

CURVAS DE FRAGILIDAD PARA EVALUAR EL DAÑO SÍSMICO EN EDIFICIOS DE CONCRETO ARMADO CON LOSAS RETICULARES

ROSÁNGEL MORENO GONZÁLEZ, JESÚS MIGUEL BAIRÁN GARCÍA

Universidad Politécnica de Cataluña. Escuela de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos,
Barcelona, España.

e-mail: mgrosangel@ciccp.es, jesús.miguel.bairan@upc.edu

Recibido: octubre de 2009

Recibido en forma final revisado: octubre de 2010

RESUMEN

Las estructuras con un comportamiento sísmico inadecuado son la causa principal de las pérdidas humanas y económicas durante la ocurrencia de temblores intensos. Para mejorar el diseño de las estructuras hay que comenzar por realizar estudios de riesgo sísmico en zonas urbanas, los cuales permiten evaluar la vulnerabilidad sísmica en dichas zonas y estimar el daño probable que se puede sufrir a causa de un evento sísmico. Actualmente, muchos de los edificios de Barcelona, España, son edificios de concreto armado con losas reticulares. Dentro de la ciudad, es la segunda tipología constructiva más representativa, y va en aumento, ya que es el sistema más utilizado en la actualidad. Este trabajo es una contribución al análisis del comportamiento sísmico de estos edificios y hace frente al análisis del riesgo sísmico en un área urbana situada en una zona de baja sismicidad. Para llevar a cabo un análisis adecuado 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. En este trabajo se evalúa la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de edificios de concreto armado con losas reticulares mediante una metodología basada en el método del espectro de capacidad. Los modelos estructurales que se utilizan en el análisis corresponden a edificios de 8, 5, 3 y 2 pisos. Para cada uno de estos edificios se determina su capacidad y se evalúa su fragilidad. Para la demanda sísmica esperable en Barcelona, se consideran dos escenarios sísmicos específicos. A partir de aquí, se obtienen las matrices de probabilidad de daño para cada modelo, para cada escenario sísmico y para cada tipo de suelo.

Palabras clave: Curvas de fragilidad, Espectros de capacidad, Vulnerabilidad, Riesgo sísmico, Matrices de probabilidad de daño, Losas reticulares.

FRAGILITY CURVES TO ASSESS THE SEISMIC RISK IN REINFORCED CONCRETE BUILDINGS WITH WAFFLED SLABS

ABSTRACT

Structures with an inadequate seismic performance are the main source of the human death and economic losses when a major earthquake strikes an urban area. To improve buildings design one have to begin by carrying out seismic risk analysis in urban areas, which permit to assess the seismic vulnerability in these zones and to estimate the probable damage can be suffer by a seismic event. Currently, many of the housings in Barcelona, Spain, are multi-storey waffle slabs reinforced concrete buildings. In fact, this typology is the second most representative in the city and the number of this type of buildings is increasing because, at present, this is the most extended construction system. This work is a contribution to the analysis of the seismic behaviour of this type of buildings and it faces the seismic risk analysis in an urban area situated in a low seismic hazard region. In order to carry out a suitable analysis it is necessary to have enormous information, that often it is not available and, in addition, there exists a great amount of involved uncertainties; therefore, the adequate treatment of the problem is the probabilistic. In this work, the vulnerability and the seismic risk of waffle slabs reinforced concrete buildings are evaluated by means of a methodology based in the capacity spectrum method. The structural models used in the analysis correspond to buildings of 8, 5, 3 and 2 storeys. For each one of these buildings capacity and fragility curves are obtained. For a likely seismic demand in Barcelona, two specific seismic scenarios were considered. Taking into account all these results, the probability damage matrixes are also obtained.

Keywords: Fragility curves, Capacity spectra, Vulnerability, Seismic risk, Damage probability matrices, Waffled slab.

desarrollados por el Instituto Geológico de Cataluña (IGC) que, además de la acción sísmica básica, tienen en cuenta la zonificación sísmica de la ciudad (Cid, 1998; Irizarry *et al.*, 2003). Para cada modelo, los espectros de capacidad se obtienen a partir de un análisis estático no lineal considerando su forma bilineal simplificada.

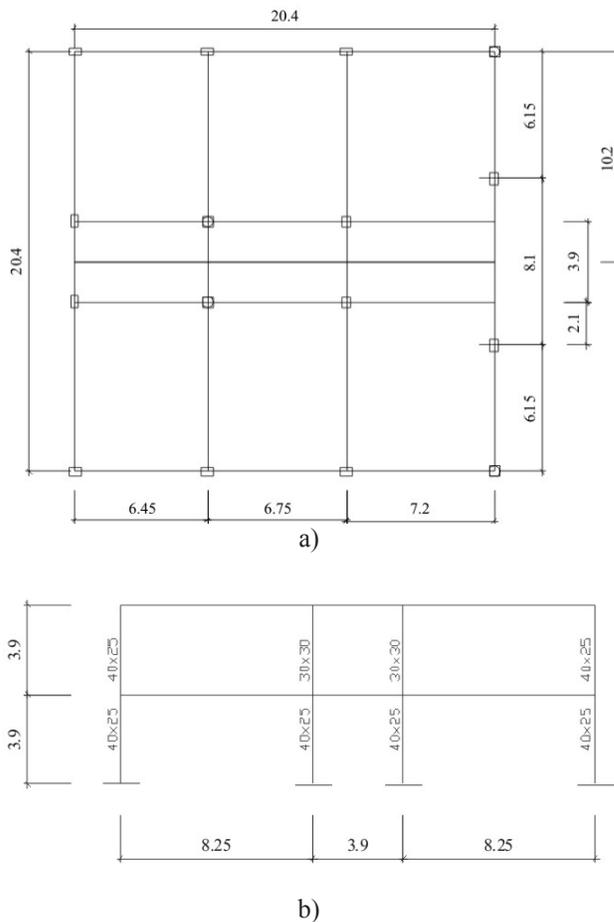


Figura 2. a) Planta del edificio CASA. b) Alzado pórico 2 edificio CASA.

Seguidamente, se construyen las curvas de fragilidad a partir de los espectros bilineales. Finalmente, los puntos de capacidad por demanda (puntos de desempeño) correspondientes a los escenarios sísmicos utilizados, junto con las curvas de fragilidad se usan para obtener las matrices de probabilidad de daño correspondientes a los 2 escenarios considerados.

CARACTERÍSTICAS DE LOS EDIFICIOS

Los edificios RCH, RCM y RCL tienen las mismas dimensiones en planta (figura 1a), pero distintas alturas. Estos edificios tienen una planta rectangular con dimensiones 21.90m x 25.65m y un área de 561.74m². La tabla 1 especifica las dimensiones en altura de los edificios estudiados.

La tabla 1 muestra también las características en altura de una vivienda unifamiliar de 2 plantas. Esta casa tiene una planta cuadrada con un área de 416.16m² (figura 2a). La tabla 2 muestra las dimensiones características de los elementos del modelo.

Tabla 1. Características en alzado de los edificios.

Clases Edificios	Nº pisos	Altura Total (m)	Alturas Piso (m)		
			Planta baja	1er. piso	Resto pisos
RCH	8	24.0	2.85	2.85	3.05
RCM	5	15.8	3.80	3.00	3.00
RCL	3	9.8	3.80	3.00	3.00
CASA	2	5.2	2.60	2.60	-

Tabla 2. Secciones estructurales.

Elemento estructural	Dimensiones típicas (m)
Ábacos	2.40x2.40
Pilares	entre 0.30x0.35 y 0.50x0.35
Vigas interiores equivalentes	1.20x0.28, 1.30x0.28 y 1.24x0.28
Vigas perimetrales equivalentes	0.80x0.28
Espesor losa	0.28
Ancho nervios	0.10

Para el análisis, las propiedades mecánicas consideradas se resumen en la tabla 3.

Tabla 3. Propiedades mecánicas de los edificios.

Parámetros	Valor medio (N/mm ²)
Resistencia característica del concreto, f_{ck}	20
Módulo elástico del concreto, E_c	30000
Módulo de cortante del concreto, G	12500
Límite elástico característico del acero, f_{yk}	500
Módulo elástico del acero, $E_{s_{máx}}$	210000

ANÁLISIS DE CAPACIDAD

Para poder analizar estas estructuras como pórticos, se realizó un estudio previo con un programa de cálculo de estructuras tridimensional (SAP2000, 2002), analizando la concentración de esfuerzos en la losa frente a cargas horizontales y se observó cómo, en los nervios cercanos a las alineaciones de los soportes, se concentran los momentos

más importantes de la losa. Además, se verificó que los desplazamientos de entrepiso fueran aproximadamente iguales. De esta manera se ha definido un ancho efectivo de las vigas, de forma que, un edificio porticado, representara bien un edificio de losas reticulares.

Para estimar el espectro de capacidad de los edificios, se han modelado las estructuras en dos dimensiones. Cada modelo se obtiene colocando pórticos sucesivos, en la dirección del análisis, de forma adyacente, es decir, se colocan los pórticos uno seguido del otro. Para el análisis se consideró que la rigidez de la losa, en su plano, es infinita, y por lo tanto, que los movimientos horizontales del mismo son iguales para cada piso. Para este análisis se han considerado los pórticos vacíos, es decir, no se consideraron las paredes de relleno. Para obtener los espectros de capacidad se ha llevado a cabo, con el programa RUAUMOKO (Carr, 2000), un análisis estático no lineal, el cual consiste en aplicar a la estructura un patrón de fuerzas horizontales (fuerzas sísmicas) que se va incrementando monótonicamente hasta alcanzar la capacidad última de la estructura o el colapso. En Moreno *et al.* (2004) se presenta un estudio específico sobre el comportamiento sísmico de edificios porticados de concreto armado.

El programa RUAUMOKO (Carr, 2000) requiere conocer los diagramas momento-curvatura, para vigas y columnas. Se ha utilizado el programa BCSEC (Bairán, 2000) para su obtención. El programa BCSEC es un programa computacional que permite obtener la respuesta no lineal de las secciones. Se ha tenido en cuenta el confinamiento del concreto mediante la ecuación constitutiva de Kent y Park (Park & Paulay, 1994), el endurecimiento por deformación del acero y la posición de los planos de rotura según el Eurocódigo 2 (1992), excepto la deformación máxima a tracción del 1% que ha sido modificada a un valor suficientemente grande (0.08) para que no limite la curvatura última y se pueda desarrollar toda la ductilidad de la sección.

La tabla 4 muestra las características modales medias de los edificios analizados. En dicha tabla, T es el período propio, α_1 es el factor de contribución de la masa efectiva del primer modo y Γ es el factor de participación modal.

Tabla 4. Características modales de los edificios.

Edificio	T (seg)	α_1	Γ
RCH	1.163	0.78	1.341
RCM	0.838	0.88	1.269
RCL	0.595	0.92	1.220
CASA	0.487	0.85	1.180

La figura 3 muestra los espectros de capacidad para los 4 edificios analizados. Se observa cómo los edificios bajos son más rígidos y presentan una mayor capacidad.

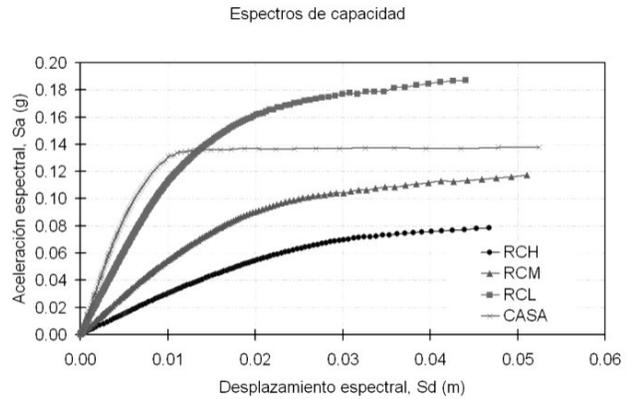


Figura 3. Espectros de capacidad en formato Sd-Sa.

La tabla 5 muestra los parámetros que definen la forma bilineal de los espectros de capacidad de la figura 3. En la figura 4, se muestran los 2 puntos: capacidad de cedencia (D_y , A_y) y capacidad última (D_u , A_u), que definen la curva de capacidad bilineal. El punto de cedencia representa el desplazamiento en el que la respuesta del edificio empieza a ser fundamentalmente no lineal. El punto de capacidad última representa el desplazamiento en el que el sistema estructural global ha alcanzado el mecanismo de colapso. La curva de capacidad bilineal se ha obtenido mediante un criterio de balance de energía. Así, se busca una curva bilineal que pueda absorber la misma energía que la curva de capacidad real y que tenga el mismo punto de colapso. Partiendo de la rigidez elástica, el punto de cedencia se define de forma que el área bajo la curva de capacidad y el área bajo su aproximación bilineal coincidan. En otras palabras, se igualan las áreas que, comprendidas entre ambas curvas, quedan por encima y por debajo de la curva de capacidad.

Tabla 5. Parámetros que definen la forma bilineal del espectro de capacidad.

TIPO	Capacidad Cedencia		Capacidad Última	
	D_y (m)	A_y (g)	D_u (m)	A_u (g)
RCH	0.01894	0.0591	0.04675	0.0785
RCM	0.01418	0.0831	0.05107	0.1173
RCL	0.01150	0.144	0.0441	0.187
CASA	0.0070	0.129	0.05241	0.138

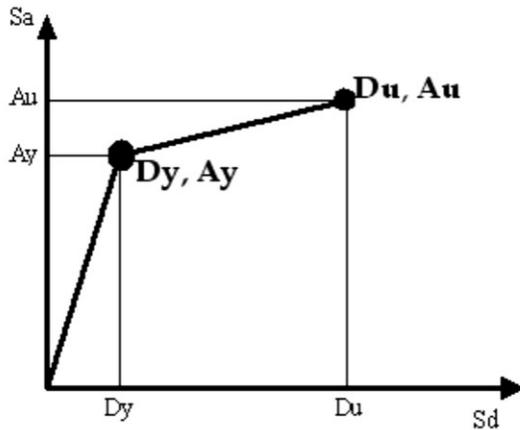


Figura 4. Definición de la curva de capacidad bilineal.

ANÁLISIS DE FRAGILIDAD

La fragilidad de un edificio está relacionada con su vulnerabilidad sísmica y se puede cuantificar mediante curvas de fragilidad. Las curvas de fragilidad se definen como la representación gráfica de la función de distribución acumulada, de la probabilidad de alcanzar o exceder un estado de daño límite específico, dada una respuesta estructural, ante una acción sísmica determinada (FEMA, 1999).

En este estudio se ha adoptado la metodología HAZUS (FEMA, 1999) que define estas curvas suponiendo que siguen una distribución de probabilidad tipo lognormal. Esta hipótesis se ha verificado por simulaciones realizadas mediante el método de Monte Carlo. La hipótesis de una distribución de probabilidad lognormal, permite definir cada curva de fragilidad mediante dos parámetros: el valor medio y la desviación estándar. Así pues, las curvas de fragilidad se definen mediante la siguiente ecuación:

$$P[ED \geq ED_i] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ED}} \cdot \ln \left(\frac{Sd}{Sd_{ED}} \right) \right] \quad (1)$$

donde:

Sd_{ED} es el desplazamiento espectral medio para el cual la probabilidad de excedencia es del 50%, β_{ED} es la desviación estándar del logaritmo natural del desplazamiento espectral para el estado límite de daño, en otras palabras, β_{ED} es la variabilidad asociada al estado de daño, Φ es la función de distribución normal estándar acumulada, Sd es el desplazamiento espectral; ED indica el estado de daño y viene definido como: 1 para el estado de daño leve, 2 para moderado, 3 para severo y 4 indica el estado de daño completo (justo antes de que se produzca el colapso).

El daño esperado en un edificio depende de su capacidad y de su fragilidad, sin ser conceptos independientes se hallan íntimamente relacionados entre sí. Existen diferentes formas para cuantificar el daño de una estructura sometida a un evento sísmico. En este trabajo se ha utilizado un método simplificado que permite estimar los valores umbrales del desplazamiento espectral, correspondiente a los umbrales de los estados de daño (valores medios), a partir de la representación bilineal de los espectros de capacidad. En estos umbrales de daño, los valores de β_{ED} han sido calculados para construir las curvas de fragilidad. La desviación estándar β_{ED} se determina a partir de un ajuste por mínimos cuadrados de la distribución lognormal de la ecuación (1) que define las curvas de fragilidad (Moreno, 2006). Los estados de daño, aquí utilizados, forman parte de la propuesta por parte de Lagomarsino y Penna (2003), en el proyecto RISK-UE; donde los estados de daño considerados se dividen en cinco umbrales: no daño, daño leve, moderado, severo y completo (justo antes del colapso), los cuales se definen desde la curva de capacidad bilineal (Cattari *et al.*, 2004).

A continuación se presenta la definición de los umbrales de los estados de daño (tabla 6), (Barbat *et al.*, 2008).

Tabla 6. Definición de los umbrales de los estados de daño.

Umbral del estado de daño	Definición
Leve	$Sd_1 = 0.7 \cdot Dy$
Moderado	$Sd_2 = Dy$
Severo	$Sd_3 = Dy + 0.25(Du - Dy)$
Completo	$Sd_4 = Du$

El daño leve es definido antes de alcanzar el punto de desplazamiento de cedencia. El daño moderado se define justo en el desplazamiento de cedencia. El daño severo es definido después del punto de cedencia, pero no más allá de éste. Finalmente, el daño completo es definido en el punto de la capacidad última (ver tabla 6).

Así pues, cada curva de fragilidad puede ser definida por un valor medio del parámetro de demanda, en este caso, por el desplazamiento espectral medio, correspondiente al umbral de un estado de daño y por la variabilidad asociada con este estado de daño. La tabla 7 muestra los parámetros obtenidos para los 4 edificios analizados. En ella, se dan los valores medios y la desviación típica de la función lognormal acumulativa.

Tabla 7. Parámetros que definen las curvas de fragilidad.

	RCH	RCM	RCL	CASA
Sd_1 (cm)	1.33	0.993	0.803	0.49
β_1	0.28	0.28	0.28	0.28
Sd_2 (cm)	1.89	1.42	1.15	0.70
β_2	0.29	0.36	0.37	0.37
Sd_3 (cm)	2.59	2.34	1.96	1.84
β_3	0.34	0.50	0.53	0.75
Sd_4 (cm)	4.68	5.11	4.41	5.24
β_4	0.45	0.61	0.63	0.83

Al igual que los umbrales de daño, la estimación de las desviaciones β_{ED} , no es un problema trivial. En realidad, la determinación completa de las curvas de fragilidad, para una tipología dada, requeriría datos de daño para los diferentes desplazamientos espectrales comprendidos entre aquél para el que no se produce daño, hasta aquél para el cual la probabilidad de colapso es igual a la unidad. En los valores intermedios es preciso conocer cómo se distribuyen las probabilidades de excedencia de cada estado de daño considerado. Otra forma expedita de estimar estos parámetros, conocidos los valores medios, es suponer que la probabilidad de daño sigue una distribución de probabilidad determinada, lo que permite el cálculo de las probabilidades esperadas y el ajuste de las curvas de fragilidad.

Las figuras 5, 6, 7 y 8 muestran las curvas de fragilidad obtenidas, para los edificios RCH, RCM, RCL y CASA, respectivamente. Estas curvas han sido ajustadas por el método de mínimos cuadrados y representan la probabilidad de alcanzar o exceder un estado de daño dado.

Después de obtener las curvas de fragilidad, es posible construir matrices de probabilidad de daño y calcular un parámetro indicador del daño global de la estructura, los cuales pueden ser utilizados para evaluar el riesgo sísmico de los edificios, construir escenarios de daño sísmico e indicar el nivel de daño que podría sufrir la estructura dependiendo de su tipología y del tipo de suelo donde ésta esté cimentada.

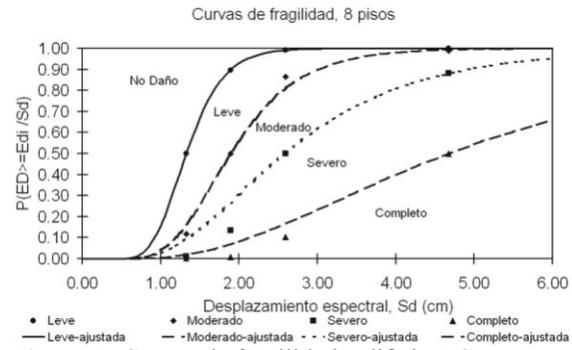


Figura 5. Curvas de fragilidad, edificio RCH.

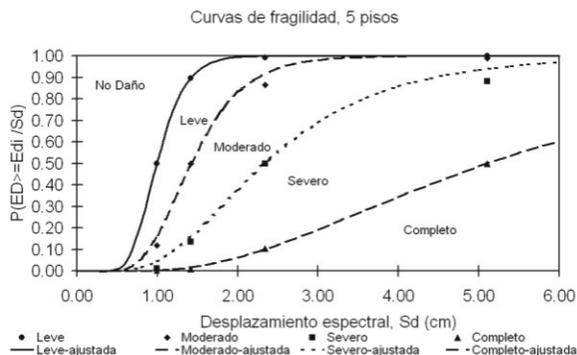


Figura 6. Curvas de fragilidad, edificio RCM.

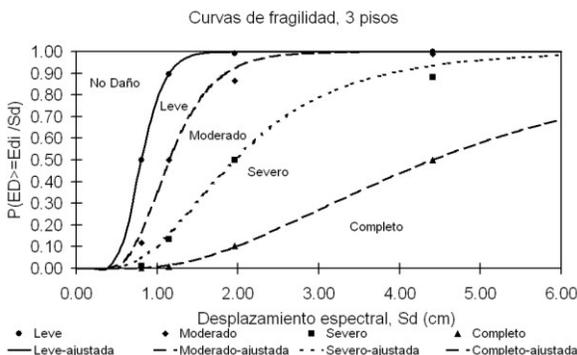


Figura 7. Curvas de fragilidad, edificio RCL.

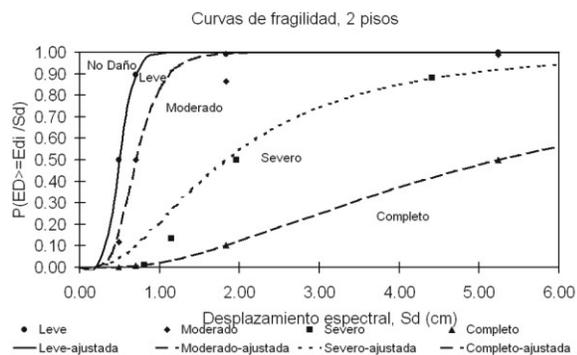


Figura 8. Curvas de fragilidad, edificio CASA.

ESCENARIOS DE DEMANDA SÍSMICA

Una vez caracterizados los cuatro edificios representativos de concreto armado mediante sus espectros de capacidad y sus curvas de fragilidad, en este apartado se consideran dos terremotos cuya ocurrencia en Barcelona es creíble. El primer escenario se ha estimado mediante técnicas deterministas, mientras que el segundo se ha estimado mediante métodos probabilistas (Irizarry *et al.*, 2003).

La tabla 8 muestra los parámetros que definen los 8 espectros de respuesta, con un amortiguamiento del 5%, correspondiente a los escenarios determinista y probabilista para los 4 tipos de suelos de Barcelona. El escenario determinista corresponde a un terremoto histórico ocurrido en Cardedeu, a una distancia de 25km de Barcelona, éste es el sismo de mayor intensidad epicentral ocurrido a menor distancia de la ciudad, el escenario probabilista corresponde a un terremoto con una probabilidad del 10% en 50 años. La zona IV contiene suelos duros, básicamente afloramientos rocosos, la zona I está constituida por suelos muy blandos, básicamente contiene las zonas cercanas a los deltas de los ríos Besós y Llobregat y el frente marítimo de la ciudad; los suelos de la zona II son más cercanos en características y situación a los suelos blandos de la zona I, mientras que los de la zona III son más próximos en propiedades y situación a los de la zona IV.

Tabla 8. Parámetros de los espectros de respuesta de Barcelona propuestos por el IGC (Irizarry *et al.*, 2003).

Escenarios Deterministas				
Tipo suelo	Zona I	Zona II	Zona III	Zona IV
<i>PGA</i> (g)	0.136	0.141	0.122	0.072
<i>d</i>	1.70	1.43	1.40	1.12
<i>Bc</i>	1.91	2.45	2.29	2.26
<i>Tb</i> (s)	0.10	0.10	0.10	0.10
<i>Tc</i> (s)	0.39	0.22	0.22	0.23
<i>Td</i> (s)	2.30	2.20	2.00	1.75
Escenarios Probabilistas				
Tipo suelo	Zona I	Zona II	Zona III	Zona IV
<i>PGA</i> (g)	0.188	0.194	0.169	0.100
<i>d</i>	1.34	1.28	1.12	0.98
<i>Bc</i>	2.00	2.50	2.57	2.29
<i>Tb</i> (s)	0.10	0.10	0.10	0.10
<i>Tc</i> (s)	0.40	0.23	0.19	0.25
<i>Td</i> (s)	2.85	2.21	1.77	1.75

La aceleración pico efectiva *PGA* define el nivel de la acción sísmica, T_b y T_c definen la meseta de aceleración espectral constante, T_d es el valor que define el comienzo del tramo de desplazamiento constante del espectro, B_c , es un factor que relaciona la aceleración máxima espectral con la *PGA* y *d* es un parámetro que modula la caída del espectro para períodos largos (figura 9).

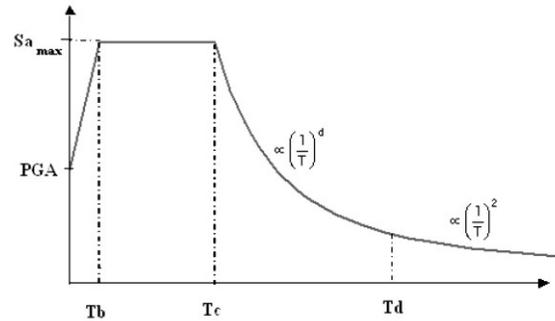


Figura 9. Definición del espectro elástico de respuesta.

PUNTOS DE CAPACIDAD POR DEMANDA O PUNTOS DE DESEMPEÑO

El comportamiento sísmico de un edificio sometido a un terremoto se puede cuantificar mediante su respuesta máxima, que se define mediante el punto de capacidad por demanda, también conocido como punto de desempeño (SD_{PD} , SA_{PD}). Este punto se obtiene mediante la intersección entre el espectro de capacidad y el espectro de demanda. El espectro de demanda se obtiene a partir del espectro de respuesta elástico con 5% de amortiguamiento, reducido para niveles mayores de amortiguamiento efectivo.

La figura 10 muestra la evaluación del punto de capacidad por demanda. En esta figura se muestra el caso del escenario probabilista en la zona II. Obsérvese cómo los espectros de demanda dependen del edificio.

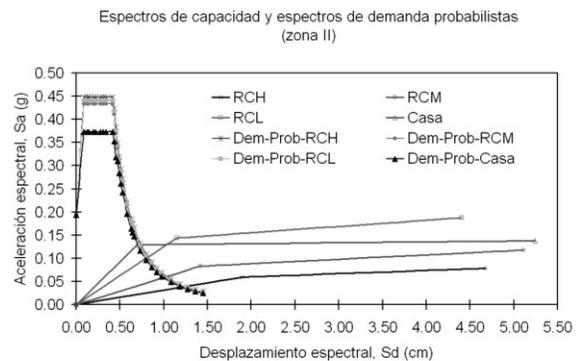


Figura 10. Obtención de los puntos de desempeño de los 4 edificios (RCH, RCM, RCL, CASA) para la demanda probabilista correspondiente a la zona II.

Las tablas 9, 10, 11 y 12 muestran los puntos de capacidad por demanda correspondientes a los edificios RCH, RCM, RCL y CASA, respectivamente. Estas tablas contienen las coordenadas espectrales del punto de capacidad por demanda y el amortiguamiento efectivo correspondiente al espectro de demanda. Para cada edificio se dan los resultados para los dos escenarios evaluados en las 4 zonas sísmicas consideradas.

Tabla 9. Puntos de desempeño: Edificio RCH.

		Edificio RCH		
Tipo Suelo	Escenario	Sd _{PD} (cm)	Sa _{PD} (g)	ζ _{efect.} (%)
Zona I	Determinista	1.35	0.0396	6.44
	Probabilista	1.55	0.0445	6.97
Zona II	Determinista	1.05	0.0328	5.62
	Probabilista	1.27	0.0377	6.26
Zona III	Determinista	0.90	0.0275	5.38
	Probabilista	1.14	0.0342	5.82
Zona IV	Determinista	0.87	0.0268	5.32
	Probabilista	1.18	0.0353	5.94

Tabla 10. Puntos de desempeño: Edificio RCM.

		Edificio RCM		
Tipo Suelo	Escenario	Sd _{PD} (cm)	Sa _{PD} (g)	ζ _{efect.} (%)
Zona I	Determinista	1.22	0.06466	7.50
	Probabilista	1.38	0.0708	8.12
Zona II	Determinista	0.87	0.0487	6.21
	Probabilista	1.05	0.0569	6.89
Zona III	Determinista	0.74	0.0423	5.67
	Probabilista	0.91	0.0507	6.372
Zona IV	Determinista	0.66	0.0380	5.37
	Probabilista	0.88	0.0488	6.17

Tabla 11. Puntos de desempeño: Edificio RCL.

		Edificio RCL		
Tipo Suelo	Escenario	Sd _{PD} (cm)	Sa _{PD} (g)	ζ _{efect.} (%)
Zona I	Determinista	1.09	0.1196	8.53
	Probabilista	1.20	0.1261	9.45
Zona II	Determinista	0.71	0.0846	5.99
	Probabilista	0.83	0.0974	6.56
Zona III	Determinista	0.59	0.0722	5.56
	Probabilista	0.70	0.0843	5.99
Zona IV	Determinista	0.48	0.0586	5.24
	Probabilista	0.61	0.0744	5.67

Tabla 12. Puntos de desempeño: Edificio CASA.

		Edificio CASA		
Tipo Suelo	Escenario	Sd _{PD} (cm)	Sa _{PD} (g)	ζ _{efect.} (%)
Zona I	Determinista	1.05	0.1318	14.37
	Probabilista	1.15	0.1344	16.52
Zona II	Determinista	0.63	0.1014	8.76
	Probabilista	0.75	0.1124	10.17
Zona III	Determinista	0.53	0.0891	7.29
	Probabilista	0.62	0.0997	8.51
Zona IV	Determinista	0.40	0.0711	5.89
	Probabilista	0.51	0.0870	7.07

MATRICES DE PROBABILIDAD DE DAÑO

Dada una acción sísmica, las matrices de probabilidad de daño se obtienen a partir del punto de desempeño (el cual está relacionado con la demanda sísmica específica y la capacidad estructural) y usando las curvas de fragilidad correspondientes. Para esto es necesario entrar en las curvas de fragilidad con el parámetro que representa la respuesta estructural (en este caso el Sd_{PD}) y obtener las probabilidades correspondientes a cada estado de daño (ED). Por lo que la probabilidad de ocurrencia para cada estado de daño se define como, ecuación 2:

$$P[ED_i / Sd] = P(ED_i / Sd) - P(ED_{i+1} / Sd) \quad (2)$$

donde:

$P[ED_i / Sd]$ es la probabilidad de que ocurra el estado de daño ED_i cuando la estructura tiene un desplazamiento espectral Sd . Así, por ejemplo, la probabilidad de que se dé el estado de daño moderado para un desplazamiento espectral Sd , vendrá dada por la diferencia entre la probabilidad del umbral de daño moderado menos la probabilidad del umbral de daño severo.

Los desplazamientos espectrales correspondientes a los puntos de desempeño, junto con las curvas de fragilidad obtenidas, han permitido evaluar, para cada edificio, para cada escenario, para cada zona y para cada estado de daño, una probabilidad de ocurrencia.

Para cuantificar los resultados de forma simplificada, se puede usar un parámetro ponderado de daño medio (D_M) definido como:

$$D_M = \sum_{i=0}^{i=4} i \cdot P(i) \quad (3)$$

donde:

i corresponde a cada estado de daño considerado y $P(i)$ es

la probabilidad de ocurrencia del estado de daño i , dado un desplazamiento espectral. El índice i toma valores de 0, 1, 2, 3 y 4 para el estado de daño: no daño, leve, moderado, severo y completo, respectivamente.

Este parámetro de daño medio tiene intervalos de variación para cada estado de daño y, además, se puede utilizar para representar escenarios de riesgo sísmico en un área determinada. Para los cinco estados de daño considerados en este trabajo (no daño, daño leve, moderado, severo y completo), la tabla 13 muestra los intervalos de variación de D_M .

Tabla 13. Intervalos de variación del parámetro de D_M .

Estados de daño	Intervalo de variación
No daño	$0 \leq D_M < 0.5$
Leve	$0.5 \leq D_M < 1.5$
Moderado	$1.5 \leq D_M < 2.5$
Severo	$2.5 \leq D_M < 3.5$
Completo	$3.5 \leq D_M \leq 4.0$

La tabla 14 muestra las matrices de probabilidad de daño de los edificios situados en la zona I, cuando sufren los terremotos correspondientes a los escenarios determinista y probabilista. Las tablas 15, 16 y 17 son análogas a la tabla 14, pero para los edificios situados en las zonas II, III y IV, respectivamente. Los umbrales de daño son representados como: 0-no daño, 1-leve, 2-moderado, 3-severo y 4-completo. Además, en estas tablas se representa el parámetro ponderado del daño medio. Se observa cómo el escenario probabilista es, en general, más dañino que el escenario determinista. El edificio CASA, representativo de una vivienda unifamiliar es el que resulta más dañado para ambos escenarios y para todos los emplazamientos.

Tabla 14. Matrices de probabilidad de daño para los edificios RCH, RCM, RCL y CASA, situados en Zona I.

Escenario Determinista Zona I						
	0	1	2	3	4	D_M
CASA	0.02	0.28	0.45	0.22	0.03	1.96
RCL	0.13	0.42	0.31	0.12	0.02	1.48
RCM	0.22	0.44	0.24	0.09	0.01	1.23
RCH	0.48	0.34	0.08	0.08	0.02	0.82
Escenario Probabilista Zona I						
	0	1	2	3	4	D_M
CASA	0.02	0.24	0.45	0.25	0.04	2.05
RCL	0.07	0.38	0.37	0.16	0.02	1.68
RCM	0.12	0.41	0.33	0.12	0.02	1.51
RCH	0.29	0.42	0.14	0.11	0.04	1.19

0-No daño, 1-Leve, 2-Moderado, 3-Severo, 4-completo

Las tablas 14, 15, 16 y 17 contienen el factor de daño medio D_M que da una idea global del nivel o estado de daño más probable. Este factor de daño medio se va a utilizar para discutir los resultados obtenidos.

Tabla 15. Matrices de probabilidad de daño para los edificios RCH, RCM, RCL y CASA, situados en Zona II.

Escenario Determinista Zona II						
	0	1	2	3	4	D_M
CASA	0.18	0.42	0.30	0.09	0.01	1.33
RCL	0.67	0.23	0.07	0.03	0.00	0.46
RCM	0.68	0.23	0.06	0.03	0.00	0.44
RCH	0.80	0.15	0.01	0.03	0.01	0.30
Escenario Probabilista Zona II						
	0	1	2	3	4	D_M
CASA	0.08	0.38	0.40	0.13	0.01	1.61
RCL	0.46	0.35	0.14	0.04	0.01	0.79
RCM	0.43	0.37	0.15	0.042	0.01	0.83
RCH	0.56	0.30	0.06	0.06	0.02	0.68

0-No daño, 1-Leve, 2-Moderado, 3-Severo, 4-completo

Tabla 16. Matrices de probabilidad de daño para los edificios RCH, RCM, RCL y CASA, situados en Zona III.

Escenario Determinista Zona III						
	0	1	2	3	4	D_M
CASA	0.42	0.34	0.17	0.07	0.00	0.89
RCL	0.85	0.22	0.02	0.02	0.00	0.32
RCM	0.84	0.28	0.03	0.01	0.00	0.37
RCH	0.92	0.22	0.00	0.02	0.00	0.28
Escenario Probabilista Zona III						
	0	1	2	3	4	D_M
CASA	0.20	0.40	0.31	0.08	0.01	1.30
RCL	0.68	0.02	0.07	0.03	0.00	0.25
RCM	0.61	0.03	0.08	0.03	0.00	0.28
RCH	0.70	0.00	0.03	0.04	0.01	0.22

0-No daño, 1-Leve, 2-Moderado, 3-Severo, 4-completo

Tabla 17. Matrices de probabilidad de daño para los edificios RCH, RCM, RCL y CASA, situados en Zona IV.

Escenario Determinista Zona IV						
	0	1	2	3	4	D_M
CASA	0.76	0.18	0.02	0.04	0.00	0.34
RCL	0.96	0.03	0.01	0.00	0.00	0.05
RCM	0.92	0.06	0.01	0.01	0.00	0.11
RCH	0.93	0.05	0.00	0.02	0.00	0.11
Escenario Probabilista Zona IV						
	0	1	2	3	4	D_M
CASA	0.47	0.34	0.13	0.06	0.00	0.78
RCL	0.83	0.12	0.03	0.02	0.00	0.24
RCM	0.67	0.24	0.07	0.02	0.00	0.44
RCH	0.66	0.24	0.04	0.04	0.02	0.52

0-No daño, 1-Leve, 2-Moderado, 3-Severo, 4-completo

Se observa cómo el factor de daño medio varía entre 0.05 y 2.05. El daño prácticamente nulo (0.05) se obtiene para los edificios RCL situados en la zona IV y sometidos al escenario determinista. El factor D_M de 2.05 corresponde a un estado de daño moderado, y se da en los edificios tipo CASA situados en el suelo blando (zona I) cuando se hallan sometidos al escenario sísmico probabilista.

Los edificios situados en la zona I sufren más daños. Se observa una disminución drástica del daño en los edificios situados en la zona II. La disminución del daño es más gradual entre las zonas II y la zona IV. En las zonas IV, I y II el escenario probabilista es más fuerte que el determinista. En la zona III los daños esperados son parecidos para ambos escenarios.

CONCLUSIÓN

Los espectros de capacidad obtenidos reflejan el comportamiento frágil de este sistema estructural, en las figuras 3 y 10 se puede observar que, para los modelos aquí estudiados, el desplazamiento último (D_u) obtenido es bajo para estos edificios (4.5cm – 5.0cm). A partir del desplazamiento último la estructura falla debido al mecanismo plástico desarrollado durante el análisis. La tabla 5 permite observar la baja ductilidad (2.45, 3.8) que estos edificios presentan. La normativa sísmica española (NCSE-02, 2002) limita la ductilidad de este tipo de estructuras a 2. No obstante, se debe tener en cuenta que estos edificios se encuentran localizados en una zona de sismicidad baja, razón por la cual los edificios pudieron soportar el terremoto de diseño sin una demanda de ductilidad significativa.

Con las matrices de probabilidad obtenidas del análisis

aquí presentado se observa cómo, en todos los casos, los edificios más bajos (RCL y CASA) son los que presentan más daños. Este hecho, que parece sorprendente, puede ser debido a la mayor rigidez de estos edificios que causa que los estados de daño leve y moderado aparezcan para desplazamientos espectrales pequeños. Este efecto se observa con claridad en las curvas de fragilidad de estos edificios bajos comparadas con los más altos que son más flexibles (figuras 5, 6, 7, 8). Sin duda, las características de los espectros de demanda (figura 10) que tienen una banda (de aceleración constante) estrecha, escorada hacia las altas frecuencias, contribuyen a aumentar el daño en estos edificios más bajos y más rígidos.

Los resultados aquí mostrados reflejan el buen comportamiento de esta tipología ante un evento sísmico de estas características (espectros de respuesta del IGC). Se observó cómo los edificios más bajos tienen un mayor índice de daño, lo cual puede ser debido a que los edificios de poca altura poseen mayor rigidez y menos masa que los edificios altos, por lo cual, el período es más bajo y las aceleraciones espectrales aumentan. En las tablas 9, 10, 11 y 12 se observa cómo la aceleración espectral correspondiente a los puntos de capacidad por demanda aumenta, y los desplazamientos espectrales decrecen al disminuir el número de niveles de los edificios. También se observa cómo el amortiguamiento efectivo aumenta a medida que disminuye el número de pisos, lo que puede estar relacionado con la disipación de energía de los edificios. Para una misma acción sísmica definida por medio de un espectro de demanda, las estructuras bajas se acercan más a los períodos cortos que los edificios altos. Finalmente, se concluye que las estructuras aquí analizadas presentan un comportamiento adecuado, ya que llegarían a sufrir, principalmente, daños leves. A partir de aquí, es posible construir mapas de riesgo sísmico para estimar una distribución espacial del daño esperado.

La metodología aquí aplicada se basa en el análisis estático no lineal y en el método del espectro de capacidad y ha permitido, de una manera fiable en el campo probabilista, evaluar la vulnerabilidad sísmica mediante curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el Ministerio de Ciencia y Tecnología de España y con fondos FEDER (proyectos de investigación: REN2001-2418-C04-01) y por la Comisión Europea (proyecto RISK-UE, contrato N° EVK-4-2000-00513). Los autores desean expresar su agradecimiento al Ingeniero Vicente Alegre por su ayuda desinteresada.

REFERENCIAS

- ATC-40: APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL (1996). Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. Report: SSC 96-01, Seismic Safety Commission, volume 1, Redwood City, California.
- BAIRÁN, J. (2000). BCSEC: Programa computacional para el cálculo de características mecánicas no lineales de secciones y piezas arbitrarias. Departamento de Ingeniería de la Construcción, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- BARBAT, A., PUJADES, L., LANTADA, N., MORENO, R. (2008). Seismic damage evaluation in urban areas using a capacity spectrum based method: Application to Barcelona. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28 (10-11), pp. 851-865. Corrigendum 2010, 30, p. 767.
- CARR, A. (2000). RUAUMOKO: Inelastic dynamic analysis program and Post-processor for RUAUMOKO: Dynaplot. Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Nueva Zelanda.
- CATTARI, S., GALASCO, A., LAGOMARSINO, S., PENNA, A. (2004). Analisi non lineare di edifici in muratura con il programma TREMURI. XI Congresso Nazionale L'Ingegneria Sismica in Italia, Genova.
- CID, J. (1998). Zonificación sísmica de la ciudad de Barcelona basada en métodos de simulación numérica de efectos locales. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, p. 215.
- EUROCÓDIGO 2 (1992). Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas Generales y Reglas Generales para Edificación, AENOR, España.
- FAJFAR, P., GASPERSIC, P. (1996). The N2 method for the seismic damage analysis for RC buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25, pp. 23-67.
- FEMA 273: FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (1996). NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings. Report FEMA-273, Washington, D.C.
- FEMA 273: FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (1997). NEHRP Commentary on the guidelines for the seismic rehabilitation of buildings. Report FEMA-274, Washington, D.C.
- FREEMAN, S. (1998). Development and use of capacity spectrum method. Proceedings of the 6th National Conference on Earthquake Engineering, Seattle, CD-ROM, EERI, Oakland.
- HAZUS-99: EARTHQUAKE LOSS ESTIMATION METHODOLOGY (1999). Earthquake Loss Estimation Methodology. Technical Manual, Vol. 1, Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington.
- IRIZARRY, J., GOULA, X., SUSAGNA, T. (2003). Analytical formulation for the elastic acceleration-displacement response spectra adapted to Barcelona soil conditions. Technical Report, Instituto Geográfico de Cataluña, p. 48.
- LAGOMARSINO, S., PENNA, A. (2003). Guidelines for the implementation of the II level vulnerability methodology. WP4: Vulnerability assessment of current buildings. Technical presentation RISK-UE project: An advanced approach to earthquake risk scenarios with application to different European towns, Francia.
- MORENO, R., BAIRÁN, J., PUJADES, L., APARICIO, A., BARBAT, A. (2004). Evaluación probabilista del comportamiento sísmico de edificios porticados de hormigón armado. *Revista Hormigón y Acero*, 231, pp. 125-136.
- MORENO, R. (2006). Evaluación del riesgo sísmico en edificios mediante análisis estático no lineal. Aplicación a diversos escenarios sísmicos de Barcelona. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, p. 331.
- MORENO, R., PUJADES, L., APARICIO, A., BARBAT, A. (2007). Herramientas necesarias para la evaluación sísmica de edificios. *Monografías de Ingeniería Sísmica*, IS-59, p. 106.
- NCSE-02 NORMATIVA (2002). Norma de construcción sismorresistente: Parte general y edificación. Real Decreto 997/2002, Boletín Oficial del Estado: 244, Madrid, España.
- PARK, R., PAULAY, T. (1994). Estructuras de concreto reforzado. Editorial Limusa, 2da. Edición, México.
- WILSON, E., HABIBULA, H. (2002). SAP2000: Static and dynamic finite element analysis of structures non linear. Computers and Structures, Inc. Berkeley, California, USA.