

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

Los terremotos son fenómenos naturales inevitables, cuya acción es capaz de producir catástrofes y por lo tanto, deben ser considerados en el momento de proyectar estructuras. El comportamiento sísmico inadecuado de las estructuras es la causa principal de pérdidas humanas y económicas. Durante el siglo XX han ocurrido en el mundo más de un millar de terremotos fuertes, que han dejado más de un millón de víctimas. Los países con un alto riesgo sísmico y buen desarrollo económico, como por ejemplo Estados Unidos y Japón, llevan a cabo una serie de estudios para mejorar el diseño sismorresistente de estructuras nuevas (edificios, autopistas, puentes, etc.) y para desarrollar técnicas de reparación y rehabilitación de estructuras con un alto riesgo sísmico. Básicamente, los avances que se realizan en el diseño de estructuras se aplican a las estructuras nuevas y, en menor medida, a la rehabilitación de estructuras existentes. A pesar de que el número de edificaciones existentes es mucho más grande que las estructuras nuevas.

Para que las estructuras tengan un buen comportamiento frente a sismos fuertes es necesario diseñarlas para que resistan niveles de deformación más

altos que los límites elásticos. En la actualidad se definen dos niveles o estados límites de diseño en el proyecto, en el primero, para sismos moderados, las estructuras no deben sufrir daños importantes que impidan su adecuado uso y en el segundo, para sismos severos, no debe ocurrir el colapso. Estos dos estados se suelen reconocer como estado límite de control de daño y estado límite de no colapso o de supervivencia, respectivamente. Paulay y Priestley (1992) definen también un estado límite de servicio en el que no debe producirse daño en la estructura, se debe asegurar la suficiente rigidez limitando los desplazamientos, y la estructura se debe mantener en el rango elástico.

Para reducir el número de víctimas es necesario mejorar el diseño sísmico en las estructuras nuevas así como el comportamiento de las estructuras antiguas. En zonas de sismicidad moderada o baja es frecuente que las construcciones no incluyan ningún tipo de análisis o diseño antisísmico, debido a que las normativas no suelen obligar a ello o que no existían en el momento de su construcción o, sencillamente, que la población no reconoce el evento sísmico como un factor de riesgo para su comunidad. La falta de organización institucional y comunitaria para situaciones de emergencia contribuyen a un mayor riesgo.

Al no aplicar ningún tipo de comprobación o diseño antisísmico, la fragilidad y vulnerabilidad de las construcciones es alta y al combinarlo con la peligrosidad del sitio resulta un riesgo sísmico no despreciable.

En zonas de sismicidad moderada o baja, un sismo puede producir daños considerables, debido a que existe un gran porcentaje de edificios construidos sin considerar una normativa sismorresistente y/o son edificios con poca ductilidad, esto no es solamente exclusivo en estas zonas, sino también en zonas con una actividad sísmica alta.

Para poder reducir el número de pérdidas humanas y económicas hay que comenzar por realizar estudios de vulnerabilidad sísmica y alertar a las autoridades gubernamentales para que tomen medidas de precaución y seguridad

sobre la amenaza sísmica existente.

Si en un área determinada se desea disponer de medidas de mitigación de riesgo sísmico, se debe realizar una evaluación adecuada de las posibles pérdidas (humanitarias y económicas) que se puedan producir a causa de un evento sísmico. Para esto se requiere de alguna metodología que permita evaluar la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de forma fiable. Cuando se realiza un análisis de este tipo se debe disponer de una amplia información, que muchas veces no se tiene y, además, existe una gran cantidad de incertidumbres involucradas, por lo tanto el tratamiento adecuado del problema es el probabilista.

La evaluación de la vulnerabilidad o el riesgo sísmico en zonas urbanas, se basa en el análisis de posibles escenarios de daño. Para esto, existen varios métodos, muchos de los cuales resultan muy costosos, tanto a nivel monetario, como computacional. Algunas ciudades recurren a métodos más simplificados que, además de reducir los costos, permiten obtener unos resultados adecuados.

La base fundamental de los estudios de riesgo sísmico, a nivel estructural, es disponer de una amplia información sobre los elementos con los que se pretende trabajar para evaluar la vulnerabilidad sísmica y, a partir de aquí, calcular el daño probable que se pueda sufrir a causa de un sismo. En los estudios de riesgo sísmico existen dos grupos de metodologías que requieren de información muy variable, estas son las específicas y las urbanas (Mena, 2002).

Metodologías específicas: en el caso de realizar un análisis estructural estático o dinámico de un edificio, se necesita disponer de la información estructural, correspondiente a las dimensiones en planta, en alzado y de las secciones, la cantidad de armadura de los elementos estructurales, las características generales de los materiales, etc. También se necesita conocer la acción sísmica a la que se someterá el edificio para determinar su comportamiento (espectros de

respuesta, fuerzas laterales equivalentes, acelerogramas reales o artificiales). Con toda esta información y con el uso de un programa de análisis lineal y no lineal se puede obtener una buena aproximación del comportamiento del edificio.

Metodologías urbanas: en el caso de realizar estudios a gran escala, a nivel urbano, se necesita otro tipo de información como conocer la configuración en planta y en elevación, el tipo de cimentación, el estado de conservación de los elementos estructurales y no estructurales, el año de construcción, etc. Estas metodologías no permiten conocer el comportamiento de un edificio en particular, pero pueden dar resultados que formen parte de un contexto amplio como, manzanas, barrios, distritos, etc. Los resultados también se pueden utilizar para identificar las estructuras con mayor riesgo, para luego realizar un estudio más detallado.

En este trabajo se optó por una metodología específica para estudiar de forma probabilista el riesgo sísmico, en el caso de Barcelona, España. El procedimiento no es sencillo debido a la diversidad de información necesaria para llevar a cabo este tipo de estudio y, además, involucra muchas incertidumbres tanto en los parámetros estructurales como en los sísmicos.

Durante el avance de esta tesis, se ha estado desarrollando, simultáneamente y bajo el auspicio de la Comunidad Europea, un proyecto europeo importante e interesante, el cual se basa en el desarrollo y creación de una metodología general y modular para la evaluación de escenarios sísmicos para Europa, teniendo en cuenta los diferentes niveles de sismicidad y las características estructurales de siete ciudades europeas. Es una metodología similar a la metodología HAZUS implementada en los Estados Unidos.

Este proyecto llamado RISK-UE, parte con la creación de un inventario que permita identificar las tipologías de las construcciones con sus particularidades estructurales. Considerando los principales puntos débiles de las construcciones, particularmente para el patrimonio histórico. En este proyecto,

el desarrollo de la metodología y la evaluación del riesgo sísmico, ha contemplado la participación de varios equipos de trabajo de las siete ciudades europeas seleccionadas: Barcelona (España), Bitola (Macedonia), Bucarest (Rumanía), Catania (Italia), Niza (Francia), Sofía (Bulgaria) y Tesalónica (Grecia).

En este trabajo se realiza un estudio de vulnerabilidad y riesgo sísmico de los edificios de la ciudad de Barcelona. En esta ciudad, durante los últimos 12 años se han llevado a cabo una serie de estudios de riesgo sísmico por diferentes instituciones e investigadores. Entre estas instituciones se encuentra la Universidad Politécnica de Cataluña, el Instituto Cartográfico de Cataluña y el Ayuntamiento de Barcelona y entre los trabajos realizados por investigadores, se encuentran Caicedo (1993), Yépez (1996), Mañà (1997), Chávez (1998), Cid (1998), Mena (2002), Safina (2002), Bonett (2003), Irizarry et al. (2003), Moreno et al. (2003)a, b, Irizarry (2004), Secanell et al. (2004), Lantada et al. (2004), Moreno et al. (2004)a, b. Barcelona está situada en una zona de sismicidad moderada a baja y muchas de sus estructuras no incluyen diseño antisísmico. Los edificios analizados corresponden a las dos tipologías más representativas de la ciudad de Barcelona, edificios de hormigón armado con forjados reticulares y de obra de fábrica de ladrillo (conocidos también como edificios de mampostería no reforzada).

En este trabajo se presenta una metodología que contempla la modelización de edificios para evaluar el daño sísmico mediante técnicas de evaluación basadas en el desempeño sísmico. A partir de la evaluación del daño sísmico en las tipologías estudiadas, se pueden generar mapas de riesgo sísmico, los cuales se pueden utilizar para desarrollar planes de emergencia y prevención de desastres en zonas urbanas, en especial para Barcelona. Estos mapas de riesgo sísmico también son útiles para identificar dónde se concentran los diferentes tipos de daño.

En este trabajo, el estudio correspondiente a la vulnerabilidad y riesgo sísmico de las estructuras de obra de fábrica de ladrillo, existentes en el distrito del

“Eixample” de Barcelona, se ha llevado a cabo durante una estancia hecha en la Universidad de Génova, Italia, bajo la supervisión del Profesor Sergio Lagomarsino.

1.2. Objetivos

Una gran parte de la población mundial viven en edificios residenciales situados en zonas de sismicidad moderada, muchas de esas estructuras, debido a la edad de construcción, no incluyen diseño sismorresistente, en el caso de los edificios nuevos que no incluyen un diseño antisísmico, puede ser que no exista una normativa de obligado cumplimiento.

El objetivo principal de esta tesis es el desarrollo de espectros de capacidad y curvas de fragilidad para la evaluación del riesgo sísmico de los edificios típicos de Barcelona, especialmente para los de hormigón armado. Esto hará posible la obtención de matrices de probabilidad de daño para diferentes escenarios sísmicos.

De aquí se desglosan una serie de objetivos específicos que consisten en:

- Implementar, paso a paso, una metodología basada en un análisis sísmico estructural, para evaluar la vulnerabilidad y el riesgo sísmico en edificios, por medio de curvas de capacidad y de fragilidad, y matrices de probabilidad de daño. Esta metodología se desarrolla en el capítulo 4.
- Evaluar una metodología simplificada de obtención de los umbrales de los estados de daño.
Se ha efectuado una propuesta alternativa para la evaluación de los estados de daño considerando las características de la curva de capacidad. Esta propuesta de los estados de daño se define en el capítulo 5.
- Aplicar la metodología implementada en el capítulo 4 para evaluar

el comportamiento sísmico de los edificios de hormigón armado con forjados reticulares existentes en Barcelona, considerando los propios espectros de respuesta de la ciudad. Esta evaluación se presenta en el capítulo 6 y, además, formó parte de los resultados del proyecto RISK-UE.

- Evaluar el comportamiento sísmico de los edificios de obra de fábrica de ladrillo, incorporando aspectos específicos de los edificios típicos de la ciudad de Barcelona. Una evaluación detallada de diferentes edificios se presenta en el capítulo 7.
- Evaluar el comportamiento sísmico de los edificios de hormigón armado teniendo en cuenta la influencia de las paredes de relleno en el daño sísmico.
Esta evaluación se realiza dentro del capítulo 8.
- Observar mediante análisis dinámico no lineal la fiabilidad de la metodología empleada en este trabajo. Este estudio se aplicó en el capítulo 8, en dos de los edificios de hormigón armado estudiados.
- Incorporación de los resultados obtenidos al estudio de riesgo sísmico global de la ciudad.

1.3. Metodología

En este trabajo se define y aplica una metodología para la evaluación del riesgo sísmico de edificios. El procedimiento analítico seguido en este estudio se describe brevemente a continuación: 1) se evalúa la capacidad estructural. 2) se define la acción sísmica de entrada. 3) se plantea el procedimiento analítico para determinar la respuesta estructural, éste puede ser por medio de un análisis no lineal estático y/o dinámico. El análisis no lineal estático está basado en espectros inelásticos y el análisis no lineal dinámico está basado en un grupo de acelerogramas artificiales. 4) se determinan las curvas

de fragilidad, las cuales son funciones que representan la probabilidad de que la respuesta de un sistema estructural exceda un estado límite bajo una excitación sísmica. 5) se caracteriza la respuesta estructural y sus valores límites para conocer la cantidad de daño. 6) finalmente, se construyen las matrices de probabilidad de daño, las cuales son la base para construir los escenarios de riesgo sísmico.

1.4. Contenido de la memoria

El desarrollo del presente trabajo está estructurado en nueve capítulos; el primer capítulo presenta una breve introducción descriptiva del estudio, los objetivos del trabajo y alcance de los mismos; así como también se destaca el contenido de la memoria.

En el Capítulo 2 se efectúa una recopilación de información, relacionada con el contenido de esta investigación sobre los estudios realizados por otros investigadores. Así como también se describen los conceptos básicos y los principales métodos utilizados para la evaluación de la fragilidad y riesgo sísmico de edificios existentes.

En el Capítulo 3 se hace referencia a la acción sísmica. En él se presentan, de manera introductoria, y muy brevemente, técnicas de obtención de acelerogramas artificiales. También, se describen y presentan los espectros de respuesta propuestos por la norma sísmica española, por el código europeo y por el Instituto Cartográfico de Cataluña, considerando diferentes tipos de suelos. Adicionalmente, se describe el procedimiento utilizado en la simulación de movimientos sísmicos para la generación de un grupo de acelerogramas artificiales, teniendo en cuenta ciertas variaciones tales como, la duración del sismo y la máxima aceleración pico, entre otros.

En el Capítulo 4 se presenta la metodología para la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de edificios, de hormigón armado y de obra

de fábrica de ladrillo existentes en Barcelona, por medio de curvas de fragilidad. La metodología tiene varios pasos e incluye la modelización y el análisis no lineal. No existe un método general para determinar las curvas de fragilidad. Las curvas de fragilidad pueden ser generadas mediante una evaluación empírica y mediante una evaluación analítica. La primera se basa en los daños observados después de producirse un sismo real, mientras que la segunda se basa en un análisis numérico, donde se predice la respuesta sísmica del edificio.

En el Capítulo 5 se presentan los umbrales de los estados de daño. Aquí se realiza un análisis de sensibilidad de los estados de daño descritos en el capítulo 4 y, además, se presenta una nueva propuesta de evaluación de los umbrales de daño, a partir de un análisis estático no lineal, finalmente se realiza una comparación y aplicación de los estados de daño definidos en el capítulo 4 y los propuestos en este capítulo.

En los tres capítulos siguientes se aplica la metodología descrita en el capítulo 4, a dos tipologías de edificios representativos y ampliamente existentes en Barcelona. Las dos tipologías evaluadas corresponden a edificios de hormigón armado con forjados reticulares y a edificios de obra de fábrica de ladrillo (conocidos también como edificios de mampostería) no reforzada. A partir de datos reales, la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de un grupo de edificios representativos de la ciudad de Barcelona se evalúa por medio de curvas de fragilidad. En el Capítulo 6 se presenta un estudio completo de riesgo sísmico en edificios de hormigón armado con forjados reticulares, típicos en las nuevas construcciones de Barcelona. La acción sísmica considerada en este estudio corresponde a espectros de respuesta específicos para la ciudad de Barcelona. El Capítulo 7 se dedica al estudio de la vulnerabilidad y riesgo sísmico en edificios de obra de fábrica. Estos edificios representan a los edificios de obra de fábrica de ladrillo del distrito “Eixample” de Barcelona. El riesgo sísmico es evaluado por medio de curvas de fragilidad, las cuales son obtenidas mediante un análisis estático no lineal. Además, se realiza una

evaluación global de un conjunto de edificios agregados de obra de fábrica. Los resultados obtenidos son presentados por medio de curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño. En el Capítulo 8 se presentan otras consideraciones sobre el comportamiento sísmico de edificios de hormigón armado. Los edificios analizados representan a las estructuras de Barcelona y de España en general. La vulnerabilidad sísmica es evaluada mediante un análisis estático no lineal y, en algunos casos, por medio de un análisis dinámico no lineal. Los resultados obtenidos con ambos análisis han sido comparados, con la finalidad de validar los resultados correspondientes al análisis estático no lineal. Se realiza un estudio considerando la influencia de las paredes de relleno en la respuesta global de las estructuras. Los resultados son presentados en tablas y figuras, mediante curvas de fragilidad, matrices de probabilidad de daño e histogramas de daño.

A partir de los resultados obtenidos en los capítulos 6, 7 y 8, se pueden obtener diferentes escenarios de daño para las dos tipologías de edificios más frecuentes existentes de Barcelona.

Finalmente, en el Capítulo 9 se presentan las conclusiones obtenidas de este estudio y las futuras líneas de investigación. A continuación, también se presentan las referencias citadas de los capítulos anteriores y los anexos. En los anexos se encuentra la descripción de la ciudad de Barcelona, el sistema constructivo, la amenaza sísmica de la ciudad, la información utilizada para desarrollar esta tesis y una breve descripción de los programas utilizados.

1.5. Aportaciones

Son aportaciones originales de esta tesis la forma de aplicación de la metodología descrita en el capítulo 4 para evaluar la vulnerabilidad y el riesgo sísmico en edificios; la propuesta de unos umbrales de estados de daño teniendo en cuenta las características de una curva de capacidad. La evaluación

y aplicación a sistemas constructivos típicos de Barcelona. Las matrices de probabilidad de daño obtenidas del análisis para edificios de hormigón armado con forjados reticulares y de obra de fábrica de ladrillo. Los resultados obtenidos de la evaluación en un conjunto de edificios de obra de fábrica de ladrillo de una manzana típica del “Eixample”. Para la evaluación de este trabajo se ha utilizado información detallada y planos estructurales de edificios reales que han sido utilizados como modelos representativos de los edificios de hormigón armado y de obra de fábrica de Barcelona.

