

Capítulo 5

Umbrales de los estados de daño

5.1. Introducción

No existe un método único para evaluar el daño en los edificios, hay una gran variedad de fórmulas para cuantificar el daño de una estructura sometida a una acción sísmica.

Los umbrales de los estados de daño, descritos en el *Capítulo 4*, forman parte de la propuesta del proyecto RISK-UE. Estos estados de daño se basan en el espectro de capacidad del edificio, en su forma bilineal simplificada.

Como se ha visto en el capítulo anterior (*sección 4.5.1*) estos umbrales de daño se definen a partir de los desplazamientos espectrales correspondientes a la capacidad de cedencia (Dy) y capacidad última (Du); es decir, de los dos parámetros que definen el espectro de capacidad bilineal. De esta forma, todos los edificios con unos mismos desplazamientos espectrales Dy y Du tienen los mismos umbrales de daño.

El objetivo de este capítulo es doble. Por una parte se efectúa un análisis

de sensibilidad de los umbrales de los estados de daño leve (1) y severo (3), definidos en el capítulo anterior. Se trata de analizar cuánto influye en el daño una pequeña variación de la posición del umbral y se verá cómo la definición de estos umbrales de daño tiene una influencia relevante en la distribución del daño esperado. El segundo objetivo consiste en efectuar una propuesta alternativa. Esta nueva propuesta, aunque no consigue obviar por completo una cierta subjetividad, parece más adecuada ya que se basa en dos propiedades físicas del comportamiento dinámico del edificio: la rigidez y el endurecimiento.

Finalmente se analizan y discuten 3 casos de aplicación. Los casos analizados corresponden a edificios de hormigón armado. En el primer caso se estudió un edificio de ocho pisos usando el programa RUAUMOKO en 2D. El mismo programa se utiliza para analizar un edificio de altura mediana (5 pisos). Un tercer edificio, también de 5 pisos, pero regular en altura se analiza en 3D mediante el programa SAP2000.

5.2. Análisis de sensibilidad

Se ha efectuado un análisis de sensibilidad sobre los umbrales de daño leve y severo. Se consideró que estos son los que presentan una mayor incertidumbre de los parámetros que los definen en comparación con los umbrales de daño moderado y completo, que se definen por los puntos Dy y Du , respectivamente.

La *sección* 4.5.1 resume el criterio de definición de los estados de daño propuestos y utilizados dentro del proyecto RISK-UE. Para facilidad del lector se repiten aquí las definiciones correspondientes a los estados de daño leve y severo.

$$\bar{S}d_1 = 0,7 Dy \quad (5.1)$$

$$\bar{S}d_3 = Dy + 0,25 (Du - Dy) \quad (5.2)$$

Los parámetros críticos son 0.7 y 0.25, respectivamente, para los casos de los umbrales de los estados de daño leve (1) y severo (3).

Para el estado de daño leve, se realizó un estudio variando dicho parámetro hasta un 20%, en un intervalo de $0.56 Dy \leq \bar{S}d_1 \leq 0.84 Dy$, igualmente, esta variación del 20% fue hecha para el daño severo, donde el parámetro 0.25 varía desde 0.20 hasta 0.30 ($\bar{S}d_3 = Dy + 0.20(Du - Dy) \leq \bar{S}d_3 \leq \bar{S}d_3 = Dy + 0.30(Du - Dy)$).

La figura 5.1 muestra el espectro de capacidad utilizado para el análisis.

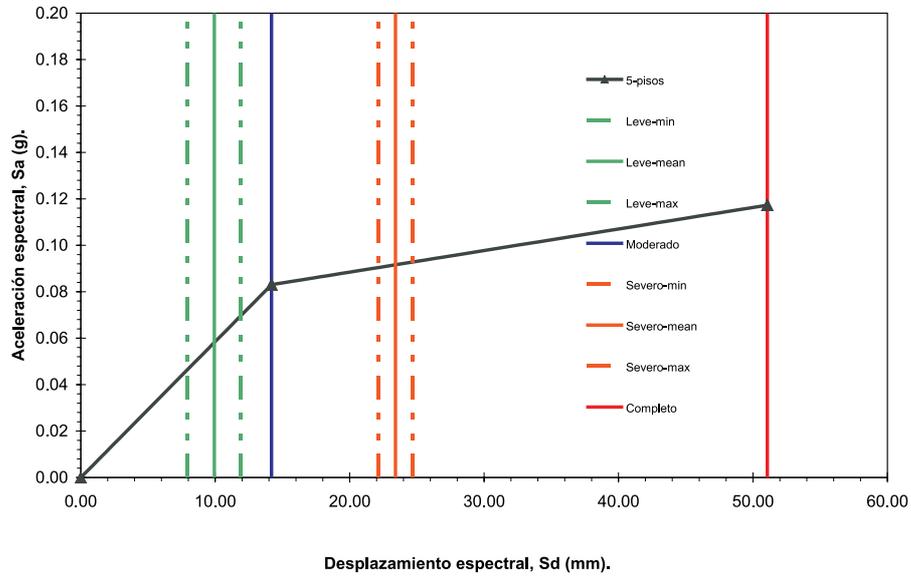


Figura 5.1: Espectro de capacidad y estados de daño.

Este espectro de capacidad corresponde a un edificio de HA de 5 plantas sobre el que se va a realizar el análisis de sensibilidad. En la misma figura 5.1 se muestran los intervalos considerados para los umbrales de los estados de daño leve y severo.

El análisis de sensibilidad se realizó fijando todos los umbrales de los *ED* y variando solamente uno (el del caso de estudio), posteriormente se construyen

las curvas de fragilidad para observar la variación de las mismas.

La figura 5.2 muestra la variación de las curvas de fragilidad correspondientes a los estados de daño leve y severo, respectivamente. Se muestra la curva media que corresponde al parámetro no perturbado y las curvas mínima y máxima, correspondientes a las variaciones mínima y máxima, respectivamente.

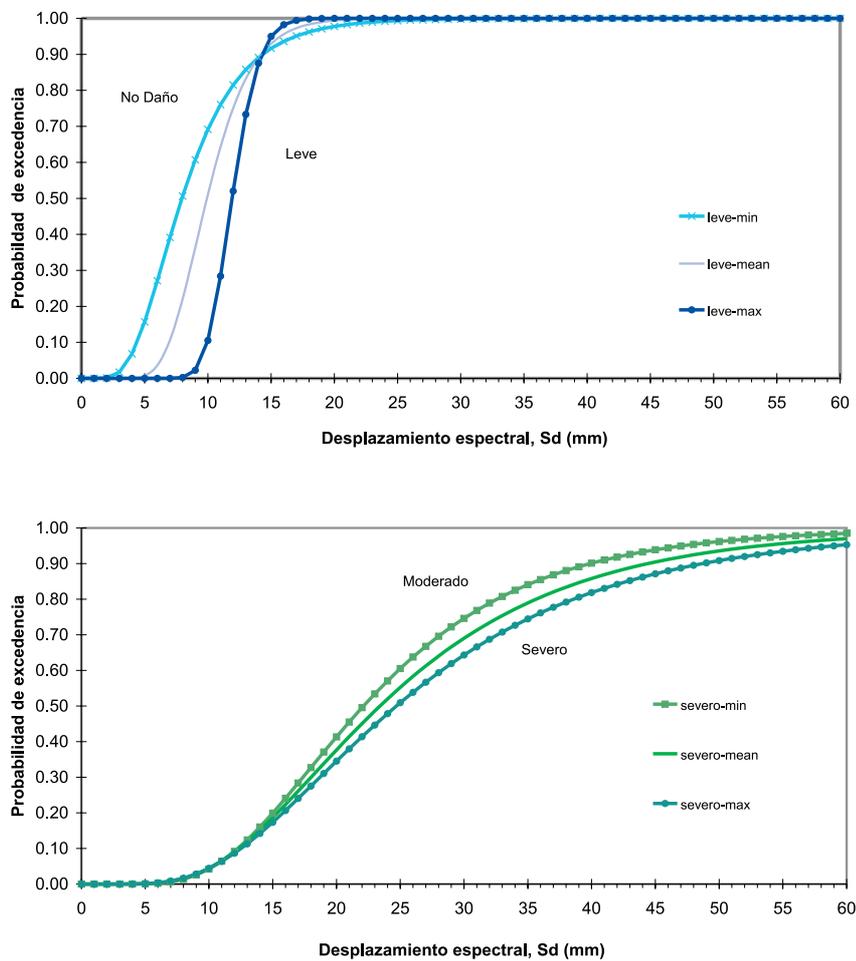


Figura 5.2: Curvas de fragilidad correspondientes al estado de daño leve (arriba) y severo (abajo).

Para cuantificar la influencia de estas variaciones de los umbrales en la estimación del daño, se han evaluado las matrices de probabilidad de daño y el grado de daño medio D_M (definido en la ecuación 4.21) en función del desplazamiento espectral.

La figura 5.3 muestra los resultados obtenidos que indican la cuantía de variación del daño considerado.

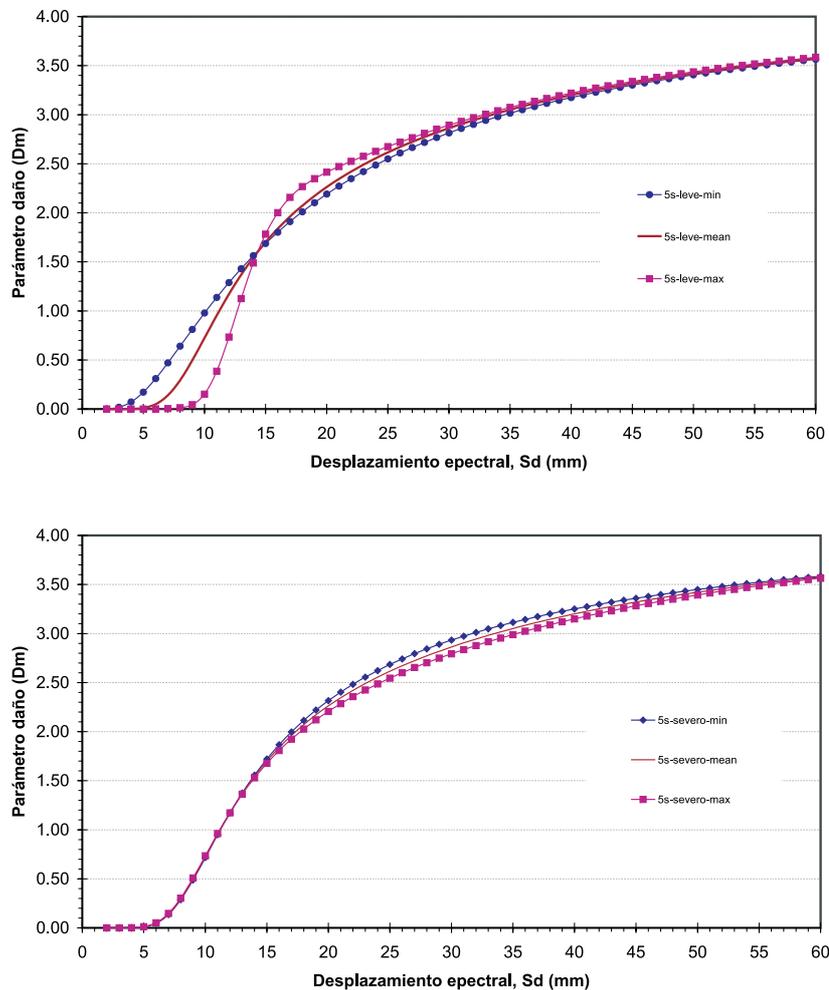


Figura 5.3: Variación del parámetro de daño correspondiente al estado de daño leve (arriba) y severo (abajo).

Se han calculado y representado las diferencias entre las curvas del grado de daño medio correspondientes a los casos: a) mínimo (*min*), que se obtiene de la diferencia entre los correspondientes al valor medio (*mean*) y mínimo del umbral de daño y b) máximo (*max*), que proviene de la diferencia entre las curvas correspondientes al valor medio y máximo del umbral de daño. La figura 5.4 muestra los resultados obtenidos.

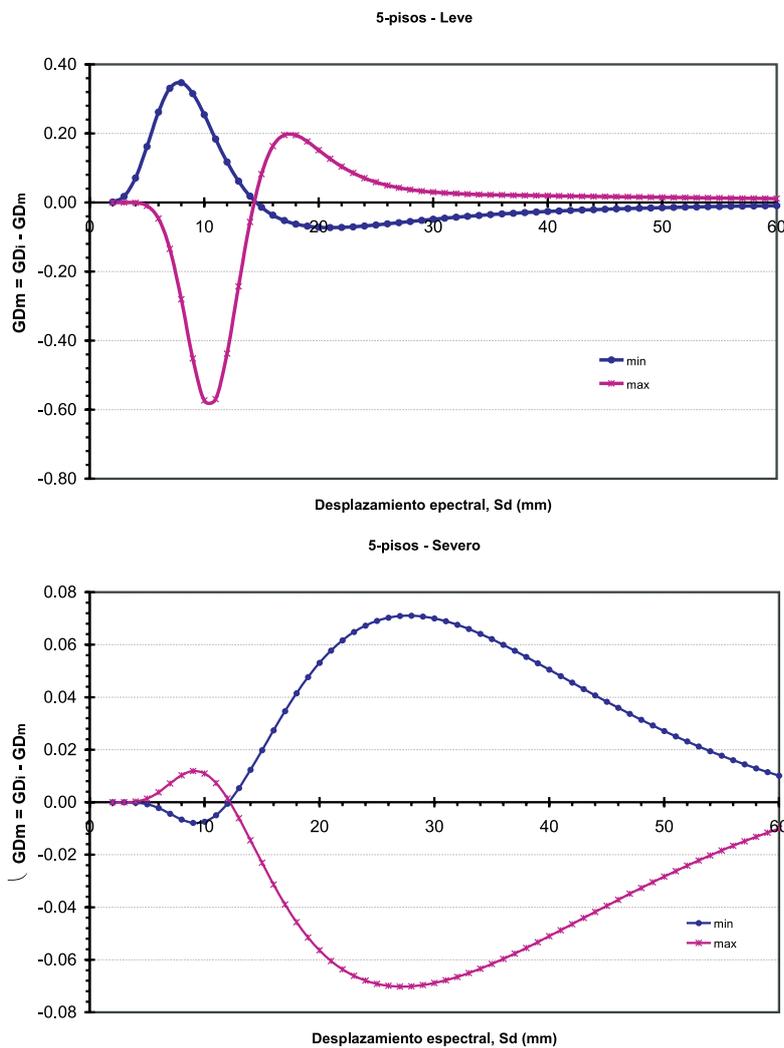


Figura 5.4: Variación del grado de daño medio correspondiente a los estados de daño leve (arriba) y severo (abajo).

En las figuras 5.3 y 5.4 se observa cómo, para el caso del estado de daño leve, la máxima variación del grado de daño medio es de 0.58 para un desplazamiento espectral de 10mm al que corresponde un grado de daño medio de 0.8; es decir, que una variación del 20% en la definición del umbral del ED leve induce, en este caso, una variación del 72.5% en el grado de daño medio esperado. Análogamente, en el caso del ED severo, una variación del 20% en la definición del umbral induce, en este caso, una variación del estado de daño medio del 2.6%.

5.3. Propuesta de umbrales de daño

Un edificio se caracteriza mediante su espectro de capacidad, que se obtiene mediante un análisis estático no lineal y, en su forma bilineal simplificada, se define mediante los puntos de capacidad de cedencia (Dy, Ay) y de capacidad última (Du, Au).

Esta simplificación se efectúa mediante un balance energético entre las curvas de capacidad y la simplificada (áreas iguales sobre y bajo ambas curvas). En la figura 5.5 se ha llamado F_R a la curva de capacidad y F_B a la curva bilineal.

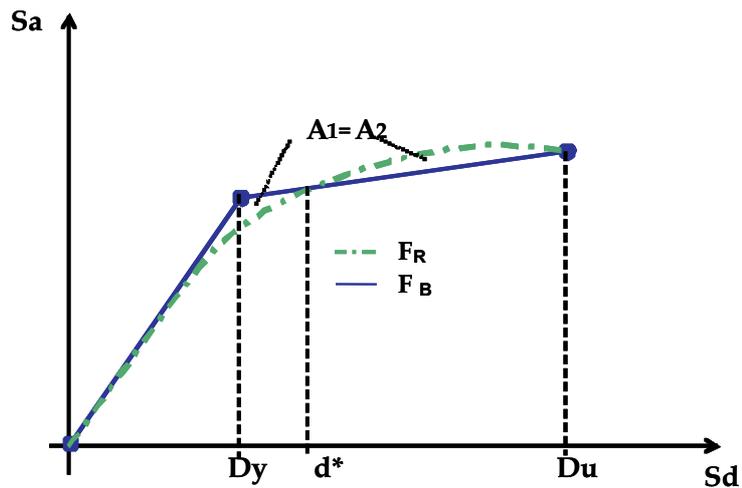


Figura 5.5: Curvas de capacidad y bilineal.

Los umbrales de daño definidos en el capítulo anterior han sido objeto de motivación para llevar a cabo un estudio más profundo, en base a las características de las curvas de capacidad. La nueva propuesta para determinar los umbrales de los ED leve y severo tienen en cuenta el grado de no linealidad de la curva de capacidad para desplazamientos espectrales previos a Dy y el endurecimiento que se define entre los puntos Dy y Du .

Finalmente, los nuevos umbrales para los ED leve y severo se definen en términos de los puntos de capacidad de cedencia y de capacidad última, pero en la definición del umbral del ED leve interviene también el área $A_1 = A_2$ (figura 5.5). Cuanto mayor es este área menor es el desplazamiento espectral que define el umbral del ED leve. Por otra parte, en esta propuesta, los umbrales de los ED leve y severo dependen tanto de los desplazamientos como de las aceleraciones espectrales de los puntos que definen la curva bilineal, de forma que ahora, estructuras con los mismos Dy y Du pueden tener distintos umbrales para los ED leve y severo.

5.3.1. Umbral del estado de daño leve

Este umbral se define en un punto sobre la curva de capacidad, antes de alcanzar la cedencia. La zona de área A_1 (figura 5.5) se aproxima por un área triangular (figura 5.6). La figura 5.6 muestra también una aproximación de la diferencia entre las curvas bilineal y de capacidad. De esta forma, los valores de la curva de capacidad (F_R) se aproximan a partir de los valores de la curva bilineal (F_B). La siguiente ecuación (5.3) permite este cálculo.

$$h = F_B - F_R \quad \longrightarrow \quad F_R = F_B - \frac{2A_1}{d^*} \frac{d_L}{Dy} \quad (5.3)$$

h aproxima la diferencia entre las curvas bilineal y de capacidad (figura 5.7), d_L es el desplazamiento espectral correspondiente a h ; A_1 , Dy y d^* están definidos en la figura 5.5.

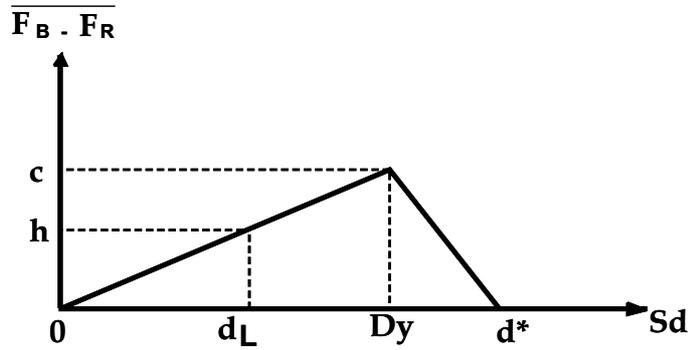


Figura 5.6: Área triangular equivalente a A_1 (figura 5.5) en función de h .

Así pues, para un desplazamiento espectral d_L , la ecuación (5.3) permite calcular la diferencia entre las curvas bilineal y de capacidad, en el tramo elástico de la curva bilineal en función del área A_1 , Dy y d^* , tal como se hallan definidos en la figura 5.5 (ver también figura 5.6).

La figura 5.7 muestra el detalle de los espectros bilineal y de capacidad. La clave de la propuesta, reside en establecer el umbral del ED leve, cuando ambos espectros (de capacidad y bilineal) difieren una cierta cantidad o fracción de la aceleración espectral de cedencia, Ay .

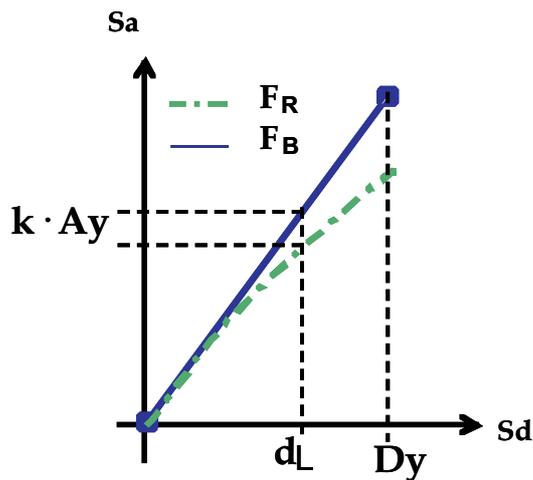


Figura 5.7: Ampliación de la figura 5.5 antes de Dy .

Es decir, cuando

$$F_B - F_R = kAy \quad (5.4)$$

Reemplazando la ecuación (5.3) en la ecuación (5.4), el umbral del estado de daño leve ($d_L = \bar{S}d_1$) se define como un desplazamiento previo a Dy , concretamente:

$$\bar{S}d_1 = \frac{Ay d^* Dy}{2 A_1} .k \leq 0,90Dy \quad (5.5)$$

donde sólo queda por definir k , que representa una fracción de Ay en la cual, la respuesta de la curva de capacidad está separada de la respuesta bilineal un porcentaje. Se propone tomar un valor de 6 % ($k = 0.06$).

Por otra parte, la ecuación (5.5) establece un valor límite para el umbral del estado de daño leve. Es decir, el desplazamiento espectral correspondiente al umbral, debe ser menor o igual que el 90 % del desplazamiento de cedencia (Dy).

Aunque este criterio sigue siendo subjetivo ya que se fija k de forma arbitraria o experta, ahora $\bar{S}D_1$ tiene en cuenta la resistencia y la degradación de rigidez debido a que es inversamente proporcional a A_1 y directamente proporcional a Ay , Dy y d^* .

5.3.2. Umbral del estado de daño severo

El desplazamiento espectral para el umbral del estado de daño severo ocurre entre los correspondientes a los del punto de capacidad de cedencia (Dy) y capacidad última (Du).

La propuesta para definir el umbral de daño severo pretende recoger indicadores del comportamiento global de la estructura (endurecimiento, sobre-resistencia, etc) que se pueden observar en la curva de capacidad. Además, se pretende deducir una ecuación similar a la (5.2) sin necesidad de fijar el parámetro 0.25.

El endurecimiento (conocido en la literatura inglesa como *hardening*) se puede cuantificar mediante el siguiente parámetro:

$$FH^* = \frac{Dy}{Ay} \frac{(Au - Ay)}{(Du - Dy)} \quad (5.6)$$

Es decir, el cociente entre las pendientes de la rama plástica y elástica del espectro de capacidad bilineal. Obsérvese que:

$FH^* = 0$ caso elasto-plástico perfecto: $\bar{S}d_3 = Dy \rightarrow$ (Límite inferior: Daño moderado)

$FH^* = 1$ caso elástico perfecto: $\bar{S}d_3 = Du \rightarrow$ (Límite superior: Daño completo)

En general, para pendientes positivas de la rama plástica FH^* toma valores entre 0 y 1 (figura 5.8).

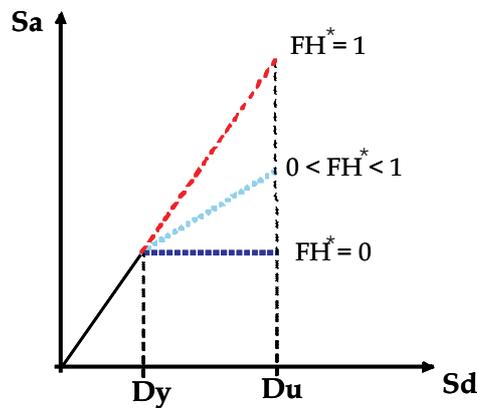


Figura 5.8: Casos límites y caso general del parámetro FH^* .

De forma análoga al caso del umbral del ED leve, se asocia el daño con los cambios en la pendiente del espectro de capacidad y se postula que el daño severo ocurre cuando la pendiente se ha degradado un cierto valor.

Considerando la figura 5.8 y los límites de FH^* , se define un nuevo parámetro de endurecimiento (FH) que relacione únicamente la resistencia del edificio,

es decir, la resistencia última con la de cedencia.

$$FH = \frac{Au - Ay}{Au} \quad \text{donde } Au \geq Ay \quad (5.7)$$

$$FH = 1 - \frac{Ay}{Au} = 1 - \alpha \quad \text{donde } 0 \leq \alpha \leq 1$$

Este nuevo parámetro de endurecimiento (FH) es independiente de la ductilidad de desplazamiento ($\frac{Du}{Dy}$) de la estructura. Con esto se consigue que, por ejemplo, dos edificios tengan un mismo nivel de ductilidad pero diferentes umbrales de daño severo, dependiendo del comportamiento inelástico que presenten, el cual se evalúa con el endurecimiento de la rama plástica de la curva de capacidad bilineal.

La figura 5.9 muestra un ejemplo de cómo el umbral del ED severo puede ser asignado en función de la pendiente del espectro de capacidad y se indican los posibles umbrales del estado de daño severo. Así pues, el FH está definido, en su caso general, entre $0 < FH < 1$ (ver figura 5.9), por lo tanto, cuando

$$FH \rightarrow 0 \quad (Au \approx Ay) \quad \longrightarrow \quad \text{límite inferior}$$

$$FH \rightarrow 1 \quad (Au \gg Ay) \quad \longrightarrow \quad \text{límite superior}$$

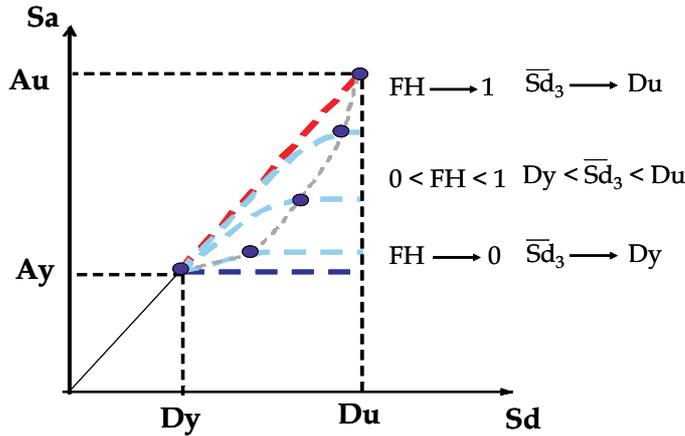


Figura 5.9: Ejemplos de posibles espectros de capacidad para diferentes endurecimientos.

En este trabajo, el parámetro utilizado para determinar la propuesta del

umbral del daño severo es FH . Esta elección se basa en dos propósitos, uno en considerar el efecto del endurecimiento por medio de la resistencia de la rama plástica de la curva de capacidad, pero sin tener en cuenta los desplazamientos, ya que estos se consideran dentro de la ecuación del daño severo, y el segundo, consiste en que la derivada de la función que tiene la curva de capacidad tome un valor mínimo. Al final de este apartado, se muestra una Tabla comparativa (Tabla 5.1) con los parámetros FH y FH^* para diferentes casos de estudio, con esta Tabla se trata de justificar la elección del parámetro FH en vez del parámetro FH^* .

Para implementar estos conceptos de forma simplificada y cuantitativa, dado el espectro de capacidad bilineal, se define una parábola, que cumple las siguientes condiciones:

- Pasa por el punto de capacidad de cedencia (Dy, Ay) .
- Pasa por el punto de capacidad última (Du, Au) .
- La pendiente en el punto Du es nula.

Las siguientes ecuaciones definen esta parábola:

$$F(x) = ax^2 + bx + c \quad (5.8)$$

$$F'(x) = 2ax + b \quad (5.9)$$

Con las condiciones más arriba impuestas se obtiene:

$$a = -\frac{(Au - Ay)}{(Du - Dy)^2} \quad (5.10)$$

$$b = 2Du \cdot \frac{(Au - Ay)}{(Du - Dy)^2} \quad (5.11)$$

$$c = Au - \frac{(Au - Ay)}{(Du - Dy)^2} \cdot Du^2 \quad (5.12)$$

Por otra parte, obsérvese que la pendiente en el punto de cedencia vale:

$$F'(Dy) = 2 \frac{(Au - Ay)}{(Du - Dy)} = 2K_p = K_p^o \quad (5.13)$$

donde K_p es la pendiente de la rama plástica del espectro de capacidad bilineal, es decir, es la secante de la parábola. Evidentemente, $F'(Du) = 0$. La figura 5.10 muestra un ejemplo de curva de capacidad con la parábola aquí definida.

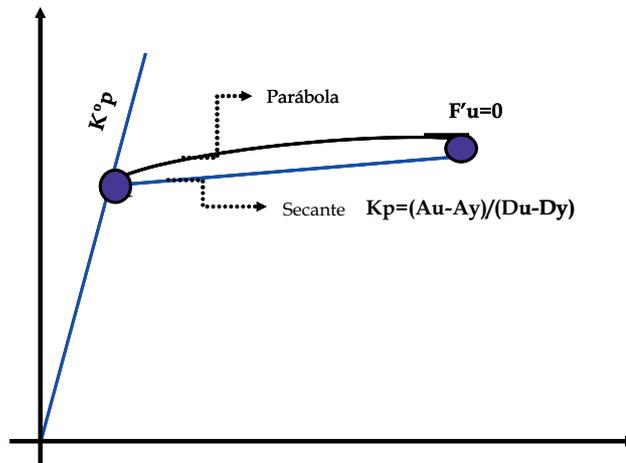


Figura 5.10: Parábola entre los puntos de capacidad de cedencia y última.

La pendiente del daño severo (k_s) se encuentra situada entre la pendiente inicial y la pendiente cero de la rama plástica ($K_p^o > k_s > 0$). Así pues, el umbral del ED severo se define mediante el desplazamiento espectral (ds) para el cual la pendiente de la parábola definida toma un valor k_s ; considerando la figura 5.9 y definiendo k_s como una función de la pendiente inicial de la rama plástica, se tiene:

$$k_s = (1 - FH) 2K_p \quad (5.14)$$

De esta forma, si $FH \rightarrow 0$, la pendiente del daño severo se sitúa hacia la pendiente inicial de la rama plástica, es decir, hacia el punto de cedencia (Dy), mientras que si $FH \rightarrow 1$, la pendiente del daño severo se aproxima al punto de capacidad última (Du) (figura 5.9).

Finalmente, utilizando las ecuaciones (5.9), (5.10), (5.11), (5.12), (5.13) y (5.14) se concluye que:

$$2 \frac{(Au - Ay)}{(Du - Dy)} \frac{(Du - d_s)}{(Du - Dy)} = 2(1 - FH) \frac{(Au - Ay)}{(Du - Dy)} \quad (5.15)$$

Simplificando y arreglando términos de la ecuación (5.15), queda:

$$d_s = Du - (1 - FH)(Du - Dy) \quad (5.16)$$

o equivalentemente,

$$d_s = \bar{S}d_3 = Dy + FH(Du - Dy) \quad (5.17)$$

siendo $d_s = \bar{S}d_3$, umbral del estado de daño severo.

En general, cuanto mayor sea FH , es decir, cuanto mayor sea el endurecimiento, más cercano de Du estará el umbral de este estado de daño. Cuanto menor sea, más cercano estará de Dy .

Las hipótesis y conceptos aquí utilizados sólo suponen valores positivos de FH , es decir, $FH \geq 0$.

El caso de la ecuación (5.2) es un caso particular de la ecuación (5.17) para $FH = 0.25$ es decir para $Ay = 0.75Au$, pero en la nueva propuesta el umbral depende de los niveles de aceleración espectral.

La Tabla 5.1 es una tabla comparativa, donde se presentan varias curvas de capacidad bilineal y, para cada una, se evalúa el umbral del estado de daño severo ($\bar{S}d_3$) en función de los parámetros FH y FH^* (columnas 8 y 9, respectivamente) y, además, se obtienen sus respectivas pendientes ($F'(ds)$).

Tabla 5.1. Evaluación del umbral de daño severo.

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>
Casos	Tipo	Dy	Ay	Du	Au	μ	$\bar{S}d_3$		$F'(ds)$	
							(FH)	(FH*)	(FH)	(FH*)
Caso 1	RC3	1.15	0.21	11.39	0.62	9.90	7.97	3.45	0.027	0.063
	RC1	1.15	0.10	11.39	0.11	9.90	2.08	1.27	0.0018	0.0019
Caso 2	RC1	1.15	0.10	11.39	0.11	9.90	2.08	1.27	0.0018	0.0019
	RC6	1.15	0.10	11.39	0.62	9.90	9.74	7.18	0.016	0.042
Caso 3	RC4	0.39	0.25	5.85	0.75	15.00	4.03	1.17	0.061	0.157
	RC2	1.15	0.21	17.25	0.62	15.00	11.88	3.45	0.017	0.044
Caso 4	RC3	1.15	0.21	11.39	0.62	9.90	7.97	3.45	0.027	0.063
	RC2	1.15	0.21	17.25	0.62	15.00	11.88	3.45	0.017	0.044
Caso 5	RC3	1.15	0.21	11.39	0.62	9.90	7.97	3.45	0.027	0.063
	RC6	1.15	0.10	11.39	0.62	9.90	9.74	7.18	0.016	0.042
Caso 6	RC7	1.15	0.20	5.85	0.40	5.09	3.50	2.30	0.042	0.0643
	RC8	1.15	0.20	11.38	0.40	9.90	6.27	2.30	0.0195	0.0347
	RC9	1.15	0.20	17.25	0.40	15.0	9.20	2.30	0.0124	0.0231

De los 6 casos presentados en la Tabla 5.1 y teniendo en cuenta toda la hipótesis desarrollada anteriormente se observa que, para edificios con un mismo nivel de ductilidad (μ) pero diferentes niveles de endurecimiento, el parámetro FH considera mejor este efecto que el FH^* . Esto se muestra en las *columnas 8 y 9*, donde se aprecia que a medida que la curva presenta más endurecimiento el parámetro FH se orienta más hacia Du que el parámetro FH^* . Además, la pendiente evaluada en $\bar{S}d_3(FH)$ (*columna 10*) es menor que la pendiente evaluada en $\bar{S}d_3(FH^*)$, *columna 11*, es decir:

$$F'(\bar{S}d_3(FH)) < F'(\bar{S}d_3(FH^*))$$

Con esta Tabla se justifica la elección del parámetro FH ante el FH^* para desarrollar el umbral del estado de daño severo.

Finalmente, la Tabla 5.2 define los nuevos umbrales de daño.

Tabla 5.2. Umbrales de daño.

Estado de daño	Umbral del estado de daño $\bar{S}d_i$ ($i=1, 2, 3$ y 4)
Leve	$\bar{S}d_1 = \frac{A_y d^* Dy}{2 A_1} .k \leq 0.90 Dy$
Moderado	$\bar{S}d_2 = Dy$
Severo	$\bar{S}d_3 = Dy + FH (Du - Dy)$
Completo	$\bar{S}d_4 = Du$

A continuación, se presenta una aplicación y comparación de los estados de daño propuestos en este trabajo y los definidos en el *Capítulo 4*.

5.4. Comparación y aplicación de los estados de daño

El objetivo de este apartado, se basa en aplicar el método de evaluación de los estados de daño presentados en el *Capítulo 4*, y compararlos con los ED propuestos en la Tabla 5.2.

Se analizan y discuten tres casos de aplicación, los cuales corresponden a edificios de una misma tipología, hormigón armado con forjados reticulares. El primer caso corresponde a un edificio de 8 pisos con una altura de 24.00 m (RCH), el segundo es un edificio de 5 pisos (RCM) de 15.80 m de alto, ambos han sido modelados usando el programa RUAUMOKO. El tercer edificio, también tiene 5 pisos (RC3D) y es definido como regular en altura, es decir, tiene una altura de 3.00 m en cada piso, este edificio se ha modelado en 3D con el programa SAP2000. En este capítulo sólo se presentan, por medio de figuras y tablas, los resultados obtenidos y necesarios para la comparación de los estados de daño.

Para predecir la respuesta global de cada edificio, se realiza un análisis estático no lineal y, a través del método del espectro de capacidad, se calcula la respuesta máxima estructural.

En las gráficas de la figura 5.11 se presentan los espectros de capacidad obtenidos y su representación bilineal para los edificios RCH y RCM, además, se muestran los umbrales de daño definidos por Lagomarsino y Penna (2003), los cuales son representados por la letra ‘L’. En la misma figura, también se muestran los ED propuestos en la sección anterior, representados por la letra ‘R’.

En la figura 5.12, al igual que en la figura 5.11, se muestran los espectros de capacidad para el edificio RC3D y los estados de daño.

En la Tabla 5.3 se presentan los valores de los umbrales de daño para cada edificio.

Tabla 5.3. Valores de los estados de daño.

	$\bar{S}d_1(m)$	$\bar{S}d_2(m)$	$\bar{S}d_3(m)$	$\bar{S}d_4(m)$
RCH-L	0.0133	0.0189	0.0259	0.0468
RCH-R	0.0142	0.0189	0.0258	0.0468
RCM-L	0.00993	0.0142	0.0234	0.0511
RCM-R	0.00966	0.0142	0.0249	0.0511
RC3D-L	0.0215	0.0307	0.0532	0.121
RC3D-R	0.0276	0.0307	0.0373	0.121

Con los resultados obtenidos, se observa que los umbrales de daño L y R son muy parecidos en los edificios RCH y RCM, a diferencia de los umbrales obtenidos en el edificio RC3D. Se puede observar cómo en este último modelo estructural existe una variación en los estados de daño. En la figura 5.12, la curva de capacidad obtenida en el análisis estático no lineal, es una curva cuasi elasto-plástica, por lo tanto, se espera que muchos de los elementos estructurales (vigas y columnas) hayan plastificado después del punto de cedencia, manteniendo la ductilidad de todo el sistema hasta alcanzar la capacidad última en el punto donde se presenta el colapso de la estructura. Esto también se pudo observar durante el análisis con el mecanismo de evolución de las rótulas plásticas en los elementos estructurales del edificio.

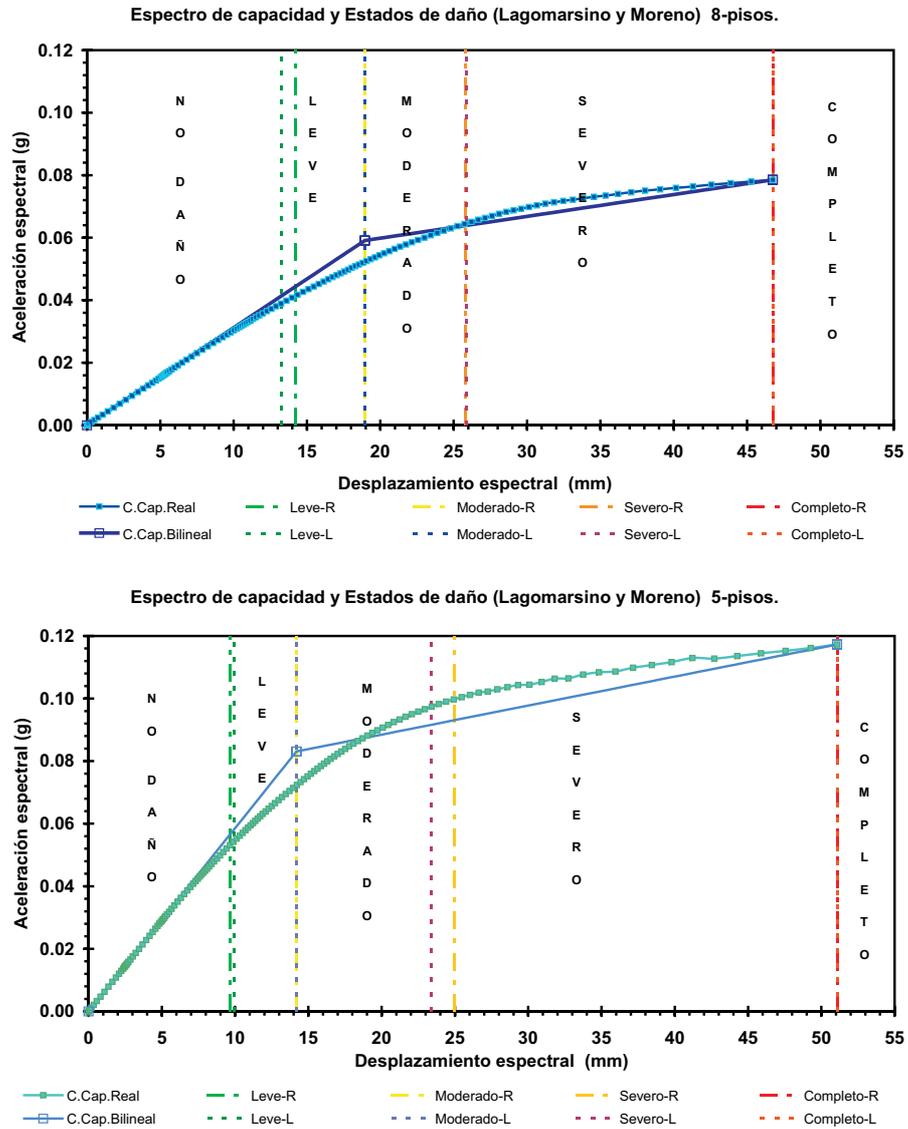


Figura 5.11: Espectros de capacidad y estados de daño, edificios RCH (arriba) y RCM (abajo).

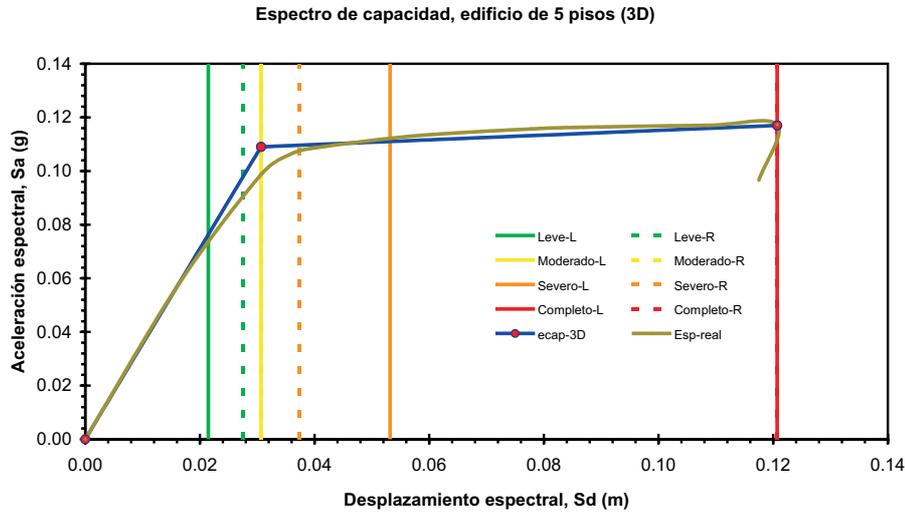


Figura 5.12: Espectros de capacidad y estados de daño, edificio RC3D.

5.5. Resumen

Este capítulo se basa en los umbrales de los estados de daño, para la evaluación del daño sísmico en edificios no existe un método único. Aquí se presentó un análisis de sensibilidad sobre los estados de daño definidos en el *Capítulo 4*, específicamente, se analizaron los umbrales de daño leve y severo, ya que se consideró que éstos presentan una mayor incertidumbre que los umbrales moderado y completo. Los parámetros que definen a los umbrales de daño leve y severo han sido variados hasta un 20%. En las figuras 5.3 y 5.4 se observó cómo ésta variación en la definición del umbral del estado de daño induce, para el estado de daño leve y severo, respectivamente a una variación del 72.5% y 2.5% en el grado de daño medio esperado. Por lo tanto, se puede ver cómo una pequeña alteración de la posición del umbral del estado de daño, tiene una influencia relevante en la distribución del daño esperado. Esto ha sido objeto de motivación para llevar a cabo una propuesta alternativa para la definición de los estados de daño. Esta nueva propuesta se basa en los estados de daño definidos en el capítulo anterior y no deja de

ser subjetiva, pero es más adecuada ya que se define con dos propiedades físicas del comportamiento dinámico del edificio, como son la rigidez y el endurecimiento. Estos nuevos umbrales de daño se obtienen a partir de un análisis estático no lineal para caracterizar al edificio mediante un espectro de capacidad bilineal.

Los estados de daño, aquí propuestos, deben seguir siendo estudiados, tanto para edificios de hormigón armado, como para otra tipología diferente de edificación, por lo que se considera a éste como una futura línea de investigación. En Barcelona no existen estudios de levantamiento de daños en las estructuras después de que se haya producido un evento sísmico, así como tampoco existen resultados de ensayos hechos en laboratorios que permitan evaluar las estructuras y calibrar (mediante simulaciones numéricas) algún estado de daño existente para las estructuras de la ciudad. Una forma de calibrar estos umbrales puede ser, a partir de estudios numéricos con modelos sofisticados basados, por ejemplo, en ecuaciones constitutivas que tengan el daño de los materiales como una variable interna.

