversos elementos expuestos, constituye un elemento fundamental para la determinación del riesgo sísmico de una comunidad. En el caso de las edificaciones esenciales adquiere una relevancia especial, ya que en el marco del contexto de la atención de una emergencia sísmica, es determinante el papel que desempeñan las edificaciones esenciales. Se ha establecido que las consecuencias

de un evento sísmico generalmente están en proporción inversa al grado de preparación de la comunidad, que debe necesariamente empezar por conocer su propio nivel de riesgo y por ende el nivel de vulnerabilidad sísmica de sus edificaciones esenciales.

Las características de ocupación, la especial importancia que tienen para afrontar situaciones de emergencia debido a sismos, el carácter vital y estratégico de la preservación de su funcionalidad, los elevados costos de reposición de daños, las características de su equipamiento y contenido, la alta dependencia de los servicios, las características de materiales y suministros utilizados, así como la complejidad de sus instalaciones, no sólo hacen que las edificaciones esenciales sean especialmente vulnerables ante la acción de un sismo, sino que *la concepción de su vulnerabilidad sísmica debe contemplar aspectos físicos y funcionales*, capaces de poner de manifiesto los diversos niveles de afectación y daño de los que puede ser objeto. En este sentido, es necesario enfocar cualquier estudio de vulnerabilidad de edificaciones esenciales desde tres vertientes complementarias entre sí; *la vulnerabilidad funcional, no estructural y estructural*.

La vulnerabilidad funcional se relaciona con la capacidad de brindar los servicios inmediatos de atención de la emergencia sísmica y de posterior recuperación de la comunidad afectada, independientemente del nivel de daño físico que haya sufrido. La vulnerabilidad no estructural y la estructural, está asociada a la susceptibilidad de los elementos o componentes no estructurales y estructurales, de sufrir daño debido a un sismo. Su evaluación está dirigida a identificar el comportamiento dinámico ineficiente de las edificaciones y la predisposición de los componentes estructurales y no estructurales de sufrir daño como consecuencia de la ocurrencia de un sismo.

La ocurrencia de sismos importantes recientes ha permitido poner de manifiesto y ratificar las lecciones aprendidas en las últimas décadas en cuanto a las típicas deficiencias estructurales y no estructurales de las edificaciones, que predisponen un desempeño sísmico inapropiado a nivel local o global de la edificación, de manera que su identificación y la determinación de su naturaleza y extensión, representa un importante avance para la reducción de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones esenciales y la mitigación del riesgo sísmico de una comunidad.