

## EL MÉTODO DEL ESPECTRO DE CAPACIDAD APLICADO A LA EVALUACIÓN DE DAÑOS SÍSMICOS.

Autores: L. Chiroiu<sup>1,2</sup>, X. Goula<sup>1</sup>, A. Roca<sup>1</sup>, T. Susagna<sup>1</sup>, A. Barbat<sup>3</sup> y L. Pujades<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institut Cartogràfic de Catalunya, Parc de Montjuïc s/n, 08038 Barcelona, España;

<sup>2</sup> Géosciences Consultants, 157 Rue des Blains, 92220 Bagneux, France;

<sup>3</sup> Universitat Politècnica de Catalunya, C/Gran Capitán s/n, 08034 Barcelona, España;

E-mail: lucian\_chiroiu@yahoo.fr

### RESUMEN

El método del espectro de capacidad constituye una herramienta nueva que se puede utilizar para el análisis de daños estructurales y no estructurales debidos a una acción sísmica tanto para la generación de escenarios de daños como para la rehabilitación de edificios. Basándose en parámetros espectrales como desplazamiento o aceleración, el método del espectro de capacidad es un procedimiento de análisis estructural no lineal simplificado. Una aplicación preliminar del método en la estimación del riesgo sísmico se ha hecho para un espectro de demanda adaptado a las condiciones locales de la ciudad de Barcelona. Los resultados se han comparado con otros estudios anteriores.

*Palabras clave: espectro de capacidad, análisis no lineal, riesgo sísmico, curvas de fragilidad, estimaciones de daños.*

### SUMMARY

The Capacity Spectrum Method is a recent tool which could be very useful for the analysis of structural and non-structural seismic damages for producing damage scenarios and for buildings retrofitting. Based on spectral parameters like displacement or acceleration, the Capacity Spectrum Method is a simplified non linear structural analysis procedure. A preliminary application of this method has been carried out in order to estimate the seismic risk corresponding to the local site conditions for the city of Barcelona. The results are compared with previous studies.

*Key words: capacity spectrum, non linear analysis, seismic risk, fragility curves, damage estimation.*

## Introducción

En la ciudad de Barcelona se han llevado a cabo varios estudios de evaluación del riesgo sísmico. En el estudio de Yopez (1996) se aplica el método del índice de vulnerabilidad para la estimación de daños sísmicos en edificios de hormigón y mampostería. Chávez (1998) y Chávez et al. (1999) utilizan el método de matrices de probabilidad de daño y la escala EMS 92 para determinar escenarios de riesgo sísmico para la ciudad de Barcelona y para toda Cataluña. En este trabajo se presenta la aplicación de un nuevo enfoque basado en respuestas espectrales para determinar los daños estructurales y no estructurales de los edificios de Barcelona, para un escenario sísmico adaptado a las condiciones sísmicas locales.

## Objetivo

El objetivo principal del estudio es proponer una metodología general para el análisis de riesgo sísmico, utilizando parámetros ingenieriles y con resultados de fácil interpretación para no especialistas. Se necesita una metodología flexible, que se pueda adaptar a características diferentes pero con el mismo tipo de "output", en términos de daños directos e indirectos producidos por un terremoto. Una herramienta nueva que se ha propuesto para estimaciones de daños es el método del espectro de capacidad. Es un método estático no lineal simplificado de análisis estructural, que conduce de una manera directa a definir el nivel de daño producido en una estructura por un cierto terremoto. En este estudio se ha aplicado de manera preliminar el método del espectro de capacidad para estimar daños directos en edificios de la ciudad de Barcelona. La aplicación del método se basa en el programa HAZUS (NIBS, 1997).

## Presentación del método

Varios métodos de análisis de estructuras están disponibles hoy en día: métodos de análisis elástico estándar, (como el método estático de la fuerza lateral equivalente) o métodos dinámicos tradicionales. Para la evaluación del comportamiento de un edificio frente a un terremoto, en términos de daños, se necesita una herramienta que permita analizar la estructura más allá del rango elástico. Las técnicas de análisis estructural consisten fundamentalmente en comparar un parámetro de demanda con un parámetro de capacidad. El esfuerzo cortante ha sido el parámetro tradicional utilizado para el diseño sísmico de estructuras. El ingeniero calcula el cortante en la base del edificio como demanda generada por un terremoto dado (o varios) o por la intensidad del movimiento y se compara con la capacidad del edificio. En el diseño tradicional, las fuerzas del sismo se reducen de manera artificial, para mantener el diseño en el rango elástico. Cuando se trabaja en el dominio post elástico, la generalización de la capacidad como una fuerza hace difícil la caracterización del nivel de daño

para distintas partes del edificio, a partir del momento que el daño es progresivo, causando la plastificación de algunos elementos. Como consecuencia, aparece una redistribución de esfuerzos, y la demanda inelástica depende de cada componente. De esta manera, el daño es más sensible al desplazamiento que a la fuerza en el rango post elástico. Además, algunos componentes son sensibles a la aceleración y la respuesta inelástica puede modificar substancialmente la aceleración a distintos niveles. Por lo tanto, se necesita una herramienta fácil de análisis no lineal.

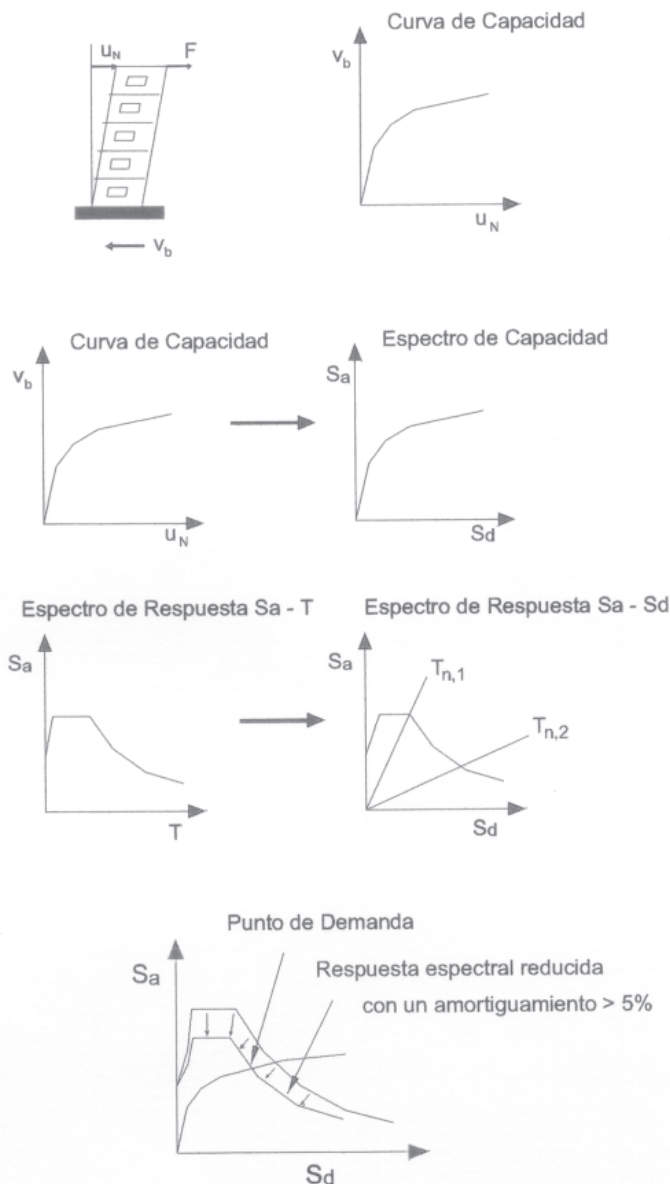


Fig.1 Diagrama del método del espectro de capacidad. Obtención del punto de demanda.

Los procedimientos no lineales tienen como parámetro de diseño el desplazamiento, tanto de demanda como de capacidad. El Método del Espectro de Capacidad es un método no lineal simplificado (Comartin et al., 2000; Fajfar, 1999; Chopra & Goel, 1999) que caracteriza la demanda inicial utilizando un espectro elástico con amortiguamiento de 5 % y que la reduce para un amortiguamiento efectivo mayor, teniendo en cuenta el efecto de la disipación de energía. El procedimiento se presenta esquemáticamente en la figura 1.

El análisis simplificado presupone aproximaciones implícitas. De hecho, la fuerza lateral se considera fija (un comportamiento independiente del tiempo) y basada sólo en el primer modo de vibración (existen propuestas de extensiones para tener en cuenta modos superiores de vibración: Paret et al, 1996).

### **Clasificación en tipologías de edificios**

Para analizar un estado de daño global de una aglomeración urbana, estudiar caso a caso cada edificio es prácticamente imposible. Por lo tanto, se necesita una clasificación en tipologías de edificios, cada tipología con sus características globales. En general, las categorías de edificios vienen dadas por el tipo de estructura, el año de construcción y el número de pisos. Para este estudio, se ha utilizado la clasificación propuesta en HAZUS (NIBS, 1997). Se han considerado 12 categorías de construcciones, diferenciadas por el tipo estructural, el nivel de diseño antisísmico y por la altura:

1. Estructuras en mampostería no reforzada (*URM*);
2. Estructuras en hormigón armado con mampostería no reforzada, con 1 – 3 pisos (*C3L*);
3. Estructuras en hormigón armado con mampostería no reforzada, con más de 3 pisos (*C3M*);
4. Estructuras metálicas con mampostería no reforzada, con 1 - 3 pisos (*S5L*);
5. Estructuras metálicas con mampostería no reforzada, con más de 3 pisos (*S5M*);
6. Estructuras en pórticos de hormigón armado; con 1 – 3 pisos (*CIL*);
7. Estructuras en pórticos de hormigón armado; con 4 – 7 pisos (*CIM*);
8. Estructuras en pórticos de hormigón armado; con más de 7 pisos (*CCIH*);
9. Estructuras en pórticos metálicos, con 1 – 3 pisos (*SIL*);
10. Estructuras en pórticos metálicos, con 4 – 7 pisos (*SIM*);
11. Estructuras en pórticos metálicos, con más de 7 pisos (*SIH*);
12. Estructuras ligeras con muros prefabricados (*PCI*).

### Espectros de capacidad

Cada tipología tiene sus características, que definen un comportamiento específico. El comportamiento frente a un cortante en la base se puede expresar a través de las curvas de capacidad, curvas que se pueden definir por 3 puntos: i) la capacidad de diseño, ii) la capacidad elástica y iii) la capacidad última (ver figura 2). La capacidad de diseño representa la resistencia nominal del edificio definida por las normas de diseño antisísmico. La capacidad elástica representa el valor real de su resistencia frente a cargas horizontales, considerando resistencias reales de los materiales del edificio, no las nominales, y la capacidad última representa la resistencia máxima del edificio, cuando la estructura está totalmente plastificada.

Hasta el punto de plastificación, el espectro de capacidad del edificio es lineal, con una rigidez constante, y está basado en la estimación del período fundamental real del edificio. El período fundamental real es en general más largo que el periodo prescrito por las normas, debido a fisuraciones, a la flexibilidad de las cimentaciones o a otros elementos adicionales. Entre el punto de comienzo de la plasticidad y el de la capacidad última, la pendiente de la curva cambia entre un estado elástico puro y un estado plástico completo.

En esta aplicación se van a considerar las curvas de capacidad obtenidas por HAZUS (NIBS, 1997) . Las curvas de capacidad se basan en estimaciones de propiedades que afectan la capacidad de diseño, elástica y última de cada tipología de edificios. Se ha elegido la categoría "low code", dado que para nuestra zona de estudio las normativas de construcción tienen un nivel de exigencia relativamente bajo. Como ejemplo, en la figura 3 se presenta la curva de capacidad para edificios en mampostería no reforzada.

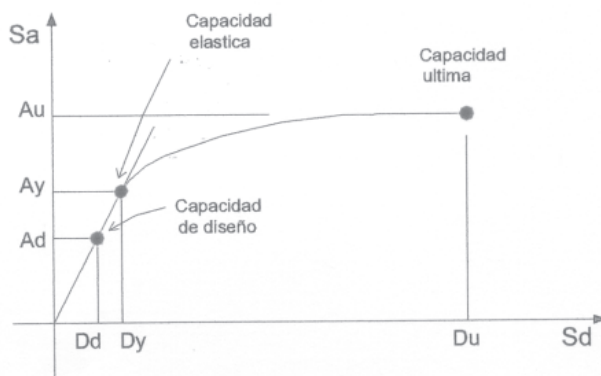


Figura 2. Características de la curva de capacidad

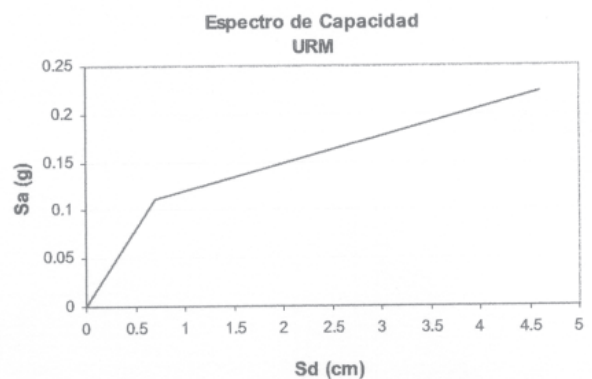


Figura 3. Representación esquemática de la curva de capacidad para mampostería no reforzada

## Curvas de fragilidad y estimación de daños

Sólo se han considerado daños directos en edificios, es decir los producidos directamente por los terremotos, sin tener en cuenta efectos de licuefacción, deslizamientos de terrenos, proximidad de fallas o otros efectos indirectos como incendios o inundaciones. A parte de los daños estructurales, los daños en los elementos no estructurales de los edificios (componentes arquitecturales, sistemas eléctricos, etc) tienen consecuencias directas sobre aspectos económicos, sociales e incluso sobre la integridad física de las personas. Por lo tanto, es preferible estimar por separado los elementos estructurales y no estructurales. Los elementos no estructurales se consideran como "sensibles a aceleración" y "sensibles a desplazamiento entre pisos" ("interstory drift").

El método propuesto por HAZUS (NIBS, 1997) propone 4 + 1 grados de daño: (0) sin daño, (1) daños ligeros, (2) daños moderados, (3) daños extensivos y (4) daños completos (colapso). Los diferentes grados de daño vienen definidos para cada tipología de edificios, en función de sus características.

Las funciones de daño se calculan en forma de curvas de fragilidad, que expresan la probabilidad de alcanzar o de sobrepasar un cierto rango de daño estructural, para un valor de entrada dado (como por ejemplo el desplazamiento espectral). Se han considerado las curvas de fragilidad propuestas en HAZUS (NIBS, 1997) para las tipologías de edificios utilizadas en la aplicación a Barcelona (ver figura 4). La probabilidad condicionada de alcanzar o de sobrepasar un cierto nivel de daño se modela como una función de distribución normal acumulada del logaritmo de desplazamiento o aceleración espectral.

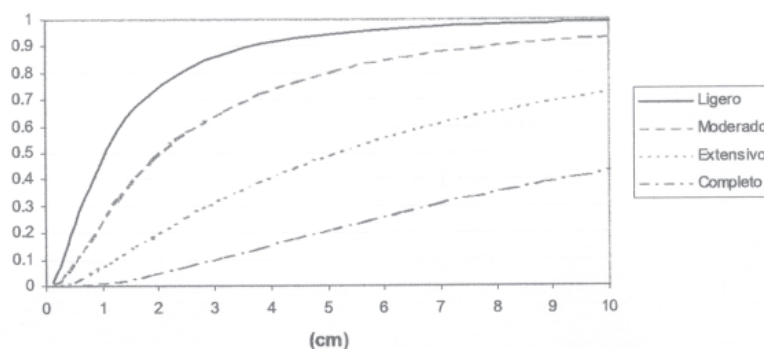


Fig. 4. Probabilidad acumulada de daño estructural para mampostería no reforzada

El punto de demanda, que caracteriza el comportamiento del edificio frente a un terremoto dado, va a determinar la probabilidad de alcanzar cada rango de daño. Las etapas de cálculo son presentadas en la figura 5.

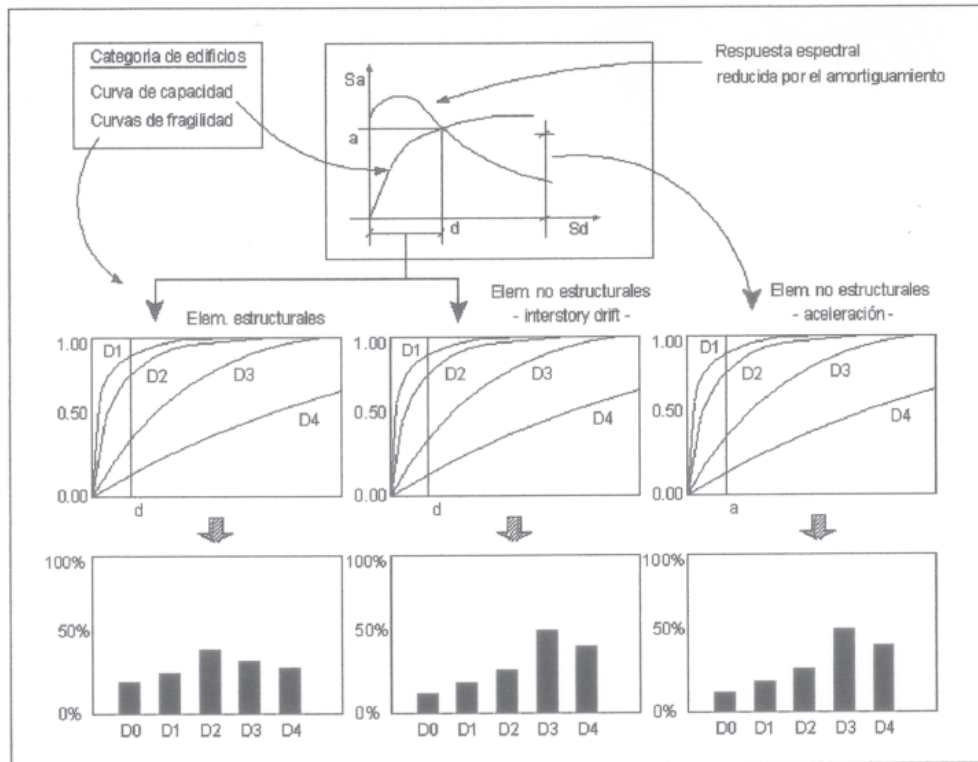


Fig. 5. Procedimiento de estimación de daños (HAZUS, NIBS 97).

### Aplicación preliminar para Barcelona

Se presenta una primera aplicación del método descrito a la evaluación de daños directos en edificios de Barcelona. Para esto, y como primera aproximación, se toman los espectros de capacidad y las curvas de fragilidad definidas para Estados Unidos (NIBS, 1997). Se toma como espectro de demanda el espectro propuesto por ICC en el proyecto EUROSEISMOD (ICC & UPC, 1998) para Barcelona para suelos tipo intermedio, característicos de la zona Eixample (figura 6), calculado para un movimiento en roca de 0.04g, según la Norma Sismorresistente NCSE-94, equivalente a una intensidad VI MSK.

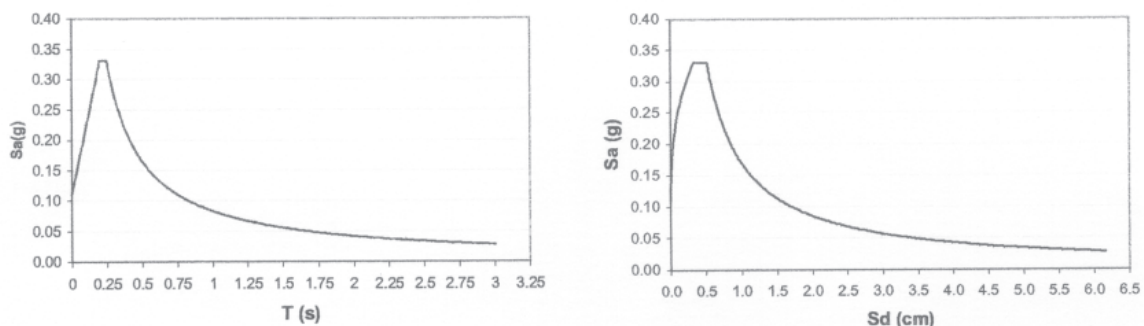


Fig. 6. Espectro de demanda sísmica para Barcelona con un amortiguamiento de 5%, formato tradicional  $S_A - T$  y formato  $S_A - S_D$

A partir de esta representación, teniendo en cuenta la capacidad de disipación de energía de cada tipo estructural podemos obtener el espectro inelástico que corresponde al amortiguamiento efectivo del edificio (de la tipología de edificios). El procedimiento utilizado para esta operación ha sido el método ATC 40, versión C (ATC40, 1996). Para edificios en mampostería no reforzada, por ejemplo, se encuentra un aumento del amortiguamiento de 7%, y por lo tanto el espectro real inelástico de demanda sísmica para esta tipología tendrá un amortiguamiento efectivo del 12%. Cruzando con las curvas de fragilidad, según el método presentado más arriba, se obtienen las probabilidades de daños, para todas las tipologías consideradas. El cálculo se ha hecho tanto para elementos estructurales como para elementos no estructurales, sensibles respectivamente a la aceleración y al desplazamiento entre pisos. Como ejemplo, en la tabla 1, se presentan los resultados obtenidos con respecto a daños estructurales.

Tipología de edificios	GRADOS DE DAÑO ESTRUCTURAL				
	D0	D1	D2	D3	D4
URM	0.48	0.25	0.19	0.06	0.02
C3L	0.62	0.20	0.13	0.04	0.01
C3M	0.74	0.19	0.06	0.01	0.00
S5L	0.68	0.20	0.10	0.01	0.00
S5M	0.83	0.14	0.02	0.01	0.00
C1L	0.75	0.14	0.10	0.01	0.00
C1M	0.85	0.09	0.05	0.01	0.00
C1H	0.71	0.14	0.13	0.01	0.01
S1L	0.86	0.08	0.04	0.02	0.01
S1M	0.86	0.07	0.05	0.01	0.00
S1H	0.73	0.16	0.08	0.02	0.01
PC1	0.72	0.20	0.04	0.03	0.01

Tabla1. Probabilidades de daño estructural para cada tipología de edificios utilizada en la aplicación a Barcelona

Analizando las estimaciones de daños estructurales, tal como se podría esperar, la tipología que sufriría más daños es la de mampostería no reforzada (URM), con más del 50% de edificios dañados. En las estructuras de hormigón y acero, los daños obtenidos son del mismo orden de magnitud. Como era de esperar, se obtienen menos daños para las estructuras con un nivel más alto de diseño antisísmico (C1 y S1). Si consideramos las diferentes alturas de edificios (L, M y H), se observan menores daños para los edificios de altura media (M: 3 – 7 plantas) que para edificios bajos (L: < 3 plantas) o para los edificios con más de 7 plantas (H: > 7 plantas), posibilidad considerada también en la escala EMS 98. En



cuanto a los daños no estructurales, los resultados obtenidos nos permite concluir que los elementos sensibles a "interstory drift" sufrirían más daños que los elementos sensibles a aceleración. Se observa la misma repartición de los daños con la altura que para los elementos estructurales.

Si comparamos con resultados obtenidos en estudios anteriores se observa:

a) con el método de matrices de probabilidad de daño (Chávez, 1998; Chávez et al., 1999) se obtienen resultados similares, en el caso de edificios de mampostería, si se asimilan los índices D0 y D1 de Chávez (1998) a D0 del presente estudio. Notemos, sin embargo, un mayor porcentaje de daños graves (8%) que en Chávez (1998).

b) con el método del índice de vulnerabilidad (Yépez, 1996) se observan para edificios de mampostería resultados muy distintos. Con respecto a los edificios no dañados, un 10% en Yépez (1996) y casi el 50% en el estudio presentado. Con respecto a los edificios con daños muy graves, se obtiene un 8% en el estudio aquí presentado respecto a valores inapreciables en Yépez (1996).

## Conclusiones

El método del espectro de capacidad se diferencia de los métodos tradicionales que utilizan como parámetro de la acción sísmica la intensidad macrosísmica en la manera de caracterizar el terremoto, el "input", a través de parámetros que definen mejor, desde un punto de vista ingenieril, el movimiento del terreno. De esta manera se puede apreciar mejor el comportamiento de una estructura o de una tipología de estructuras. Utilizando parámetros de desplazamiento espectral o de aceleración espectral, se pueden cuantificar de una manera directa pérdidas en elementos no estructurales, lo que es imposible aplicando métodos clásicos de análisis de daños. Además, el método del espectro de capacidad se puede aplicar para cualquier tipo de estructuras, como por ejemplo puentes o estructuras industriales. Otra característica del método del espectro de capacidad es que por primera vez se tiene en cuenta la reducción de la demanda sísmica, debido a las propiedades de la estructura, lo que hace posible una mejor estimación de las pérdidas.

El método se puede aplicar para cualquier aglomeración urbana pero también para elementos individuales diferenciados, ventaja importante con respecto a los métodos tradicionales. Por ejemplo, se pueden contemplar sólo unas categorías de edificios, como hospitales, monumentos arquitectónicos, escuelas u otras estructuras vitales. Se necesitan parámetros relacionados con las características de la (las) estructura(s) de un lado y parámetros relacionados con la peligrosidad sísmica de la zona de estudio de otro. De hecho, esta metodología puede ser útil para una propuesta de estandarización de escenarios de daños

sísmicos en Europa, como se ha propuesto en el proyecto RISK – UE financiado por la Unión Europea (<http://www.cher.com/riskue>).

En la aplicación para Barcelona se han considerado con respecto a características estructurales parámetros propuestos en HAZUS (NIBS, 1997), y parámetros de demanda sísmica que corresponden a las condiciones sísmicas locales. Para una mejor estimación de los daños se necesitaría calcular los elementos que caracterizan las tipologías de edificios de la ciudad de Barcelona, para adaptar sobre todo las curvas de capacidad y de fragilidad.

### Referencias:

ATC 40, Applied Technology Council (1996), "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings".

Chávez, J., (1998), "Evaluación de la vulnerabilidad y riesgo sísmico a escala regional: Aplicación a Catalunya", PhD Thesis. Universidad Politécnica de Cataluña, 335 pp.

Chávez, J., Goula, X., Roca, A., Mañá, F., Presmanes, J.A. & López-Arroyo, A., (1999). Escenarios de daños sísmicos en Cataluña. 1er. Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica (Murcia, 12-16 de abril de 1999), Memorias, T. I, 299-307.

Chopra, A. K., Goel, R.K., (1999), "Capacity Demand Diagram Method Based on Inelastic Design Spectrum", *Earthquake Spectra*, Vol.15, pp. 637 – 656.

Comartin, C.; Niewiarowski, R., Freeman, S. A.; Turner, F., (2000), "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings: A practical Overview of the ATC 40 Document", *Earthquake Spectra*, Vol.16, pp. 241 – 261.

Fajfar, P., (1999), "Capacity Spectrum Method Based on Inelastic Demand Spectra; *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*", Vol.28, pp. 979 – 993.

Instituto Cartográfico de Catalunya (ICC); Universitat Politécnica de Catalunya, (1998), "Eurosismod. Final Analysis of Soil Effects in the City of Barcelona".

NCSE-94, (1995), " Normativa de Construcción Sismorresistente Española", Real Decreto 2543/94. B.O.E. 33. 8 de Febrero de 1995.

NIBS, National Institut of Building Sciences, (1997), "Earthquake Loss Estimation Methodology - HAZUS".

Paret, T. F.; Sasaki, K. K.; Eilbeck, D. H.; Freeman, S. A., (1996), "Approximate Inelastic Procedures to Identify Failure Mechanism from Higher Mode Effects", Paper No. 966, Proc. of 11<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering.

Yépez, F., (1996), "Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de estructuras aplicando técnicas de simulación", PhD Thesis. Universidad Politécnica de Cataluña, 393 pp.