

VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICIOS EXISTENTES, APLICACIÓN A CATALUÑA.

¹César Caicedo, ¹José A. Canas, ¹Alex Barbat, ²Antoni Roca, ²Xavier Goula, ^{1,3}Fructuos Mañá.

¹Universidad Politécnica de Cataluña. ²Servei Geologic, Generalitat de Catalunya. ³Colegio de Arquitectos de Catalunya ESPAÑA.

RESUMEN

Se presenta un método para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificios en zonas urbanas y su adaptación a un sistema informático automatizado. Esta metodología se ha aplicado, en una primera fase, a un caso hipotético producto de una simulación y a continuación se procederá a su aplicación experimental a una porción de la ciudad de Barcelona. La utilización extensiva de este método permitirá en un futuro derivar conclusiones importantes sobre el riesgo sísmico y las posibles medidas para su reducción.

INTRODUCCIÓN

La principal importancia de los estudios de vulnerabilidad, consiste en ser éste uno de los factores determinantes del riesgo sísmico. Las definiciones relacionadas con este tema que más se aceptan hoy en día son las propuestas por la UN-DRO en 1979 [1], en las que

Vulnerabilidad de una estructura o grupo de estructuras se define como el grado de daño que resulta por la ocurrencia de un movimiento sísmico del terreno, de una intensidad determinada.

Peligrosidad se define como la probabilidad de ocurrencia, dentro de un período específico de tiempo y dentro de un área dada, de un movimiento sísmico del terreno de una intensidad determinada.

Riesgo específico se define como la probabilidad de que una estructura o grupo de estructuras

sufra varios grados de daño, durante un período de tiempo determinado. El riesgo específico S para un período de tiempo dado, se calcula mediante la convolución entre las probabilidades de ocurrencia de todas las intensidades posibles para el movimiento del terreno durante ese período, es decir de la peligrosidad sísmica H , con la vulnerabilidad de la estructura V para cada una de dichas intensidades:

$$S = H \times V \quad (1)$$

De la ecuación 1 se puede deducir que, para la reducción del riesgo específico, existen básicamente dos alternativas. La primera, consiste en ubicar las estructuras en sitios de baja peligrosidad, lo cual es viable únicamente para las estructuras que se van a construir y puede llevarse a cabo mediante una planificación física y urbana adecuada, con la ayuda de estudios de microzonación. La segunda, consiste en modificar la propia vulnerabilidad de las estructuras.

La reducción de la vulnerabilidad sísmica, de estructuras que se van a construir, puede efectuarse mediante:

- El mejoramiento de los códigos de construcción sísmo-resistentes.
- La supervisión estricta de los procedimientos de construcción.

Por el contrario, la reducción de la vulnerabilidad sísmica de estructuras existentes, puede efectuarse mediante el reforzamiento de las estructuras inadecuadas y, en casos de estructuras alta-

mente peligrosas en las que esta medida no sea suficiente, su demolición.

Para tomar las medidas adecuadas es obvio que primero se deben identificar, dentro de una zona urbana, los edificios sísmicamente deficientes. Es aquí donde se deduce que la importancia de los estudios de vulnerabilidad no reside únicamente en que son indispensables para la determinación del riesgo sísmico, sino también en que constituyen una herramienta clave para los planes de mitigación de desastres. Por ejemplo, una entidad puede estar interesada en conocer la condición actual de las edificaciones de una ciudad, con el objetivo de prever anticipadamente las consecuencias negativas (económicas y sociales), que la ocurrencia de un sismo de una determinada magnitud puede generar en la zona y, de esta forma, determinar las medidas necesarias para su mitigación. También puede interesar un análisis de costo-beneficio, en el que se comparan el costo para el reforzamiento de las estructuras más precarias con el costo de reconstrucción de las mismas, luego de ocurrido un terremoto.

En principio, la evaluación de la vulnerabilidad puede venir del análisis mediante modelos numéricos del daño sísmico de estructuras, de la inspección de edificios existentes o de pruebas en laboratorio. Es aquí donde se hace necesario distinguir entre la **vulnerabilidad observada**, que significa la vulnerabilidad que ha sido derivada de la observación de los daños posteriores a un terremoto y del análisis estadístico de los mismos para algún tipo definido de estructura y la **vulnerabilidad calculada**, que significa la vulnerabilidad que ha sido derivada de un análisis matemático mediante un modelo estructural o mediante ensayos en el laboratorio de modelos reducidos y cuyos resultados han sido expresados en términos probabilísticos [2]. En este sentido, el método utilizado en el presente estudio se enmarca dentro de la vulnerabilidad observada y se describe a continuación.

EL MÉTODO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD

El análisis del comportamiento de edificios, durante terremotos ocurridos desde el año 1976 en diferentes regiones de Italia, ha permitido a los investigadores de este país determinar algunos de los parámetros más importantes que controlan el daño. Estos parámetros han sido compilados en un formato de levantamiento, que se viene utilizando en Italia desde el año 1982, con el propósito de determinar de una forma rápida y sencilla la vulnerabilidad sísmica de los edificios existentes. La combinación de dichos parámetros por medio de una escala predefinida, en un único valor numérico llamado **índice de vulnerabilidad**, el cual describe de alguna forma la capacidad sísmica de una estructura, es lo que se conoce hoy en día como el método del índice de vulnerabilidad [3]. Este método ha sido ampliamente utilizado en Italia durante los últimos diez años y su gran aceptación ha quedado demostrada por el GNDT (Gruppo Nazionale per la Difesa dei Terremoti) que lo ha adoptado para los planes de mitigación de desastres a nivel gubernamental. Esto ha permitido la evolución del método, como resultado de la experimentación durante todos esos años y la obtención de una extensa base de datos sobre daño y vulnerabilidad.

De acuerdo con la escala de vulnerabilidad de Benedetti-Petrini [4], el índice de vulnerabilidad de cada edificio se obtiene mediante una suma ponderada de los valores numéricos que expresan la "calidad sísmica" de cada uno de los parámetros estructurales y no estructurales que, se considera, juegan un papel importante en el comportamiento sísmico de las estructuras de mampostería. A cada parámetro se le atribuye durante las investigaciones de campo, una de las cuatro clases A,B,C,D siguiendo una serie de instrucciones detalladas, con el propósito de minimizar las diferencias de apreciación entre los observadores. A cada una de estas clases le corresponde un valor numérico K_i que varía entre 0 y 45, como se observa en la tabla 1. Así, por ejemplo, si el parámetro número cuatro "posición del edificio y de la fundación" corresponde a una configuración insegura desde el punto de vista sísmico, se le asigna la clase D y el valor numérico $K_4 = 45$.

Parámetros	Clase K_i				Peso W_i
	A	B	C	D	
1 Organización del sistema resistente	0	5	20	45	1.0
2 Calidad del sistema resistente	0	5	25	45	0.25
3 Resistencia convencional	0	5	25	45	1.5
4 Posición edificio y cimentación	0	5	25	45	0.75
5 Diafragmas horizontales	0	5	15	45	1.0
6 Configuración en planta	0	5	25	45	0.5
7 Configuración en elevación	0	5	25	45	1.0
8 Distancia máxima entre los muros	0	5	25	45	0.25
9 Tipo de cubierta	0	15	25	45	1.0
10 Elementos no estructurales	0	0	25	45	0.25
11 Estado de conservación	0	5	25	45	1.0

Tabla 1. Escala de vulnerabilidad de Benedetti-Petrini.

Por otra parte, cada parámetro es afectado por un factor de peso W_i , que varía entre 0.25 y 1.5. Este coeficiente refleja la importancia de cada uno de los parámetros, dentro del sistema resistente del edificio. De esta forma, el índice de vulnerabilidad IV se define por la siguiente expresión:

$$IV = \sum_{i=1}^{11} K_i W_i \quad (2)$$

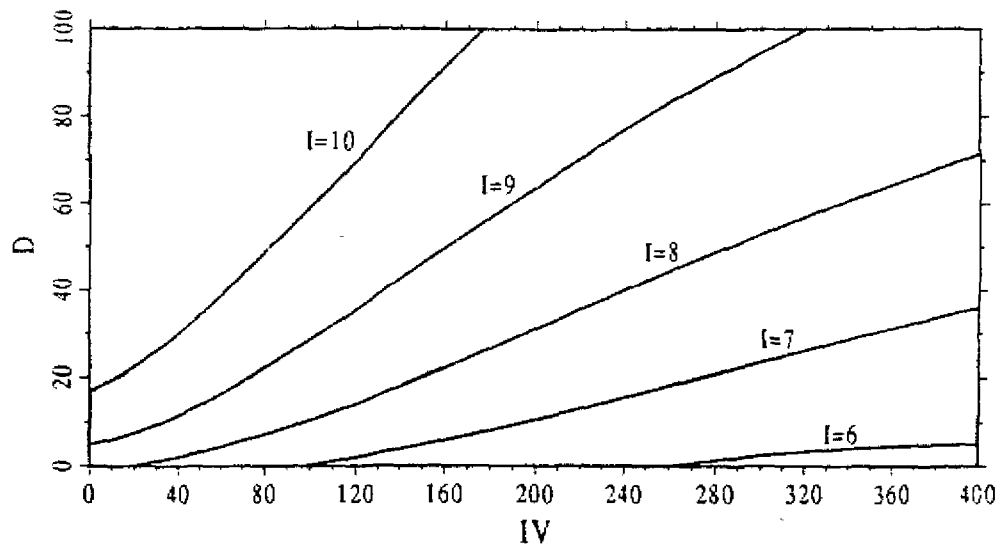
Al analizar la ecuación 2 se puede deducir, que el índice de vulnerabilidad define una escala continua de valores desde 0 hasta 382.5, que es el máximo valor posible.

La observación del daño sísmico en estructuras permite la deducción, por métodos estadísticos, de funciones de vulnerabilidad que relacionan el índice de vulnerabilidad IV, con el daño del edificio D condicionado sobre la intensidad sísmica I en la escala MSK; es decir, si se modifica el grado de intensidad entonces se modifica la correlación IV-D. Así, por ejemplo, en la referencia [5] se propone la función de vulnerabilidad que se observa en la figura 1, la cual se ha elaborado con datos de daño en edificios de algunas poblaciones de Italia.

ADAPTACIÓN DEL MÉTODO A UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO (SIG)

El manejo de la abundante información que se llega a tener durante los estudios de vulnerabilidad, hace que sea necesario su almacenamiento informático en una base de datos, lo que permite que los cálculos numéricos y estadísticos se realicen con mayor efectividad. Además, la representación gráfica de los resultados calculados debe visualizarse de manera elemental, con el objeto de dibujar mapas de fácil interpretación y que sean útiles para la toma de decisiones durante los planes de mitigación de desastres [6]. En este sentido, un SIG combina la potencia de una base de datos con la potencia de un sistema gráfico, enlazando y compartiendo información de estos dos sistemas, de manera transparente para el usuario. Para la implementación de este método se ha escogido el ARC/INFO [7], para el que se han desarrollado una serie de programas que permiten, entre otras, las siguientes operaciones:

- Digitalización de edificios.
- Introducción y/o actualización de las características de los edificios, necesarias para el cálculo de su vulnerabilidad.



- Cálculo del índice de vulnerabilidad.
- Cálculo del grado de daño suponiendo un sismo de una determinada intensidad.
- Visualización de la distribución espacial del índice de vulnerabilidad.
- Visualización de la distribución espacial del daño
- Impresión por plotter de las distribuciones obtenidas

Con estas operaciones, se facilita la identificación de los edificios más deficientes y, si se quiere, también se puede conocer qué características estructurales, en particular, son las que influyen de forma determinante en el comportamiento sísmico de dichos edificios.

También es posible calcular un costo promedio por unidad de superficie para cada nivel de daño, con lo cual se llegan a estimar las pérdidas materiales como consecuencia de un terremoto y, posteriormente, calcular el beneficio que se obtiene al elegir una determinada estrategia de reforzamiento para las estructuras más precarias.

En la figura 2 se observa una imagen monocromática del entorno DECWindows en el instante en que se elige la opción de visualizar la distribución espacial del daño en los edificios de una

población hipotética, para un sismo de intensidad 8 en la escala MSK. Este ejemplo y los que siguen son producto de una simulación aleatoria de los diferentes parámetros que caracterizan el IV de los edificios. En las figuras 3 y 4 se observan dos ejemplos de impresión por plotter, de los mapas de vulnerabilidad y de daño para un sismo de intensidad 9 en la escala MSK. En estas dos figuras se identifican fácilmente los edificios con mayor vulnerabilidad y con mayor grado esperado de pérdidas. La localización de dichos edificios puede ser consultada por medio de la base de datos, como se observa en la figura 5.

CONCLUSIONES

Se ha puesto a punto un método para el análisis de la vulnerabilidad sísmica de edificios en zonas urbanas. El método permite la identificación, ubicación, estimación de daños, estimación de pérdidas materiales, análisis de costo-beneficio y visualización de los edificios sísmicamente deficientes. Esta información tiene una importancia primordial a la hora de definir estrategias tendientes a la reducción del riesgo sísmico.