

# Capítulo 1

## Introducción

El fenómeno sísmico representa una de las manifestaciones más impactantes de la naturaleza. Las pérdidas de vidas humanas y la destrucción de las infraestructuras creadas por el hombre, demuestran el potencial devastador de este fenómeno. Así pues, la investigación del comportamiento de las estructuras frente a la acción sísmica, representa un objetivo permanente de la ingeniería sísmica (Dumova, 2000).

Las últimas catástrofes sísmicas han puesto en evidencia, una vez más, el mal funcionamiento de las estructuras existentes, y la necesidad de intervenir todas aquellas estructuras que han sido diseñadas con criterios de normativas antiguas, inadecuadas o aquellas que han sido construidas antes de la aparición de los códigos de diseño. El avance significativo en nuevos criterios de diseño sismorresistente, debe ser extendido a todas las estructuras existentes, para ello, es indispensable identificar su grado de vulnerabilidad sísmica. De igual forma, es necesario comprobar que las nuevas filosofías de diseño, proporcionan estructuras resistentes que permiten preservar las vidas humanas y que cumplen con los objetivos básicos de las normativas para los movimientos sísmicos de diseño considerados. De esta forma, se avanza en el campo preventivo, evitando catástrofes que dejan como resultado pérdidas incalculables e inaceptables tanto desde el punto de vista social como económico.

La evaluación del desempeño y la vulnerabilidad sísmica, supone el desarrollo de metodologías que puedan ser utilizadas de acuerdo a la información disponible en cada zona, lo cual, está estrechamente relacionado con el nivel de actividad sísmica. Adicionalmente, las metodologías deben considerar las incertidumbres en los parámetros sísmicos y estructurales, tanto para la definición del modelo de la acción sísmica como para el modelo utilizado para representar el comportamiento de la estructura, debido a la gran sensibilidad de los métodos ante estas variaciones.

En este trabajo, se evalúa el desempeño y la vulnerabilidad sísmica de edificios aporticados de hormigón armado y edificios de mampostería no reforzada, típicos de las ciudades de Manizales en Colombia y Barcelona en España, respectivamente. La ciudad de Manizales, está localizada en una zona con un elevado potencial sísmico y, adicionalmente, un gran porcentaje de las estructuras existentes, han sido diseñadas

y construidas sin ningún tipo de consideración sísmica. Por lo tanto, esta ciudad se encuentra expuesta a un riesgo sísmico considerable, el cual debe ser reducido mediante una evaluación apropiada tanto de la amenaza como de la vulnerabilidad sísmica de las principales tipologías existentes. En este caso, la metodología desarrollada para la evaluación del daño, incorpora la información instrumental disponible de la acción sísmica y la información correspondiente a las características propias de las tipologías estructurales.

En cuanto a la ciudad de Barcelona, ésta se encuentra localizada en una zona de sismicidad moderada, por lo tanto, dispone de escasa información instrumental. Adicionalmente, la mayoría de los edificios existentes, carecen de cualquier consideración de diseño sismorresistente, presentando un grado de vulnerabilidad alto. Así pues, para superar la ausencia de información y considerar las incertidumbres en los parámetros estructurales, la metodología desarrollada para esta zona de sismicidad moderada, utiliza la técnica de simulación por el método de Monte Carlo y algoritmos simplificados inéditos para la evaluación del daño. Como un primer paso hacia la evaluación de la vulnerabilidad y el desempeño sísmico de los edificios existentes en la ciudad, se han elegido los edificios de mampostería no reforzada del distrito de l'Eixample de Barcelona. Esta tipología es la más representativa de los edificios existentes en Barcelona y probablemente en gran parte del territorio Español y, adicionalmente, carece de cualquier tipo de consideración de diseño sismorresistente.

A partir del desarrollo de estas metodologías, se proponen expresiones simplificadas para la evaluación del daño de las tipologías analizadas, consistentes con la forma de definir la amenaza sísmica en las regiones donde están localizadas las estructuras. Estas expresiones son utilizadas para la generación de mapas de riesgo sísmico, para diferentes escenarios, los cuales permiten identificar posibles focos de concentración de daños y pueden ser utilizados directamente para desarrollar planes de prevención y atención de desastres en los entornos urbanos.

## 1.1 Objetivos y alcance del estudio

### 1.1.1 Motivación

El desarrollo de nuevas filosofías de diseño y el avance en el conocimiento del comportamiento dinámico de los edificios frente a la acción sísmica, debe ser utilizado para reducir el riesgo sísmico existente en los grandes centros urbanos, debido a que éstos albergan la mayor parte de la población mundial. Por lo general, son las nuevas construcciones las únicas que incorporan los avances en el diseño de estructuras, sin embargo, éstas representan un porcentaje ínfimo sobre el total de las estructuras existentes. Así pues, es indispensable desarrollar e implementar metodologías para la evaluación del desempeño, la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de estructuras existentes, que permitan identificar las fuentes y los posibles focos de concentración de daño, para que puedan adelantarse tareas de reforzamiento y rehabilitación de

estructuras, que permitan controlar y reducir el riesgo sísmico existente.

Por otra parte, el nivel de actividad sísmica de una zona y la cantidad de información disponible sobre las tipologías estructurales existentes, sugieren el desarrollo de metodologías adecuadas a las condiciones propias de la zona y que puedan superar las limitaciones en cuanto a información, mediante el uso de técnicas de simulación.

### 1.1.2 Objetivos

Para reducir el número de pérdidas de vidas humanas y las pérdidas asociadas con un posible fallo de las estructuras existentes debido a la acción sísmica, se requiere un conocimiento adecuado de su desempeño y vulnerabilidad sísmica. Por lo tanto, el objetivo principal de esta investigación, consiste en desarrollar e implementar una metodología para la evaluación del desempeño, la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de edificios, y una aplicación a dos tipologías estructurales típicas de los edificios existentes en los entornos urbanos: 1) los edificios aporricados de hormigón armado, ampliamente utilizados en zonas de sismicidad moderada y alta y 2) los edificios de mampostería no reforzada, que constituyen la gran mayoría de las estructuras antiguas existentes en zonas urbanas. Por otra parte, la metodología propuesta debe considerar el nivel de actividad sísmica de la zona, la información sísmica y estructural disponible, el nivel de diseño de las estructuras, las incertidumbres en los parámetros sísmicos y estructurales y los avances logrados en los procesos de análisis, modelación y simulación del comportamiento sísmico de estructuras.

El objetivo global de la tesis puede desglosarse en la consecución de los siguientes objetivos específicos:

- Describir los conceptos básicos y los principales métodos existentes para la evaluación de la vulnerabilidad y el daño sísmico de edificios.
- Presentar el marco conceptual de la nueva filosofía de diseño basada en el desempeño, así como los principales métodos simplificados utilizados para la evaluación del nivel de desempeño sísmico de edificios. Analizar las limitaciones y las diferencias en los resultados obtenidos al utilizar cada uno de estos métodos.
- Desarrollar e implementar una metodología para la generación de curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño, desde una óptica probabilista. Para ello se utiliza una avanzada herramienta computacional (PROMENVIR), que incorpora el proceso de simulación por el método de Monte Carlo.
- Proponer expresiones simplificadas que permitan una evaluación expedita de la distribución del daño global de los edificios aporricados de hormigón armado y mampostería no reforzada, que puedan ser implementadas en las normativas de diseño y en las reglamentaciones para la evaluación del riesgo sísmico.

- Analizar la respuesta dinámica no lineal de estructuras con y sin diseño sismorresistente, identificando las mejoras que se logran desde el punto de vista estructural, con la utilización de consideraciones de diseño sismorresistente.
- Generar mapas de daño sísmico mediante el uso de sistemas de información geográfica, para los escenarios sísmicos correspondientes a los diferentes tipos de representación de la demanda sísmica.
- Analizar la sensibilidad de los métodos utilizados para la evaluación del desempeño y la vulnerabilidad sísmica, con respecto a los siguientes factores: 1) las incertidumbres en las propiedades mecánicas de los materiales, 2) las variaciones en los parámetros que controlan la forma suavizada de los espectros de diseño y 3) las variaciones en la definición de los umbrales de los estados discretos de daño.
- Verificar el cumplimiento de los objetivos de desempeño propuestos en las normativas de diseño sismorresistente para el movimiento sísmico de diseño, de los edificios de hormigón armado típicos de la ciudad de Manizales y los edificios de mampostería no reforzada de l'Eixample en Barcelona, representativos de edificios situados respectivamente en zonas de actividad sísmica alta y moderada.
- Analizar la influencia del uso de espectros de respuesta suavizados para representar la demanda sísmica, en la evaluación del nivel de desempeño de edificios.

### 1.1.3 Alcance

Por lo tanto, el presente estudio desarrolla metodologías que pueden ser utilizadas para la evaluación del desempeño y la vulnerabilidad sísmica de edificios tanto en zonas de sismicidad alta como moderada. Estas metodologías consideran las incertidumbres en los parámetros sísmicos y estructurales, mediante la simulación por ordenador. En el caso de las zonas con una actividad sísmica alta, se considera la información de la aceleración sísmica registrada en la zona para la definición de la demanda sísmica.

Así pues, se desarrollan, a partir de estas metodologías, expresiones simples que pueden ser utilizadas para evaluar la distribución del daño global de edificios y que permiten generar mapas del daño sísmico en entornos urbanos, mediante el uso de sistemas de información geográfica. A partir de estos mapas, es posible identificar los sistemas estructurales con un desempeño deficiente y, por lo tanto, realizar estudios más detallados que permitan desarrollar técnicas de reforzamiento de estas estructuras, con el fin de garantizar su buen desempeño.

## 1.2 Contenido de la memoria

El contenido de la tesis se ha estructurado en tres partes; la *Parte I* está dividida en 5 capítulos, en los cuales se describen los conceptos y los principales métodos utilizados para la evaluación del desempeño, la vulnerabilidad y el daño sísmico de edificios. De forma que los lectores conocedores de estos aspectos conceptuales y metodológicos, pueden obviar esta parte. El capítulo 2, presenta una clasificación de las metodologías existentes para el análisis de la vulnerabilidad sísmica y una descripción de los principales aspectos relacionados con el daño sísmico, incluyendo los diferentes tipos de elementos propensos al daño, los tipos de representación y la clasificación de los índices y estados de daño. En el capítulo 3, se presenta el marco conceptual de la nueva filosofía de diseño basada en el desempeño sísmico. Se analizan y se comparan los principales métodos simplificados basados en el binomio capacidad-demanda, utilizados para evaluar el nivel de desempeño sísmico de edificios. El capítulo 4, se centra en los métodos utilizados para la generación de curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño. Se hace énfasis en dos metodologías; una probabilista utilizada para zonas de sismicidad alta y otra determinista para zonas de sismicidad moderada. Ambas serán utilizadas, en este trabajo, para generar las curvas de fragilidad de los edificios de hormigón armado típicos de la ciudad de Manizales y los edificios de mampostería no reforzada del distrito de l'Eixample en Barcelona, respectivamente. Para finalizar esta primera parte, en los capítulos 5 y 6 se describe el comportamiento sísmico de edificios aporticados de hormigón armado y edificios de mampostería no reforzada, respectivamente. Se analizan los principales conceptos relacionados con las propiedades mecánicas de los materiales, su comportamiento ante los principales estados de esfuerzos tensionales y ante cargas cíclicas. Adicionalmente, se presenta una descripción de los principales mecanismos de fallo observados durante los movimientos sísmicos.

La *Parte II* está dividida en tres capítulos, que corresponden a la aplicación de las metodologías desarrolladas en la primera parte, para la evaluación del desempeño y la vulnerabilidad sísmica de los edificios aporticados de hormigón armado típicos de la ciudad de Manizales en Colombia. En el capítulo 7, se describe la ciudad y la amenaza sísmica de acuerdo a los estudios de zonificación sísmica realizados en el país. Adicionalmente, se presenta un modelo estocástico de la acción sísmica, desarrollado por Hurtado (1999) a partir de acelerogramas registrados en la zona. Se define la demanda sísmica utilizando los espectros de diseño propuestos por las normativas Colombianas (Código de Construcciones Sismo Resistente de 1984, CCCSR-84, y las actuales Normas Colombianas de Diseño Sismorresistente de 1998, NSR-98) y los espectros de respuesta de los acelerogramas sintéticos generados a partir del modelo estocástico. En el capítulo 8, se presenta una descripción de la evolución de las construcciones en la ciudad de Manizales, destacando las tipologías más importantes. Se definen los modelos estructurales que representan los edificios aporticados de hormigón armado y se evalúa su capacidad sísmica, mediante

un análisis estático no lineal. El capítulo 9 corresponde a la evaluación del desempeño y la vulnerabilidad sísmica de los modelos más representativos. Se obtiene la distribución del daño global de estos edificios para los tres escenarios sísmicos considerados (espectro de diseño del CCCSR-84, espectro de diseño de la NSR-98 y espectros de respuesta de los acelerogramas locales) y se determinan los parámetros característicos de la función de distribución lognormal de daño. Adicionalmente, se analiza la influencia de la forma suavizada (poco realista) de los espectros de diseño utilizados para representar la demanda sísmica, en la determinación del nivel de desempeño de los edificios de la ciudad de Manizales.

La *Parte III* también está compuesta por tres capítulos, con una distribución paralela a la utilizada en la *Parte II*, pero en este caso, las metodologías desarrolladas para la evaluación del desempeño y la vulnerabilidad sísmica, se aplican a los edificios de mampostería no reforzada representativos del distrito de l'Eixample en Barcelona. En el capítulo 10 se presenta una descripción de la ciudad, la amenaza sísmica existente y la forma como se caracteriza la demanda sísmica. Se presentan los mapas de zonificación sísmica de la ciudad y los mapas de amenaza sísmica propuestos recientemente por el Instituto Cartográfico de Cataluña. El capítulo 11 se centra en la descripción del sistema constructivo utilizado para los edificios de mampostería no reforzada de l'Eixample. Se presentan los modelos estructurales utilizados para representar estos edificios y el procedimiento para el cálculo de sus espectros de capacidad. En el capítulo 12, se evalúa el punto de desempeño y se generan las curvas de fragilidad y las matrices de probabilidad de daño de cada uno de los modelos. A partir de esta información, se generan finalmente los mapas de daño sísmico, para tres tipos de escenarios: la demanda correspondiente a la Norma de Construcción Sísmica Española (NCSE-02) y unos espectros de respuesta suavizados propuestos por el Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC) a partir de dos metodologías: una determinista y otra probabilista. Se realiza un análisis de sensibilidad de la influencia de los parámetros que controlan la forma suavizada de los espectros de respuesta sobre la determinación del nivel de desempeño de los edificios de l'Eixample.

Finalmente, en el capítulo 13 se presentan las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo.