

CONCLUSIONES

Este trabajo se dedica al estudio de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificaciones esenciales, orientado al análisis del sistema sanitario como paradigma de edificios y sistemas esenciales en caso de desastre. Se destaca la relevante función que las edificaciones esenciales desempeñan en la atención y gestión de la emergencia debido a sismos. Además se resalta la necesidad de crear un cuerpo de prescripciones específicas que permita adecuar las edificaciones existentes y construir las nuevas con requisitos compatibles a su nivel de importancia.

La memoria se estructura en tres partes. Una primera parte introductoria presenta los objetivos, motivación y alcance del estudio, así como los antecedentes y estado del arte sobre el comportamiento de edificaciones esenciales en crisis sísmicas y las principales iniciativas desarrolladas en el mundo orientadas a la mitigación del riesgo sísmico en este tipo de edificaciones.

Las principales conclusiones de esta parte introductoria son:

- La síntesis de daños observados en edificaciones esenciales ponen de manifiesto un balance *negativo* en su comportamiento sísmico, inclusive ante la acción de sismos moderados.
- La insuficiencia de las metodologías adoptadas en los códigos sísmicos vigentes para proteger este tipo de edificaciones.
- El estudio de la vulnerabilidad sísmica de los edificios esenciales debe abordarse desde un punto de vista global que considere la vulnerabilidad física (estructural y no estructural) y la vulnerabilidad funcional.

La segunda parte introduce los aspectos conceptuales y metodológicos involucrados en este tipo de estudio. Se introduce el concepto de edificaciones esenciales destacando sus principales características y elementos definitorios. Se analizan los métodos tradicionales de evaluación de la vulnerabilidad física, haciendo especial énfasis en la necesidad de incorporar los conceptos de vulnerabilidad no estructural y funcional. Se introduce la filosofía del diseño basado en el desempeño sísmico como una herramienta fundamental en la evaluación de las edificaciones esenciales y en las políticas de intervención de edificios cuya vulnerabilidad así lo aconseje. Se desarrollan las metodologías que permiten un análisis detallado del desempeño sísmico de edificaciones individuales particularizando los criterios aplicables a las edificaciones esenciales.

Asimismo, se introduce el concepto de sistema y la conveniencia de emplear el enfoque sistémico para el análisis de la respuesta de los sistemas esenciales. Se propone una estrategia general de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de los sistemas esenciales basado en el enfoque sistémico. Esta estrategia se particulariza para evaluar el desempeño sísmico del sistema sanitario regional, para lo cual se propone el uso de factores apropiados de respuesta del sistema y de los hospitales que permite establecer criterios de jerarquización, priorizando las necesidades de realizar estudios más refinados que justifiquen las medidas de intervención.

Los principales resultados y conclusiones de esta segunda parte del trabajo son:

- No existe una metodología específica para evaluar la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones esenciales, usándose los métodos de evaluación tradicionales desarrollados para edificios convencionales.
- Los estudios y trabajos sobre vulnerabilidad no estructural de edificaciones esenciales son pocos y aún menos, los que consideran la vulnerabilidad funcional. Asimismo, son limitados los estudios que consideran de manera integral a los sistemas esenciales y que reconocen la interacción entre sus diferentes elementos.
- La evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones esenciales debe incluir necesariamente los aspectos de la vulnerabilidad no estructural y, particularmente la vulnerabilidad funcional.
- Los conceptos de diseño basado en el desempeño sísmico constituye una herramienta conveniente para evaluar la capacidad de respuesta de las edificaciones esenciales, pues reconocen en cierta manera las exigencias estructurales, no estructurales y funcionales impuestas por este tipo de instalaciones.
- El análisis de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones esenciales y su contribución al riesgo sísmico debe abordarse desde un punto de vista sistémico, entendiendo como tal, la interacción de los diferentes elementos que lo constituyen, así como su interacción con otros sistemas esenciales y líneas vitales.
- Se propone una estrategia general de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de sistemas esenciales, basado en el enfoque sistémico, que persigue por vía de aproximaciones sucesivas racionalizar la toma de decisiones, jerarquizando y priorizando las necesidades de realizar estudios más refinados e implementar medidas de intervención.
- Se proponen una serie de criterios que permiten calificar las edificaciones esenciales de acuerdo con la importancia relativa de su función, el nivel de amenaza sísmica y el nivel de desempeño sísmico, que orientan sobre el nivel de evaluación requerido en cada edificación.
- Se presentan las bases de un modelo simplificado para la evaluación de la respuesta sísmica del sistema sanitario regional que permite la calificación del desempeño global del sistema y de cada uno de los hospitales que le integran.
- Se proponen factores de respuesta definidos específicamente para la cuantificación del desempeño sísmico del sistema sanitario regional y de cada uno de los hospitales que le integran.

La tercera parte desarrolla una aplicación realizada al sistema sanitario de Cataluña y sobre un hospital de Caracas, Venezuela. Se presentan los datos necesarios que permiten la caracterización del sistema sanitario de Cataluña y la demanda potencial de sus servicios, representados por los heridos potenciales en función de las características de la población y peligrosidad sísmica de Cataluña. Se evalúa la vulnerabilidad sísmica de los 64 hospitales que conforma la red de hospitales de utilización pública de Cataluña (XHUP) a través de métodos empíricos de categorización, describiendo su comportamiento sísmico esperado y un modelo de fragilidad de los hospitales.

Sobre la base de estos resultados se estudia la respuesta sísmica del sistema sanitario de Cataluña. Siguiendo la propuesta Coburn y Spence (1992), se realiza un estudio de escenarios sísmicos (históricos y simulados), un estudio de pérdidas potenciales y un análisis de riesgo. Todos estos resultados han sido presentados sobre mapas temáticos, que de manera complementaria, permiten calificar de manera global el desempeño sísmico del

sistema sanitario de Cataluña y de manera particular, el desempeño sísmico de cada uno de los hospitales que le integran.

Finalmente, se presenta a título de ejemplo, la aplicación realizada a nivel detallado sobre el Hospital Dr. Domingo Luciani (Caracas - Venezuela), de algunas de las técnicas de evaluación de la vulnerabilidad sísmica clasificadas dentro de los llamados métodos experimentales y métodos analíticos que deberían aplicarse a los hospitales de la XHUP de importancia relativa muy alta que presenten un desempeño sísmico insuficiente.

Los principales resultados y conclusiones de esta tercera parte del trabajo son:

1. En cuanto a la vulnerabilidad sísmica de los hospitales de Cataluña:

- Uno de los principales aportes del presente trabajo es que contiene elementos de inventario generales y detallados de todos y cada uno de los 64 hospitales de Cataluña que permiten caracterizar la capacidad instalada del sistema sanitario de la región.
- Se ha elaborado para cada hospital una ficha técnica que sintetiza los resultados de la evaluación de su vulnerabilidad sísmica a través del método empírico de categorización, sobre la base de tres criterios de clasificación de las edificaciones designados como ICC, EMS-98 y finalmente, el criterio adoptado.
- Los criterios de clasificación del ICC y EMS-98 definen diversas tipologías estructurales que asocian diferentes probabilidades a las mismas clases de vulnerabilidad definidas por la escala EMS. El criterio adoptado simplemente redistribuye la probabilidad de pertenencia a cada clase de vulnerabilidad de los criterios anteriores, en función de la valoración del autor en base a la información detallada disponible.
- Se califica el comportamiento sísmico de los hospitales de Cataluña en base a los estados de daño esperados como consecuencia de la ocurrencia de un evento sísmico que permita alcanzar en su emplazamiento, la máxima intensidad macrosísmica (I_{max}) establecida en el mapa de peligrosidad sísmica propuesto por el ICC.
- En base a los resultados obtenidos con el criterio de clasificación adoptado, se espera que 5 hospitales (~8%), no presenten ningún tipo de daño (comportamiento C1 – indemne), 41 hospitales (~64%), presenten daño limitado que les permita mantenerse operativo (comportamiento C2 – operativo), mientras que los 18 hospitales restantes (~28%), presenten un nivel de daño tal que limite su operatividad aunque se mantengan habitables (comportamiento C3 - no operativo / habitable). No se espera que ningún hospital requiera ser desalojado (comportamiento C4 - no operativo / no habitable).
- Los hospitales que experimentan un comportamiento inaceptable (comportamiento C3) se ubican principalmente en la región noreste de Cataluña y en la ciudad de Barcelona (ver Fig. 10.2).

2. En cuanto al estudio de escenarios históricos y simulados:

- Se constata que la capacidad de respuesta del sistema sanitario de Cataluña en caso de la ocurrencia de un evento sísmico es especialmente sensible a la ubicación del epicentro y la severidad del movimiento.
- Se espera el colapso total del sistema sanitario de Cataluña, en caso de repetirse un evento con las mismas características del sismo de *Ripollès* ocurrido el 02/02/1428 en *Camprodon* con una intensidad IX. Una situación similar se presentaría en caso de ocurrir un evento sísmico de intensidad VI con epicentro en la ciudad de Barcelona.

- Un evento sísmico en los alrededores de la ciudad de Barcelona o la franja costera vecina comprometería la capacidad de respuesta del sistema sanitario, debido principalmente al importante número de heridos esperados como consecuencia de la concentración de la población y los significativos niveles de vulnerabilidad existentes en la zona.
 - El condicionamiento del sistema sanitario de Cataluña es deficiente ante la ocurrencia de un evento sísmico significativo con epicentro en la región del Pirineo Aragonés, debido fundamentalmente a la baja capacidad instalada en la zona y las limitadas posibilidades de movilización de pacientes.
3. En cuanto al estudio de pérdidas potenciales:
- Para sismos frecuentes, asociados a un período medio de retorno de 75 años, no se esperan daños estructurales que comprometan a la población, ni al sistema sanitario de Cataluña, debido a la baja intensidad de los sismos asociados a este período medio de retorno, en las zonas sismogénicas involucradas.
 - Para sismos poco frecuentes, asociados a períodos medios de retorno $Tr \geq 500$ años, los efectos sobre la población son relevantes para epicentros ubicados hacia el norte y noroeste de Cataluña, debido principalmente a la severidad de los sismos esperados en las zonas sismogénicas involucradas. Asimismo, estos efectos son particularmente importantes para un sismo ubicado en la comarca de Barcelonés y sus alrededores, donde los heridos graves pueden sobrepasar el millar.
 - El número de camas perdidas debido a sismos poco frecuentes ($Tr \geq 500$ años) se incrementa significativamente para epicentros ubicados en las comarcas de Barcelonés y Gironés, debido principalmente a la alta concentración de hospitales relativamente vulnerables en las respectivas capitales de provincia, pudiendo sobrepasar el centenar.
 - Los tiempos máximos de atención de la emergencia debido a sismos poco frecuentes ($Tr \geq 500$ años) se incrementa significativamente para epicentros ubicados en la zona del Pirineo Aragonés, debido a los importantes recorridos que deben hacer los pacientes antes de recibir atención médica, pudiendo superar las dos horas.
 - La respuesta del sistema sanitario de Cataluña estará significativamente comprometida para sismos poco frecuentes ($Tr \geq 500$ años) con epicentros ubicados en las regiones norte, noroeste y este de Cataluña. En las regiones ubicadas hacia el norte y noroeste de Cataluña, debido fundamentalmente a la baja capacidad instalada en la zona y las limitadas posibilidades de movilización de pacientes a lo largo de la misma. En la región este, principalmente en los alrededores de la comarca de *Barcelonés* y la franja costera hacia el norte de Barcelona, debido fundamentalmente a los altos niveles de densidad de población que redundaría en un importante número de heridos graves. Especial atención merece la ocurrencia de un evento sísmico en las comarcas de *Barcelonés*, *Gironés* y la parte norte de *Val d'Aran*, donde el factor de respuesta del sistema puede superar el millar.
 - Los resultados del factor de respuesta normalizado evidencian que el condicionamiento del sistema sanitario de Cataluña es especialmente deficiente para atender las exigencias impuestas por un sismo poco frecuente ($Tr \geq 500$ años) en la Comarca de Val d'Aran, donde a pesar de esperarse relativamente pocos heridos, la baja capacidad instalada en la zona y las limitadas posibilidades de movilización de pacientes evidencian una limitada capacidad de atención sanitaria, con un factor de respuesta normalizado que puede sobrepasar el centenar. Por el contrario, a pesar de esperarse una importante concentración de heridos y de pérdida de camas, el condicionamiento del sistema sanitario de Cataluña para enfrentar las exigencias impuestas por un sismo poco

frecuente en la Comarca Barcelonés es relativamente aceptable, debido a los cortos tiempos de atención y la densidad de instalaciones hospitalarias de la zona.

4. En cuanto al desempeño sísmico de los hospitales de Cataluña obtenidos del análisis de riesgo:
 - Los resultados obtenidos permiten establecer una clasificación preliminar de los 64 hospitales de Cataluña, según la cual; 14 hospitales (22%) experimentarían un respuesta aceptable, 35 hospitales (55%) una respuesta intermedia y 15 hospitales (23%) una respuesta crítica.
 - Los hospitales de las regiones sanitarias de *Girona y Barcelones Nord i Maresme* son los que presentan el más bajo nivel de desempeño sísmico, seguidos de los hospitales de las regiones sanitarias de Barcelona Ciutat y Centre (ver Fig. 11.11). Sobre estos hospitales es necesario desarrollar estudios de vulnerabilidad más específicos de acuerdo con su importancia relativa.
 - Entre los hospitales de especial importancia que evidencian un desempeño sísmico inadecuado, destacan el Hospital *Prínceps d'Espanya*, el Hospital *General Vall d'Hebron* y el Hospital *Clínic i Provincial Barna*, todos de Barcelona, sobre los cuales es necesario desarrollar un estudio detallado de vulnerabilidad sísmica.

5. En cuanto al estudio detallado realizado sobre el Hospital Domingo Luciani (Caracas):
 - El diseño sísmico del hospital Dr. Domingo Luciani es satisfactorio pues cumple con los objetivos de diseño propuestos para edificaciones esenciales, manteniéndose dentro de los niveles de desempeño esperado para los diferentes niveles de la amenaza sísmica propios de su emplazamiento.
 - Destacar la importancia de integrar los métodos empíricos, experimentales y analíticos de evaluación de la vulnerabilidad sísmica, como vía para aumentar la confiabilidad de estos estudios. Se evidencia la conveniencia de apoyar el desarrollo de los modelos teórico-analíticos con los resultados de los estudios experimentales.
 - Se ilustra la posibilidad que tienen los llamados métodos de análisis estático no lineal, en particular, las técnicas de análisis *pushover* y del método del espectro de capacidad-demanda, como una alternativa simplificada y aproximada para predecir los niveles de respuesta máximos de la estructura ante la acción de movimientos sísmicos asociados a diferentes probabilidades de ocurrencia.