

# Capítulo 6

## Aplicación a Barcelona en edificios de hormigón armado

### 6.1. Introducción

En este capítulo se aplica la metodología descrita en el *Capítulo 4* para el análisis del comportamiento sísmico de los edificios de hormigón armado típicos de Barcelona.

Para ello se describe el comportamiento estructural del hormigón y los edificios de hormigón armado con forjados reticulares (conocidos en inglés como *waffle slabs*). El uso del hormigón armado en la construcción de viviendas en Barcelona data de los años 60. Esta forma constructiva ha sustituido totalmente a la obra de fábrica, de forma que en el año 1996, aproximadamente, el 20% de los edificios residenciales de la ciudad eran de hormigón armado. La progresiva sustitución de edificios antiguos por edificios de nueva construcción hace crecer, año tras año, este porcentaje. Al amparo de la norma EH-73, a partir de los años 70, se empiezan a usar los llamados forjados reticulares. Este tipo de forjado pertenece al grupo de los llamados forjados planos, y son placas nervadas en dos direcciones ortogonales que usan bloques

de aligeramiento para disminuir el peso de las losas.

Para efectuar un estudio del riesgo sísmico de Barcelona, se han clasificado sus edificios de hormigón armado en tres categorías: altos, de altura mediana y bajos. En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de su caracterización sísmica, para la que se ha empleado el método del espectro de capacidad.

Se han modelado 3 edificios representativos de los edificios altos, de altura mediana y bajos. Se consideran edificios altos aquellos con 8 o más pisos. Los edificios que tienen entre 4 y 7 pisos se consideran de altura media. Finalmente, los edificios con menos de 4 plantas se consideran bajos. Así pues, los edificios tipo modelados han sido de 8, 5 y 3 plantas. El modelo del edificio de 8 plantas se ha definido a partir de los planos estructurales. El edificio de 5 pisos se ha modelado en base al de 8, donde se ha considerado su misma planta, pero sus propiedades estructurales se han modificado atendiendo a criterios ingenieriles y a las características de los edificios de altura intermedia de la ciudad. De forma análoga se ha procedido para definir el modelo de 3 plantas.

En los barrios residenciales del área urbana de Barcelona, existen numerosas viviendas unifamiliares. Estas viviendas suelen ser de una planta relativamente pequeña y de dos pisos de altura. Este tipo de casas son significativamente distintas de los edificios de hormigón considerados como bajos, pero que contienen diferentes viviendas o apartamentos. Para tener en cuenta las peculiaridades de este tipo de viviendas unifamiliares, se ha definido un modelo específico. Para ello, también se han empleado los planos estructurales y arquitectónicos de una casa unifamiliar.

En este capítulo, los acrónimos RCH, RCM y RCL son utilizados para hacer referencia, respectivamente, a los edificios multifamiliares altos, medianos y bajos. El término CASA se reserva para la vivienda unifamiliar.

Los espectros de capacidad se obtienen a partir de un análisis estático no

lineal. Se considerará la forma bilineal simplificada del espectro de capacidad, de esta forma cada edificio estará caracterizado por dos puntos: el punto de capacidad de cedencia y el punto de capacidad última. Los espectros bilineales se usarán para estimar curvas de fragilidad mediante el método simplificado expuesto en el *Capítulo 4*.

Se consideraran los dos escenarios sísmicos elegidos para estimar el riesgo sísmico de la ciudad de Barcelona para obtener los puntos de desempeño correspondientes a los escenarios determinista y probabilista. Para ello se usarán los espectros de respuesta desarrollados por el Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC) que, además de la acción sísmica básica, tienen en cuenta la zonificación sísmica de Barcelona (ver *Capítulo 3*).

Los puntos de desempeño correspondientes a los escenarios utilizados, junto con las curvas de fragilidad se usarán para obtener las matrices de probabilidad de daño correspondientes a los 2 escenarios sísmicos considerados. Se muestra también un ejemplo de escenario de daño sísmico esperado en un distrito de Barcelona, obtenido al aplicar las matrices de probabilidad de daño aquí obtenidas, al conjunto de edificios de hormigón armado que contiene.

## 6.2. Comportamiento estructural del hormigón

Para un buen comportamiento sísmico, las estructuras deben mantener su capacidad de carga para deformaciones superiores a la de cedencia, ya que la zona de comportamiento inelástico es importante para disipar la energía introducida por el sismo. Este efecto de disipación de energía producido por el comportamiento histerético de la estructura de un edificio debe evaluarse con precisión, partiendo de un análisis inelástico. Parte de esa energía introducida por el sismo es absorbida de forma elástica, mientras que la otra es disipada gracias a la ductilidad.

La ductilidad perfecta corresponde al modelo ideal elastoplástico de Paulay y

Priestley (1992). En zonas sísmicas conviene que las estructuras desarrollen lazos de histéresis con gran disipación de energía como se muestra en la figura 6.1a; es decir, que la curva contenga un área grande y que el nivel de carga se mantenga después de varios ciclos. Si la rigidez en el rango elástico se deteriora, se reduce notablemente la capacidad de disipación de energía (figura 6.1b). Además, si la resistencia se deteriora con el número de ciclos, se produce un daño excesivo que compromete el estado límite de no colapso, figura 6.1c, (Bazán y Meli, 1999)

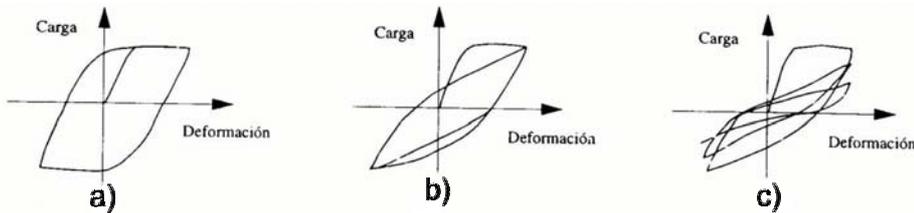


Figura 6.1: Lazos de histéresis típicos de diferentes modalidades de comportamiento estructural.

El diseño sísmico se orienta a satisfacer los requerimientos de ductilidad que permiten alcanzar deformaciones más grandes que la de cedencia, sin un deterioro importante de la resistencia o rigidez. Así la estructura incursiona en el rango no lineal y es capaz de disipar energía. En otras palabras, una estructura tiene ductilidad cuando es capaz de responder inelásticamente sin degradación significativa de rigidez durante un sismo severo.

El análisis del comportamiento de los elementos estructurales, vigas y columnas, requiere conocer las relaciones momento-curvatura. Éstas a su vez, requieren la relación tensión-deformación de los materiales.

Así pues, entre otras cosas, la respuesta no lineal de una estructura depende de los materiales y del comportamiento de sus principales elementos estructurales. Las características del material tienen un papel importante en la respuesta sísmica de una estructura; éstos influyen en las fuerzas de inercia, los períodos de vibración y en la rigidez lateral de la estructura.

Las curvas tensión-deformación del hormigón no confinado ponen de manifiesto su comportamiento frágil. Para un hormigón de alta resistencia, la deformación máxima a compresión es aproximadamente 0.002, mientras que para hormigones de baja resistencia las deformaciones están aproximadamente entre 0.003 y 0.004; para estas deformaciones ocurre un fallo por aplastamiento.

El comportamiento frágil del hormigón se puede reducir o eliminar mediante confinamiento. Se ha comprobado que este confinamiento proporciona ductilidad mediante las armaduras transversales. El efecto del confinamiento es incrementar la resistencia a compresión y la deformación última del hormigón, como se ilustra en la figura 6.2. A niveles de carga próxima a su resistencia característica, el hormigón tiende a expandirse transversalmente por agrietamiento. La armadura transversal tiende a impedir esta deformación por el efecto Poisson, sometiéndolo a un estado triaxial de tensiones. En la figura 6.2 se muestra el modelo tensión-deformación para carga monotónica del hormigón confinado y no confinado en compresión (Paulay y Priestley, 1992).

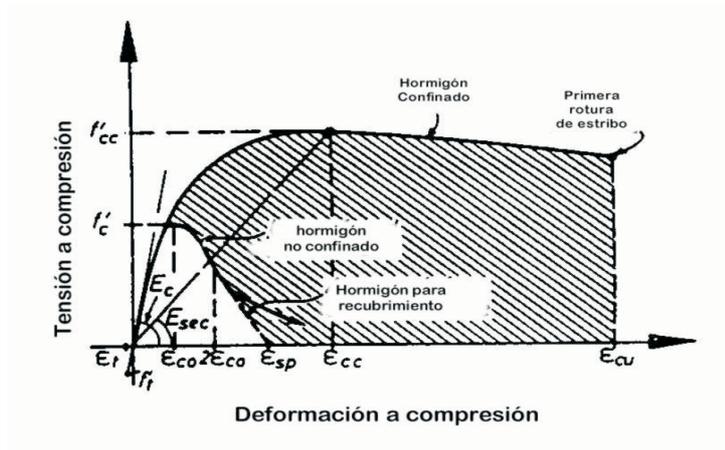


Figura 6.2: Modelo tensión-deformación para carga monotónica del hormigón confinado y no confinado en compresión.

En esta figura, la deformación a compresión se denota por  $\epsilon_c$  y la tensión

a compresión por  $f_c$ .  $f'_c$  es la resistencia a compresión del hormigón,  $f'_{cc}$  es la resistencia a compresión del hormigón confinado,  $f'_t$  es la resistencia a tracción del hormigón,  $\epsilon_{cu}$  es la deformación última a compresión,  $\epsilon_{cc}$  es la deformación a compresión del hormigón confinado en la tensión máxima.

El acero tiene curvas típicas de tensión-deformación, con una sección de comportamiento elástico lineal con módulo de elasticidad ( $E_s$ ) aproximadamente de 200 GPa, una meseta de cedencia, una región de endurecimiento por deformación, que los aceros estructurales presentan en mayor o menor grado, y una región donde el esfuerzo decae hasta que ocurre la fractura. A falta de datos experimentales, se puede adoptar el diagrama característico para armaduras pasivas (EHE-99, 1999) que se muestra en la figura 6.3. En esta figura, el límite elástico característico del acero,  $f_{yk}$ , produce una deformación remanente,  $\epsilon_y$ , de 0.002.  $\epsilon_s$  es la deformación del acero a tracción.  $\epsilon_{max}$  es la deformación máxima del acero, que corresponde a  $f_{max}$ .

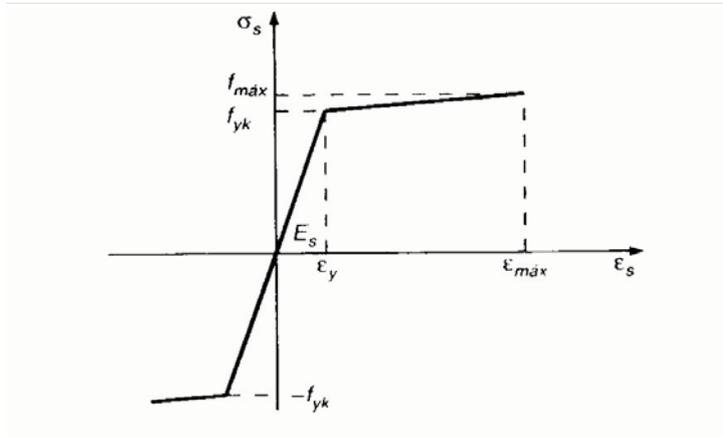


Figura 6.3: Diagrama tensión-deformación para el acero de refuerzo.

### 6.3. Edificios de hormigón armado con forjados reticulares

Las estructuras aquí evaluadas son edificios de hormigón armado con forjados reticulares. Los modelos estructurales están basados en planos estructurales de edificios reales, existentes actualmente en Barcelona.

Los forjados reticulares, pertenecen a la familia de losas bidireccionales. Son placas nervadas armadas en dos direcciones ortogonales. En este tipo de forjados, alrededor de los pilares, se prescinde de los bloques de aligeramiento y la placa pasa a ser maciza, desapareciendo los nervios como tales.

Los modelos estructurales de forjados reticulares admiten que sus flexiones puedan ser descompuestas y analizadas siguiendo las dos direcciones de armado. Con las columnas forman una estructura espacial capaz de resistir, adecuadamente, las cargas verticales, en cambio la capacidad de resistencia a cargas horizontales es menor. En los forjados reticulares las cargas verticales se transfieren a los pilares a través de los nervios, siguiendo trayectorias rectilíneas ortogonales quebradas (Regalado, 2003).

Los parámetros que definen las características del forjado reticular son el canto total de la losa, la altura del casetón de aligeramiento, la separación entre ejes de nervios, el espesor básico de los nervios y el espesor de la capa de compresión.

Para el análisis de una estructura con forjado reticular existen 3 *filosofías* de cálculo (Regalado, 2003):

- La primera consiste en discretizar el forjado en dinteles que, a semejanza de las vigas entre pilares, se pueden calcular por métodos aproximados directos o mediante pórticos equivalentes (virtuales). Debido a su sencillez es el más utilizado.
- La segunda forma de abordar el análisis se basa en el método matricial

del emparrillado plano. Considera la placa del forjado como una malla empotrada elásticamente en los pilares. Este tipo de análisis da resultados muy precisos, pero no permite el análisis de acciones horizontales.

- La tercera filosofía considera la estructura tal como es: un conjunto de emparrillados planos unidos verticalmente por los pilares, es decir, un entramado espacial. Con este método se eleva el número de incógnitas y es importante considerar hipótesis que simplifiquen el proceso de cálculo.

En este estudio se ha optado por la primera de estas tres filosofías. Con todo, para poder modelar los edificios como pórticos se realizó un análisis previo, de acuerdo a la tercera filosofía descrita anteriormente, con un programa de cálculo de estructuras tridimensional (SAP2000, 2002), que permite el análisis de estructuras reticulares planas, cargadas perpendicularmente en su plano. Allí se pudo observar cómo, en los nervios cercanos a las alineaciones de los soportes se concentran los momentos más importantes del forjado.

## 6.4. Capacidad

Las estructuras se modelaron mediante un sistema de pórticos. Un estudio previo con el programa SAP2000 (2002) permitió analizar la concentración de esfuerzos en la losa. Este trabajo previo, permitió definir un ancho efectivo de las vigas, de forma que, un edificio porticado, representara bien un edificio de forjados reticulares.

La figura 6.4 muestra una sección de forjado reticular típica de los edificios aquí estudiados.

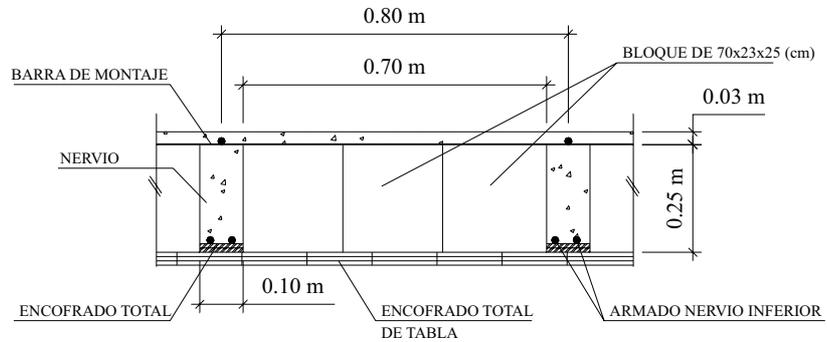


Figura 6.4: Sección de un forjado típico de los edificios estudiados.

### 6.4.1. Características de los edificios

Los edificios RCH, RCM y RCL tienen las mismas dimensiones en planta, pero distintas alturas. La figura 6.5 muestra la planta de los edificios, mientras que las figuras 6.6, 6.7 y 6.8, respectivamente, muestran los alzados de uno de los pórticos correspondientes a la dirección del análisis.

Como se observa en la figura 6.5 la planta es rectangular con dimensiones 21.90m x 25.65m. Con un área de 561.7 m<sup>2</sup>. La Tabla 6.1 especifica las dimensiones en altura de los edificios estudiados.

Tabla 6.1. Características en alzado de los edificios analizados.

Edificios	Nº niveles	Altura	Alturas piso (m)		
		Total	planta baja	1er piso	resto
RCH	8	24.0m	2.85	2.85	3.05
RCM	5	15.8m	3.80	3.00	3.00
RCL	3	9.8m	3.80	3.00	3.00
CASA	2	5.2m	2.60	2.60	-

La Tabla 6.1 muestra también las características en altura de la vivienda unifamiliar de 2 pisos.

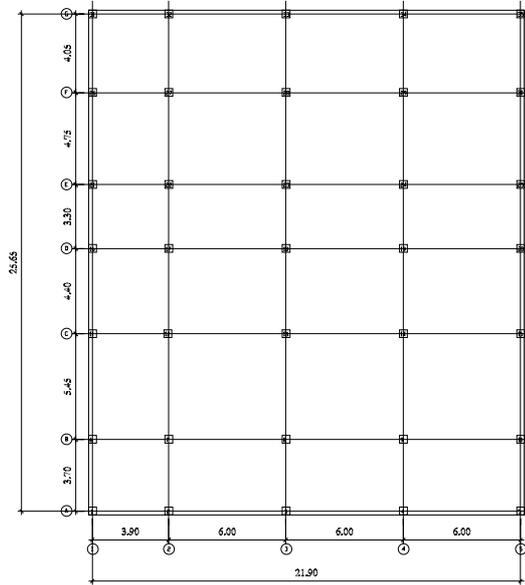


Figura 6.5: Planta de los edificios estudiados.

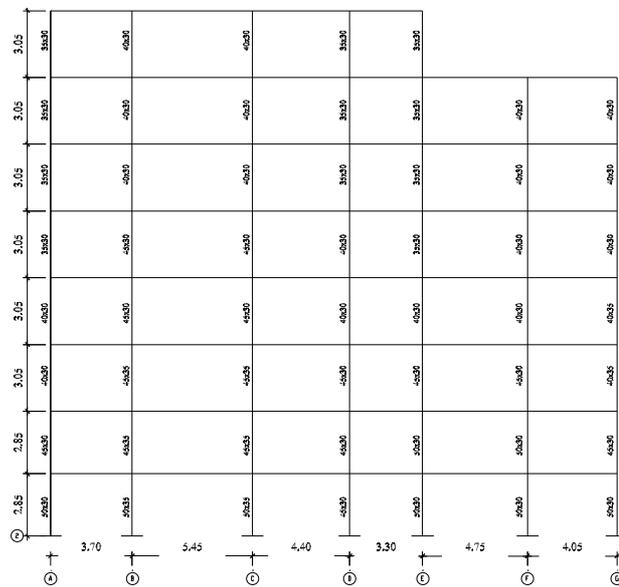


Figura 6.6: Alzado del pórtico 2 del edificio RCH.

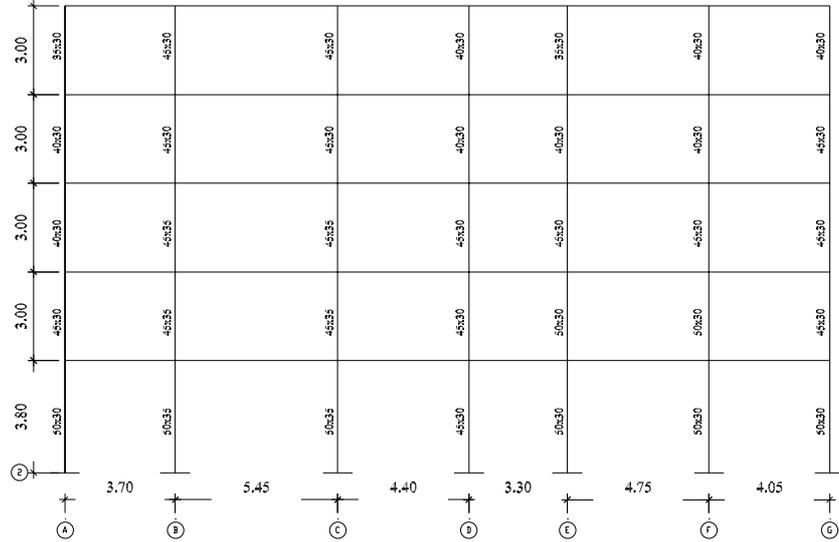


Figura 6.7: Alzado de uno de los pórticos del edificio RCM.

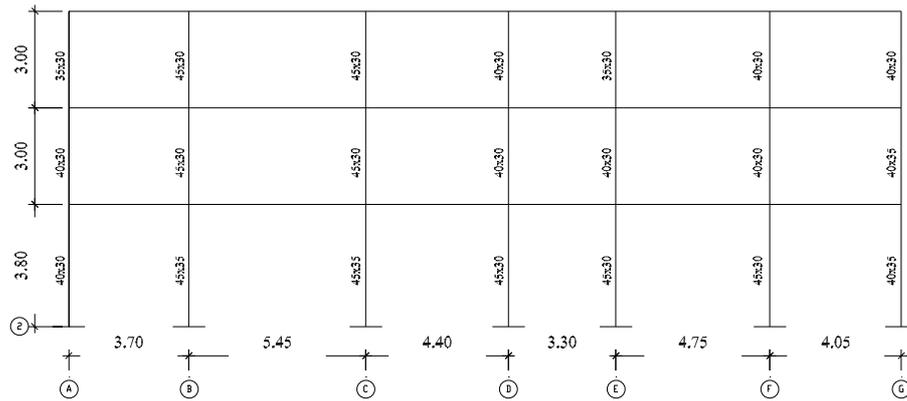
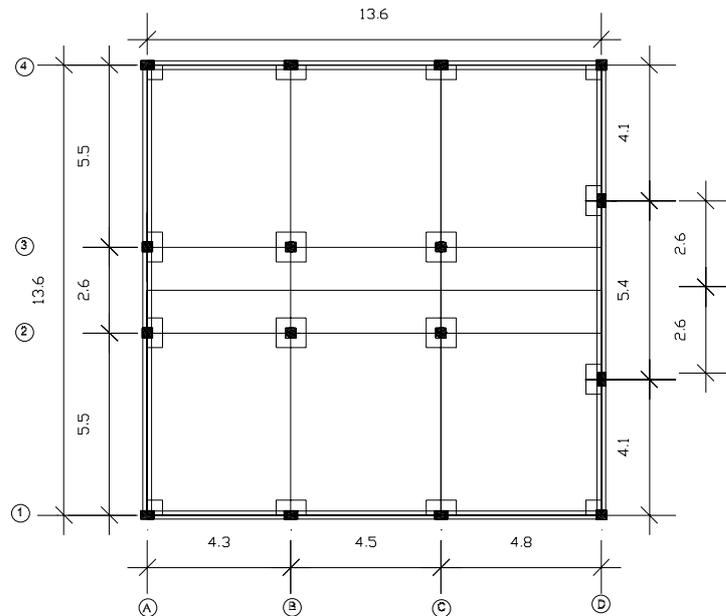


Figura 6.8: Alzado de uno de los pórticos del edificio RCL.

Esta casa tiene una planta cuadrada de área de  $184.96 \text{ m}^2$ . La figura 6.9 muestra la planta y el alzado en la dirección del análisis.



PLANTA BAJA - CASA

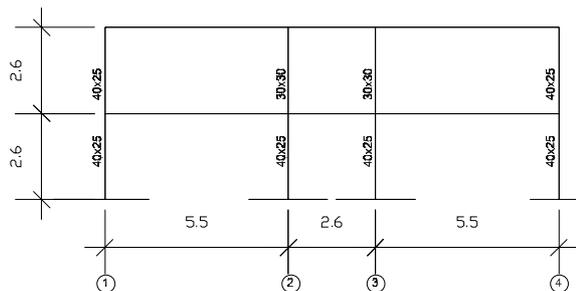


Figura 6.9: Planta (arriba) y alzado en la dirección del análisis (abajo) de la vivienda unifamiliar de 2 pisos.

Las dimensiones en altura de los diferentes niveles son muy frecuentes en los edificios destinados a viviendas en Barcelona. Es frecuente que la planta baja sea más diáfana y que se dedique a comercios, bares o restaurantes. En

edificios altos también es frecuente hallar oficinas en las primeras plantas, que, en estos casos, tienen las mismas dimensiones que la planta baja, estos son llamados entresuelos. Los pisos superiores suelen dedicarse a vivienda. Así pues, las peculiaridades características de los 2 primeros niveles de estos edificios, pueden producir el conocido efecto de “*piso blando o piso debil*”.

Para el análisis, las propiedades mecánicas consideradas se resumen en la Tabla 6.2:

Tabla 6.2. Propiedades mecánicas adoptadas en este estudio.

Parámetro	Valor
Resistencia característica del hormigón, $f_{ck}$	$20N/mm^2$
Módulo elástico del hormigón, $E_c$	$30000N/mm^2$
Módulo de cortante del hormigón, $G$	$12500N/mm^2$
Límite elástico característico del acero, $f_{yk}$	$500N/mm^2$
Módulo elástico del acero, $E_{s_{max}}$	$210000N/mm^2$

#### 6.4.2. Espectros de capacidad

Para estimar el espectro de capacidad de los edificios, se han modelado las estructuras en dos dimensiones. Cada modelo se obtiene colocando los sucesivos pórticos, en la dirección del análisis, de forma adyacente, es decir, se colocan los pórticos uno al lado del otro. Para el análisis se consideró que la rigidez del forjado, en su plano, es infinita y por lo tanto, que los movimientos horizontales del mismo son iguales para cada piso. El programa RUAUMOKO (Carr, 2000) permite el análisis estático y dinámico no lineal de estructuras y ha sido escogido para este trabajo debido a que goza de un notable reconocimiento en el ámbito del análisis estructural no lineal. La Tabla 6.3 muestra las dimensiones características de los elementos del modelo.

Tabla 6.3. Secciones estructurales.

Elemento estructural	Dimensiones típicas
Abacos	2.40m × 2.40m
Columnas	entre 0.30m × 0.35m y 0.50m × 0.35m
Vigas	1.20m × 0.28m
interiores	1.30m × 0.28m
equivalentes	1.24m × 0.28m
Vigas perimetrales equivalentes	0.80m × 0.28m
Espesor losa	0.28m
Ancho nervios	0.10m

En la Tabla 6.3 se muestran también las dimensiones típicas de las vigas equivalentes, tanto interiores como de borde, del modelo porticado.

El programa RUAUMOKO requiere conocer los diagramas momento-curvatura, para vigas y columnas. Se ha utilizado el programa BCSEC (Bairán, 2000) para su obtención. A este programa se le ha incorporado un módulo que permite obtener, de forma directa, los puntos requeridos por el RUAUMOKO.

La figura 6.10 muestra un modelo 2D correspondiente al edificio RCH. En esta figura, también se puede observar el mecanismo plástico desarrollado durante el análisis.

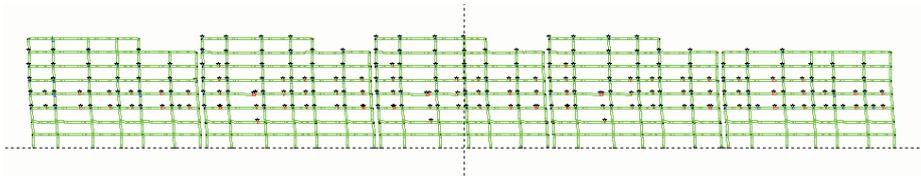


Figura 6.10: Modelo 2D del edificio RCH. Mecanismo plástico desarrollado durante el análisis.

El análisis efectuado, tiene en cuenta la variabilidad de las propiedades mecánicas de los materiales. Para ello, se ha supuesto que los parámetros  $f_{ck}$ ,  $E_c$ ,  $f_{yk}$  y  $E_{s_{max}}$  descritos en la Tabla 6.2, son variables aleatorias. La

Tabla 6.4 muestra el tipo de distribución de probabilidad que se ha supuesto, así como los parámetros que los definen.

Tabla 6.4. Caracterización de los parámetros de la Tabla 6.2 que se han supuesto como variables aleatorias.

Variables	Distribución	Media	Cov
$f_{ck}$	Normal	$20N/mm^2$	0,15
$E_c$	Normal	$30000N/mm^2$	0,15
$f_{yk}$	Lognormal	$510N/mm^2$	0,11
$E_{smax}$	Normal	$210000N/mm^2$	0,09

Así pues, la obtención de los espectros de capacidad se ha efectuado mediante una simulación por Monte Carlo. Para ello se han generado 100 muestras de las variables de la Tabla 6.4 compatibles con las correspondientes distribuciones de probabilidad. El programa STAC (Zárate et al., 2002) se ha utilizado para generar las muestras.

Por otra parte, no se consideran edificios adyacentes por lo que no se consideran posibles efectos de golpeto.

La Tabla 6.5 muestra las características modales medias de los edificios analizados. Donde,  $T$  es el período propio,  $\alpha_1$  es el factor de contribución de la masa efectiva del primer modo y  $\Gamma$  es el factor de participación modal.

Tabla 6.5. Características modales de los edificios analizados.

Tipo	T (seg)	$\alpha_1$	$\Gamma$
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 6.11 muestra los espectros de capacidad para los 4 edificios analizados. Se observa cómo los edificios bajos son más rígidos y presentan una mayor capacidad.

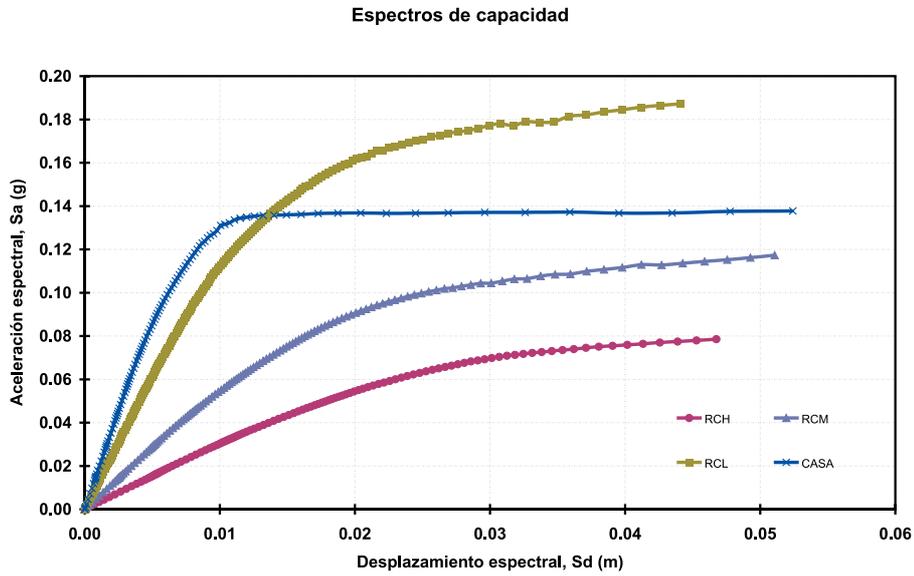


Figura 6.11: Espectros de capacidad en formato ADRS.

La Tabla 6.6 muestra los parámetros que definen la forma bilineal de los espectros de capacidad de la figura 6.11. La figura 6.12 muestra los espectros de capacidad bilineales correspondientes a los espectros de la figura 6.11 y a los valores de la Tabla 6.6.

Tabla 6.6. Parámetros que definen la forma bilineal del espectro de capacidad de los edificios de hormigón armado típicos de Barcelona.

Tipo	Capacidad cedencia		Capacidad última	
	Dy (m)	Ay (g)	Du (m)	Au (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

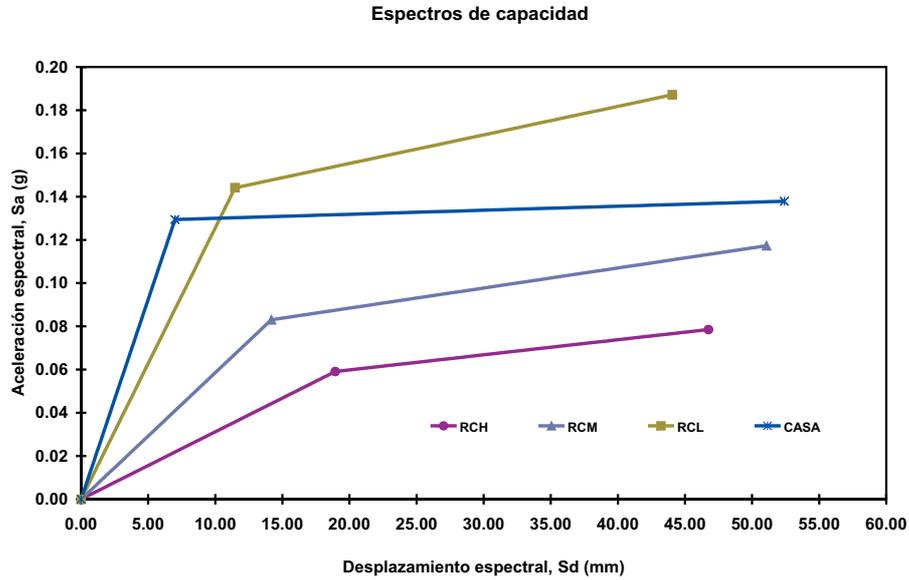


Figura 6.12: Espectros de capacidad bilineal.

## 6.5. Fragilidad

El método simplificado expuesto en el *Capítulo 4* ha permitido obtener curvas de fragilidad. La hipótesis de una distribución de probabilidad lognormal, permite definir cada curva de fragilidad mediante dos parámetros: el valor medio y la desviación estándar. La Tabla 6.7 muestra los parámetros obtenidos para los 4 edificios analizados. Se dan los valores medios y la desviación típica de la función lognormal acumulativa.

Tabla 6.7. Parámetros que definen las curvas de fragilidad de los 4 edificios analizados.

	$\bar{S}d_1(cm)$	$\beta_1$	$\bar{S}d_2(cm)$	$\beta_2$	$\bar{S}d_3(cm)$	$\beta_3$	$\bar{S}d_4(cm)$	$\beta_4$
RCH	1.33	0.28	1.89	0.29	2.59	0.34	4.68	0.45
RCM	0.993	0.28	1.42	0.36	2.34	0.50	5.11	0.61
RCL	0.803	0.28	1.15	0.37	1.96	0.53	4.41	0.63
CASA	0.490	0.28	0.70	0.37	1.84	0.75	5.24	0.83

Las figuras 6.13, 6.14, 6.15, 6.16 muestran las curvas de fragilidad obtenidas, respectivamente, para los edificios RCH, RCM, RCL y CASA.

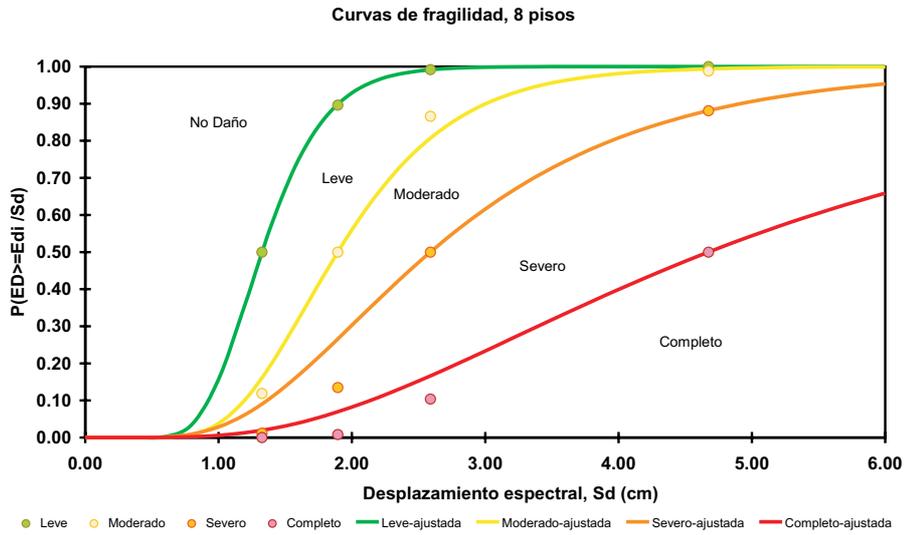


Figura 6.13: Curvas de fragilidad, RCH.

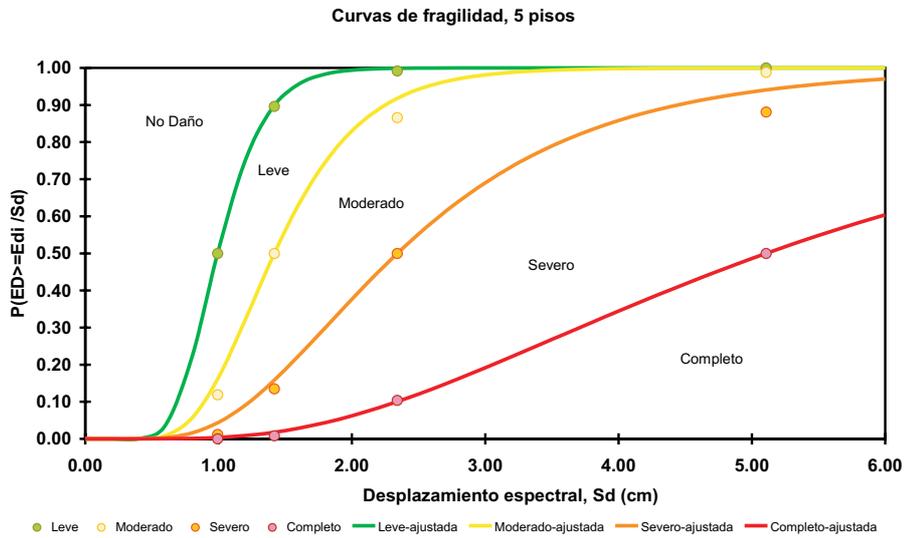


Figura 6.14: Curvas de fragilidad, RCM.

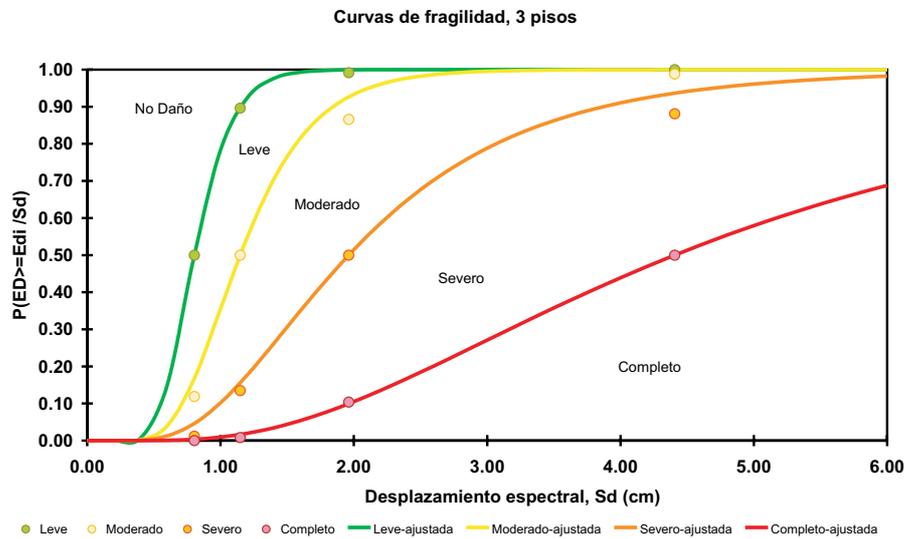


Figura 6.15: Curvas de fragilidad, RCL.

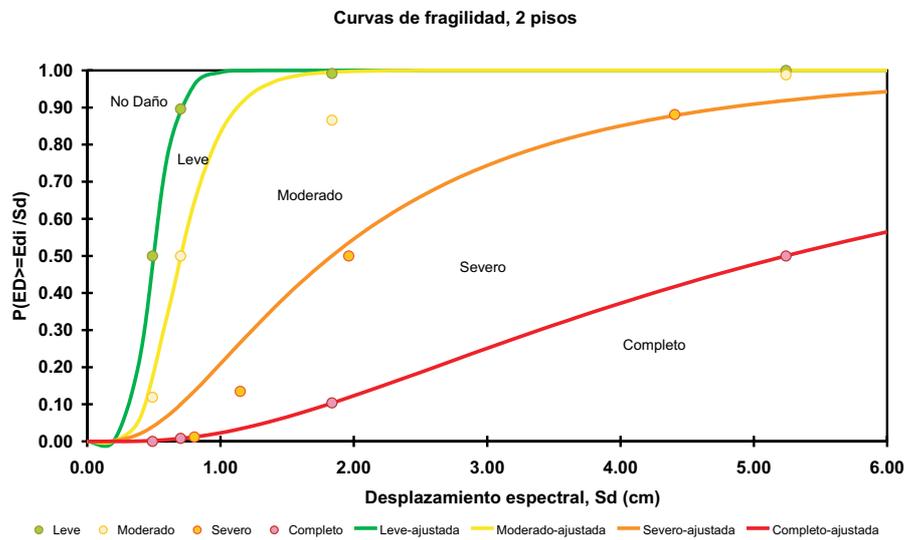


Figura 6.16: Curvas de fragilidad, CASA.

## 6.6. Escenarios sísmicos

Una vez caracterizados los cuatro edificios representativos de hormigón armado, mediante sus espectros de capacidad y sus curvas de fragilidad, en este apartado se consideran dos terremotos cuya ocurrencia en Barcelona es creíble. Como se indicó en el *Capítulo 3*, dedicado a la acción sísmica, el primer terremoto se ha estimado mediante técnicas deterministas, mientras que el segundo se ha estimado mediante métodos probabilistas. El escenario probabilista, aquí analizado, es representativo del terremoto con una probabilidad de ocurrencia del 10% en 50 años, o, en términos de períodos de retorno, es aquel con un período de retorno de 475 años. Para ambos escenarios se dispone de espectros de respuesta elásticos con un amortiguamiento del 5% para las 4 zonas sísmicas en que han sido zonificados los suelos de Barcelona, dichos suelos son referidos como Zona R, Zona I, Zona II y Zona III. La zona R 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. Las zonas II y III son zonas de transición entre la I y la R. 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 R.

Así pues, en esta sección se describe el comportamiento sísmico de los edificios de hormigón armado de Barcelona al sufrir estos dos terremotos. Para ello se hallan los puntos de desempeño y se estiman las matrices de probabilidad de daño. En el apartado siguiente se muestra un ejemplo del uso de estas matrices de probabilidad de daño para obtener escenarios de riesgo sísmico.

### 6.6.1. 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 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.

Los conceptos y métodos involucrados en la evaluación del desempeño sísmico de una estructura se han expuesto en el *Capítulo 2*.

La figura 6.17 muestra la evaluación del punto de desempeño. En esta figura se muestra el caso del escenario probabilista en la zona II. Obsérvese cómo los espectros de demanda dependen del edificio.

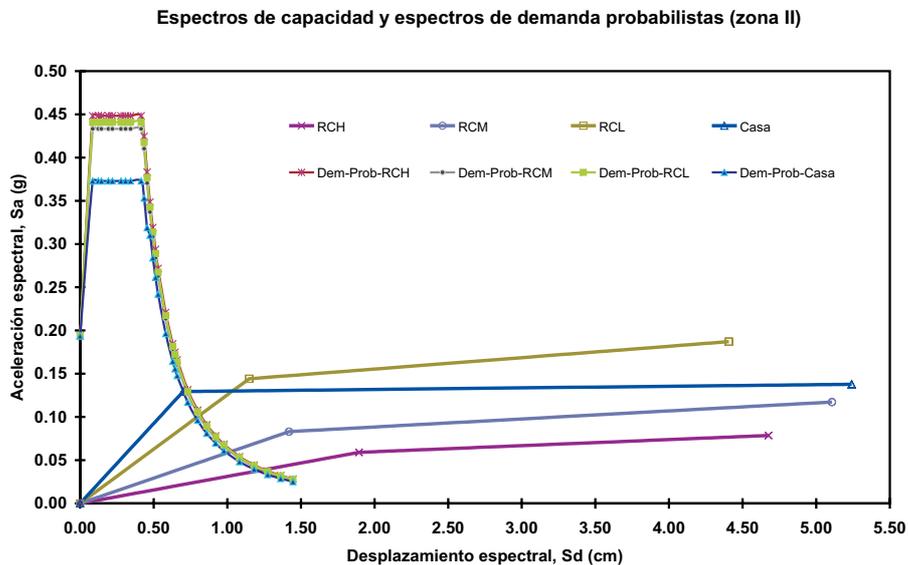


Figura 6.17: Obtención de los puntos de desempeño de los 4 edificios (RCH, RCM, RCL y CASA) para la demanda probabilista correspondiente a la zona II.

Las Tablas 6.8, 6.9, 6.10 y 6.11 muestran los puntos de desempeño correspondientes, respectivamente, a los edificios RCH, RCM, RCL y CASA. Estas tablas contienen las coordenadas espectrales del punto de desempeño 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 6.8. Edificio RCH. Puntos de desempeño y amortiguamientos efectivos.

		<b>RCH</b>		
		$SD_{PD}$ (m)	$SAPD$ (g)	$\xi_{eff}$ (%)
<b>Zona I</b>	<b>Det</b>	0.0135	0.0396	6.44
	<b>Prob</b>	0.0155	0.0445	6.97
<b>Zona II</b>	<b>Det</b>	0.0105	0.0318	5.62
	<b>Prob</b>	0.0127	0.0377	6.26
<b>Zona III</b>	<b>Det</b>	0.0090	0.0275	5.38
	<b>Prob</b>	0.0114	0.0342	5.82
<b>Zona R</b>	<b>Det</b>	0.0087	0.0268	5.32
	<b>Prob</b>	0.0118	0.0353	5.94

Tabla 6.9. Edificio RCM. Puntos de desempeño y amortiguamientos efectivos.

		<b>RCM</b>		
		$SD_{PD}$ (m)	$SAPD$ (g)	$\xi_{eff}$ (%)
<b>Zona I</b>	<b>Det</b>	0.0122	0.0646	7.50
	<b>Prob</b>	0.0138	0.0708	8.12
<b>Zona II</b>	<b>Det</b>	0.0087	0.0487	6.21
	<b>Prob</b>	0.0105	0.0569	6.89
<b>Zona III</b>	<b>Det</b>	0.0074	0.0423	5.67
	<b>Prob</b>	0.0091	0.0507	6.37
<b>Zona R</b>	<b>Det</b>	0.0066	0.0380	5.37
	<b>Prob</b>	0.0088	0.0488	6.17

Tabla 6.10. Edificio RCL. Puntos de desempeño y amortiguamientos efectivos.

		<b>RCL</b>		
		$SD_{PD}$ (m)	$SA_{PD}$ (g)	$\xi_{eff}$ (%)
<b>Zona I</b>	<b>Det</b>	0.0109	0.1191	8.53
	<b>Prob</b>	0.0120	0.1261	9.45
<b>Zona II</b>	<b>Det</b>	0.0071	0.0846	5.99
	<b>Prob</b>	0.0083	0.0974	6.56
<b>Zona III</b>	<b>Det</b>	0.0059	0.0722	5.56
	<b>Prob</b>	0.0070	0.0843	5.99
<b>Zona R</b>	<b>Det</b>	0.0048	0.0586	5.24
	<b>Prob</b>	0.0061	0.0744	5.67

Tabla 6.11. Edificio CASA. Puntos de desempeño y amortiguamientos efectivos.

		<b>CASA</b>		
		$SD_{PD}$ (m)	$SA_{PD}$ (g)	$\xi_{eff}$ (%)
<b>Zona I</b>	<b>Det</b>	0.0105	0.1318	14.37
	<b>Prob</b>	0.0115	0.1344	16.52
<b>Zona II</b>	<b>Det</b>	0.0063	0.1014	8.76
	<b>Prob</b>	0.0075	0.1124	10.17
<b>Zona III</b>	<b>Det</b>	0.0053	0.0891	7.29
	<b>Prob</b>	0.0062	0.0997	8.51
<b>Zona R</b>	<b>Det</b>	0.0040	0.0711	5.89
	<b>Prob</b>	0.0051	0.0870	7.07

### 6.6.2. Matrices de probabilidad de daño

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.

La Tabla 6.12 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 6.13, 6.14 y 6.15 son análogas a la Tabla 6.12, pero para los edificios situados en las zonas II, III y R, respectivamente.

La figura 6.18 muestra el histograma correspondiente a la matriz de probabilidad de daño de los 4 edificios situados en la zona II, sometidos a la acción determinista. La figura 6.19 es análoga a la figura 6.18 pero para la acción probabilista.

Se observa cómo en la zona II, el escenario probabilista es más dañino que el escenario determinista. El edificio CASA, representativo de una vivienda unifamiliar es el que resulta más dañado para ambos escenarios.

Tabla 6.12. Matrices de probabilidad de daño para los edificios RCH, RCM, RCL y CASA, situados en la zona I.

Probabilidad de daño						
Escenario Determinista Zona I						
Modelos	No daño	Leve	Moderado	Severo	Completo	$D_M$
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
CASA	0.02	0.28	0.45	0.22	0.03	1.96
Escenario Probabilista Zona I						
Modelos	No daño	Leve	Moderado	Severo	Completo	$D_M$
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
CASA	0.02	0.24	0.45	0.25	0.04	2.05

Tabla 6.13. Matrices de probabilidad de daño para los edificios RCH, RCM, RCL y CASA, situados en la zona II.

Probabilidad de daño						
Escenario Determinista Zona II						
Modelos	No daño	Leve	Moderado	Severo	Completo	$D_M$
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
CASA	0.18	0.42	0.30	0.09	0.01	1.33
Escenario Probabilista Zona II						
Modelos	No daño	Leve	Moderado	Severo	Completo	$D_M$
RCL	0.46	0.35	0.14	0.04	0.01	0.79
RCM	0.43	0.37	0.15	0.04	0.01	0.83
RCH	0.56	0.30	0.06	0.06	0.02	0.68
CASA	0.08	0.38	0.40	0.13	0.01	1.61

Tabla 6.14. Matrices de probabilidad de daño para los edificios RCH, RCM, RCL y CASA, situados en la zona III.

Probabilidad de daño						
Escenario Determinista Zona III						
Modelos	No daño	Leve	Moderado	Severo	Completo	$D_M$
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
CASA	0.42	0.34	0.17	0.07	0.00	0.89
Escenario Probabilista Zona III						
Modelos	No daño	Leve	Moderado	Severo	Completo	$D_M$
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
CASA	0.20	0.40	0.31	0.08	0.01	1.30

Tabla 6.15. Matrices de probabilidad de daño para los edificios RCH, RCM, RCL y CASA, situados en la zona R.

Probabilidad de daño						
Escenario Determinista Zona R						
Modelos	No daño	Leve	Moderado	Severo	Completo	$D_M$
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
CASA	0.76	0.18	0.02	0.04	0.00	0.34
Escenario Probabilista Zona R						
Modelos	No daño	Leve	Moderado	Severo	Completo	$D_M$
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
CASA	0.47	0.34	0.13	0.06	0.00	0.78

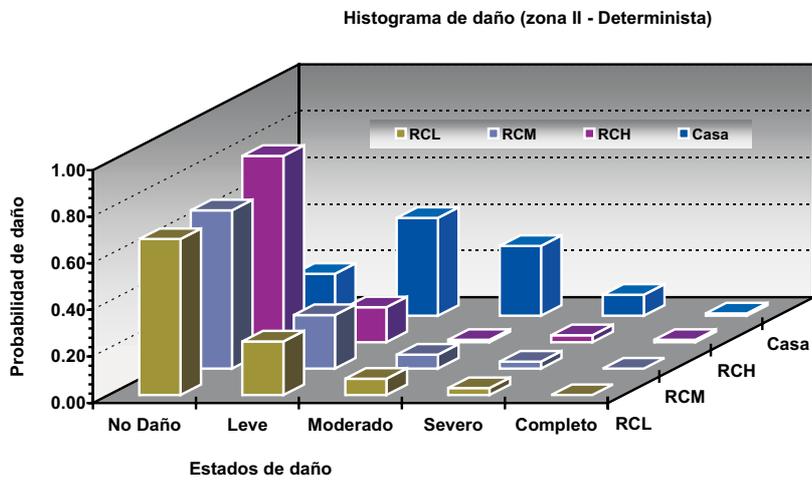


Figura 6.18: Histograma de probabilidad para los 4 edificios analizados, situados en la zona II. Escenario determinista.

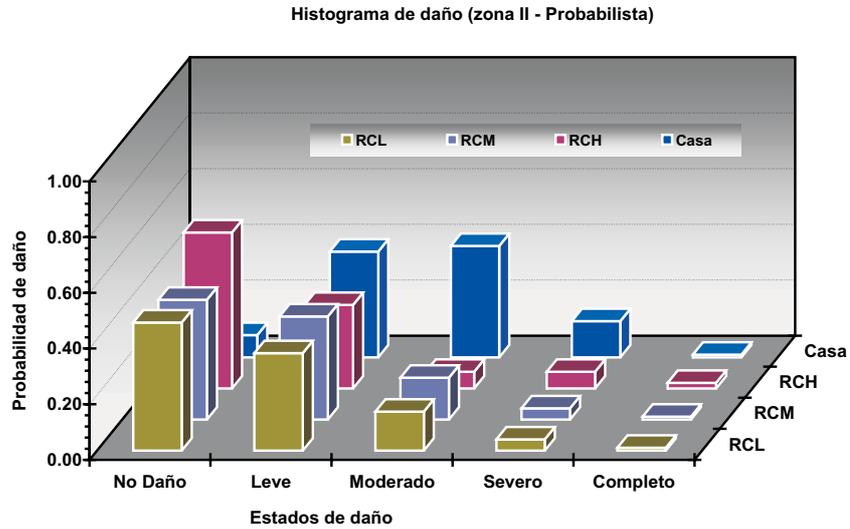


Figura 6.19: Histograma de probabilidad para los 4 edificios analizados, situados en la zona II. Escenario probabilista.

### 6.6.3. Discusión

Las Tablas 6.12, 6.13, 6.14 y 6.15 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.

Las Tablas 6.16 y 6.17 resumen los factores de daño medio obtenidos. La figura 6.20 muestra su representación gráfica.

Tabla 6.16. Factor de daño medio para los edificios y zonas analizadas. Escenario determinista.

Escenario Determinista				
Edificios	R	III	II	I
RCH	0.11	0.28	0.30	0.82
RCM	0.11	0.37	0.44	1.23
RCL	<b>0.05</b>	0.32	0.46	1.48
CASA	0.34	0.89	1.33	1.96

Tabla 6.17. Factor de daño medio para los edificios y zonas analizadas. Escenario probabilista.

Escenario Probabilista				
Edificios	R	III	II	I
RCH	0.52	0.22	0.68	1.19
RCM	0.44	0.28	0.83	1.51
RCL	0.24	0.25	0.79	1.68
CASA	0.78	1.30	1.61	<b>2.05</b>

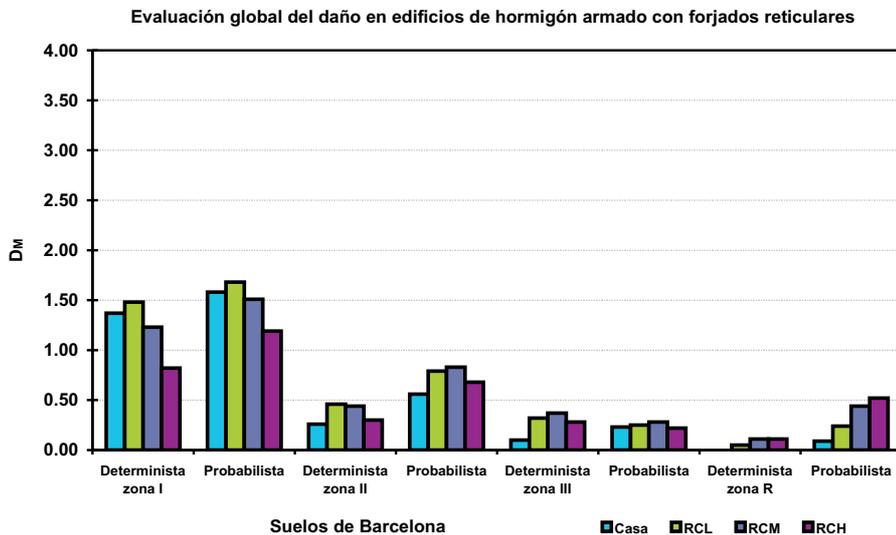


Figura 6.20: Factor de daño medio para los edificios, zonas y escenarios analizados.

Se observa cómo el factor de daño medio varía entre 0.05 y 2.05. El daño prácticamente nulo se obtiene para los edificios RCL situados en la zona R 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 R. En las zonas R, I y II el escenario probabilista es más fuerte que el determinista. En la zona III los daños esperados son comparables.

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 (ver figuras 6.13, 6.14, 6.15, 6.16). Sin duda, las características de los espectros de demanda (figura 6.17) 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.

## 6.7. Escenarios de daño sísmico

Las matrices de probabilidad de daño aquí obtenidas, para los dos escenarios sísmicos, se han utilizado para desarrollar escenarios de riesgo sísmico para la ciudad de Barcelona (Lantada, 2006).

En este apartado se muestra un ejemplo de los tipos de mapa que se obtienen conociendo la distribución geográfica de los edificios de hormigón armado, el tipo a qué pertenecen (alto, mediano, bajo) y aplicando las matrices de probabilidad de daño aquí desarrolladas.

La figura 6.21 muestra la distribución de edificios de hormigón por distritos. Se da en porcentaje de edificios residenciales (ver leyenda) y el número de edificios.

La figura 6.22 muestra, el factor de daño medio esperado en los edificios de hormigón armado del Eixample en caso de ocurrir un terremoto de características similares al escenario probabilista.

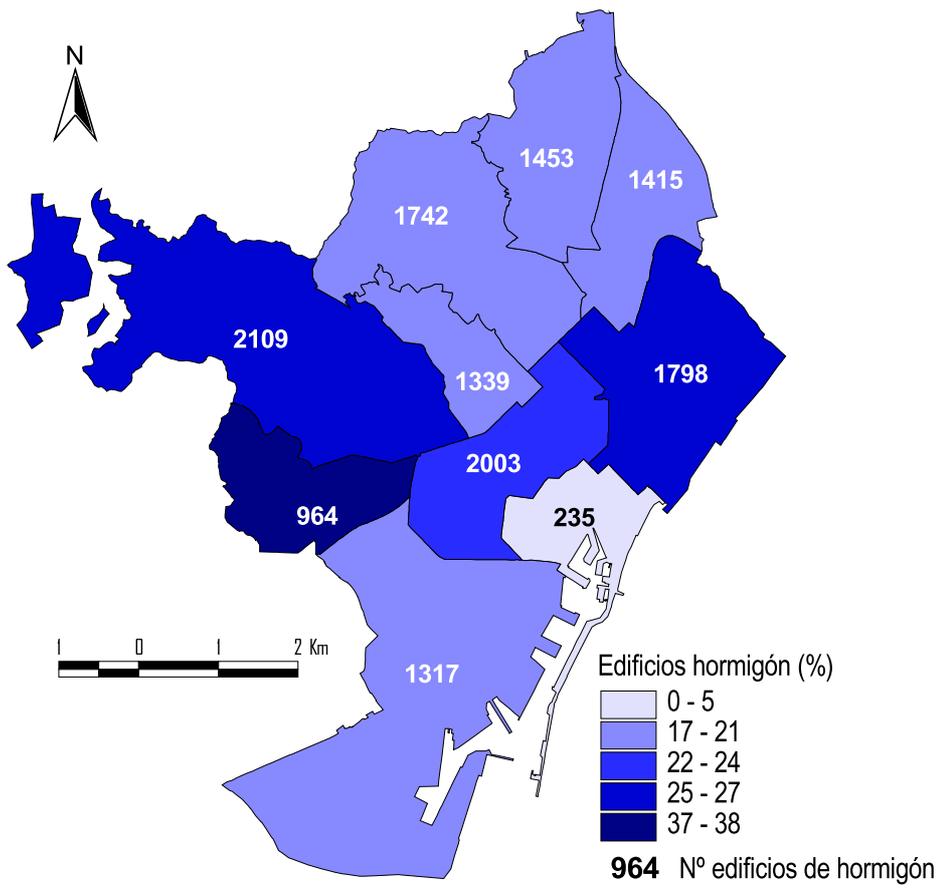


Figura 6.21: Número de edificios de hormigón en los principales distritos de Barcelona.

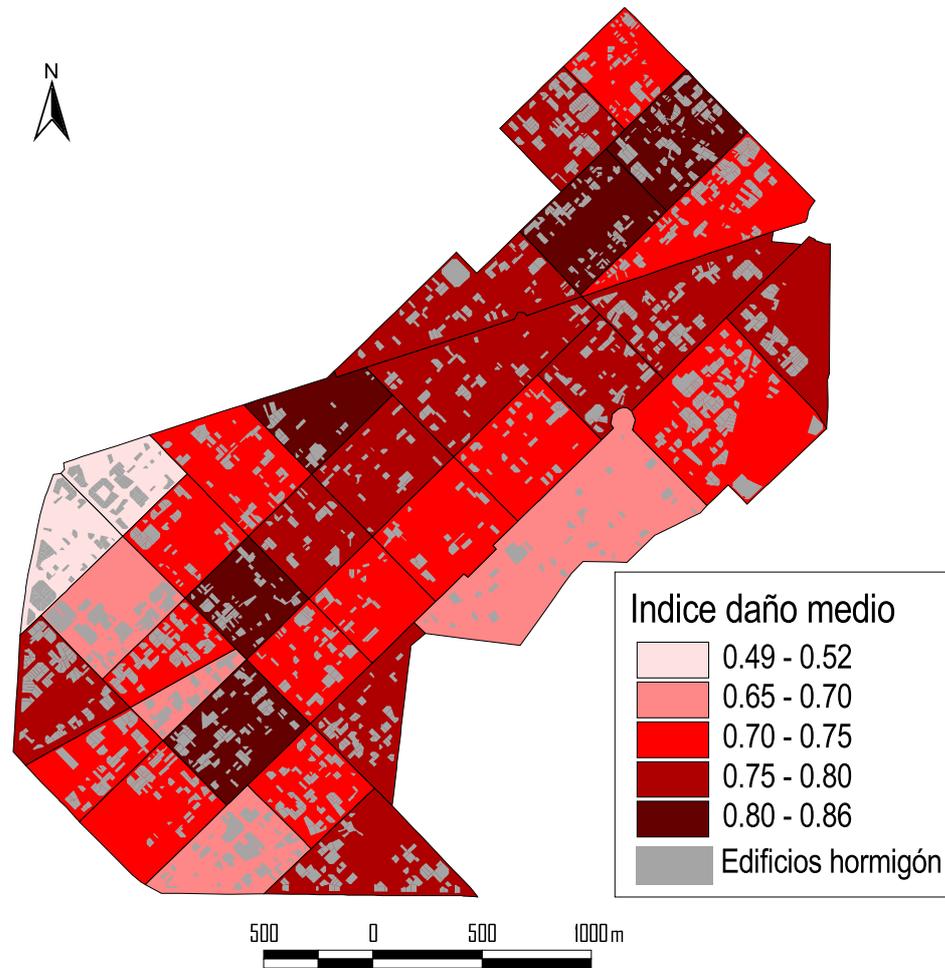


Figura 6.22: Índice del daño medio esperado para el Eixample para el escenario probabilistad.

Finalmente, la figura 6.23 muestra la probabilidad de que se dé el estado de no daño en el distrito del Eixample.

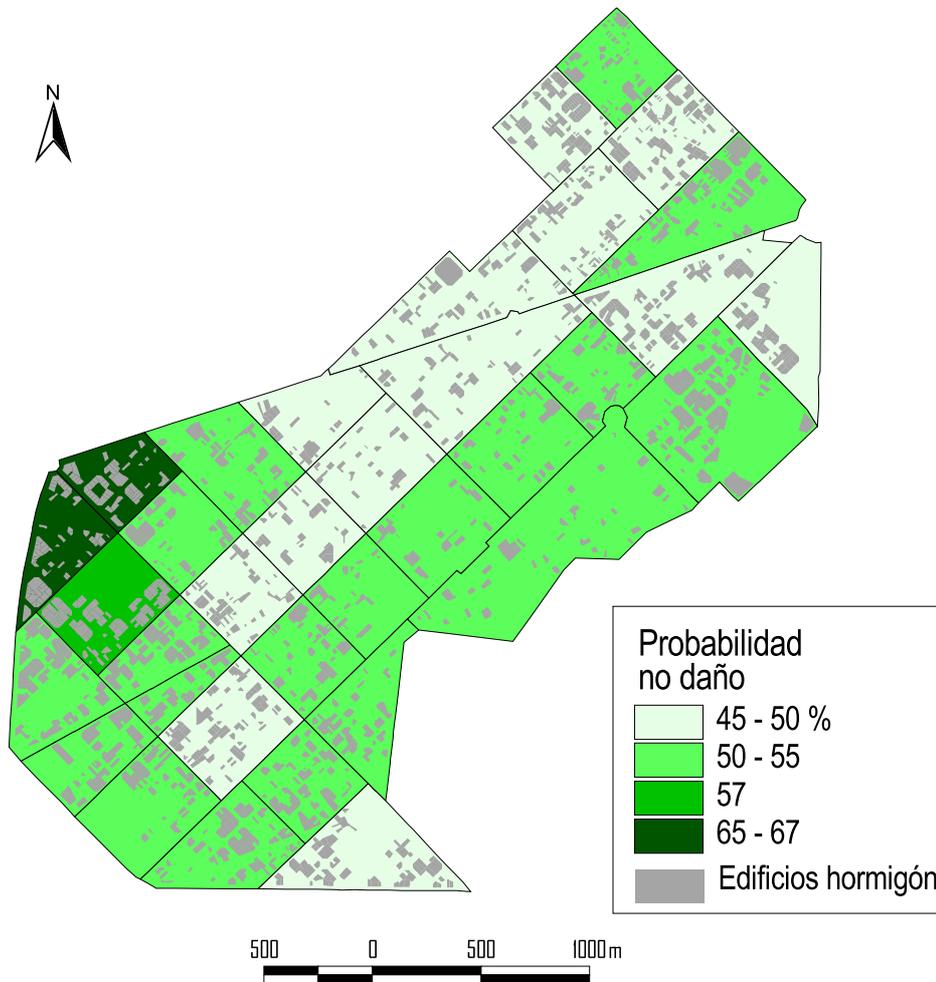


Figura 6.23: Probabilidad del estado de daño más probable, en este caso, probabilidad del estado de daño nulo.

## 6.8. Resumen

En este capítulo se aplicó la metodología descrita en el *Capítulo 4* para la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico en edificios. La tipología analizada corresponde a edificios de HA con forjados reticulares. Para la evaluación se utilizaron los dos escenarios sísmicos desarrollados por el ICC para la ciudad de Barcelona.

El capítulo comienza con una descripción del comportamiento estructural del hormigón y de los edificios de hormigón armado con forjados reticulares. Seguidamente, se presenta el análisis llevado a cabo para los cuatro edificios de diferentes alturas, los cuales pertenecen a la clasificación realizada en altura para esta tipología. Estos edificios pertenecen a los considerados edificios altos, de mediana altura y bajos, dentro de los bajos se encuentran también las viviendas unifamiliares.

Para cada uno de estos edificios se determinó su capacidad (figuras 6.11 y 6.12) y fragilidad (figuras 6.13, 6.14, 6.15, 6.16). Con los espectros de capacidad y los escenarios sísmicos se determinó la respuesta máxima estructural de cada uno de los edificios analizados (Tablas 6.8, 6.9, 6.10 y 6.11). A partir de aquí, se definieron las matrices de probabilidad de daño para cada edificio y para cada tipo de suelo de cada escenario sísmico. Las matrices de probabilidad de daño muestran la probabilidad de ocurrencia de cada estado de daño para cada zona, para cada escenario y para cada edificio tipo (Tablas 6.12, 6.13, 6.14 y 6.15). Las figuras 6.18 y 6.19, muestran para una misma zona y para cada uno de los edificios aquí analizados, la probabilidad de daño para los escenarios determinista y probabilista, respectivamente. Finalmente, se determinaron unos mapas de escenario de daño en el distrito Eixample.

Los resultados aquí mostrados reflejan el buen comportamiento de esta tipología ante un evento sísmico de estas características (espectros de respuesta del ICC). 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 6.8, 6.9, 6.10 y 6.11 se observa cómo la aceleración espectral correspondiente a los puntos de desempeño aumentan, y los desplazamientos espectrales decrecen al disminuir el número de niveles de los edificios, también se observa como el amortiguamiento efectivo aumenta a medida que disminuye el número de pisos, esto 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 llegarían a sufrir, principalmente, daños leves.