

Capítulo 4

Metodología para la evaluación del riesgo sísmico

4.1. Introducción

En este capítulo se describe la metodología empleada en este trabajo para la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de edificios, por medio de curvas de fragilidad. Las curvas de fragilidad describen la probabilidad de alcanzar o exceder diferentes estados de daño. Para construir estas curvas es necesario definir unas medidas objetivas que indiquen, cuándo el daño de una estructura pasa de un estado a otro; estas medidas se conocen como umbrales de daño o estados límite de daño.

Para realizar una evaluación de la integridad estructural, en términos de estados límite de daño, se relaciona el daño con la capacidad estructural del edificio. En este trabajo, la capacidad estructural se representa por una curva de capacidad, la cual se obtiene mediante un análisis estático no lineal.

Con los espectros de demanda, los cuales dependen de la acción sísmica considerada y la curva de capacidad, se determina la respuesta pico del edificio,

la cual representa la respuesta máxima de la estructura ante la acción sísmica a la que está sometida. Esta respuesta se conoce como punto de desempeño.

A partir de las curvas de fragilidad y el punto de desempeño se obtienen matrices de probabilidad de daño. Las matrices de probabilidad de daño permiten construir escenarios de daño que, a su vez, permiten estimar las pérdidas esperadas, como por ejemplo, las víctimas y el coste económico. Finalmente, los escenarios de riesgo sísmico son útiles para la prevención y el desarrollo de planes de emergencia.

4.2. Curva de capacidad

Una curva de capacidad se define como la relación que existe entre la resistencia a la carga lateral de una estructura y su desplazamiento lateral característico. Típicamente se obtiene por medio de un análisis estático no lineal, conocido en la literatura inglesa como análisis *pushover*.

El análisis *pushover* se puede llevar a cabo aplicando un patrón de cargas laterales a la estructura, que representen las fuerzas sísmicas, patrón que se va incrementando monótonicamente hasta alcanzar la capacidad última de la estructura o el colapso. El objetivo de este procedimiento es cuantificar la capacidad de la estructura para absorber una acción lateral como, en este caso, la de un sismo.

Durante el análisis, el cortante en la base va incrementado progresivamente manteniendo constante el patrón de fuerzas sísmicas distribuido en la altura del edificio. Para conseguir una representación realista de esfuerzos sísmicos, se emplea una distribución de las fuerzas sísmicas laterales, similar a las de las fuerzas sísmicas estáticas equivalentes, las cuales siguen la forma del modo fundamental de vibración o una distribución más sencilla, como puede ser triangular invertida, parabólica o uniforme (ver figura 4.1).

La forma de distribución de las fuerzas laterales (triangular, parabólica, uni-

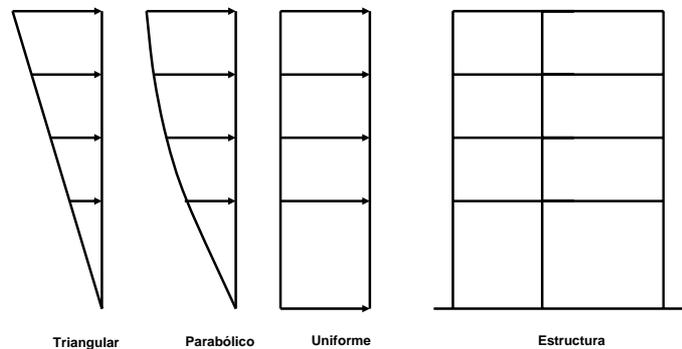


Figura 4.1: Patrones de distribución de cargas laterales para un análisis *pushover*.

forme) aplicadas a una estructura, influye en la determinación de las curvas de capacidad. No existe un único patrón de fuerzas que sea universalmente aceptado. Una solución práctica es utilizar al menos dos distribuciones diferentes y definir la curva de capacidad mediante la envolvente de los resultados obtenidos (Fajfar, 2000).

En la figura 4.2 se muestra una representación típica de una curva de capacidad, con el cortante en la base en el eje de las ordenadas, mientras que en el eje de abcisas se representa el desplazamiento lateral en el último piso del edificio.



Figura 4.2: Curva de capacidad.

Para facilitar una comparación directa con el espectro de demanda (el cual se utiliza para encontrar el desplazamiento de demanda en un sistema en el

rango inelástico, utilizando el espectro de respuesta del movimiento sísmico), la curva de capacidad se convierte a un espectro de capacidad mediante un cambio de variable, de forma que el cortante en la base se transforma a aceleración espectral y el desplazamiento en el último piso a desplazamiento espectral. Esto se hace utilizando las propiedades modales, como se describe en la siguiente sección.

4.3. Espectro de capacidad

Para obtener el espectro de capacidad de una estructura, se necesita transformar (punto a punto) la curva de capacidad a coordenadas espectrales. El espectro de capacidad es la representación de la curva de capacidad en un espacio de coordenadas espectrales conocido como ADRS (*ADRS: Acceleration-Displacement-Response-Spectra*) o como curva AD (aceleración-desplazamiento). Esta curva relaciona la aceleración espectral con el desplazamiento espectral (figura 4.3).

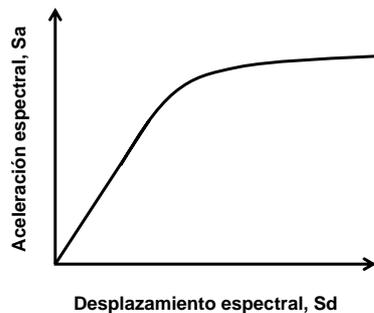


Figura 4.3: Espectro de capacidad.

Para llevar a cabo esta transformación, se necesita conocer las propiedades dinámicas de la estructura: modos de vibración y el factor de participación modal. Por lo que el primer paso es hacer un análisis modal de la estructura.

Una forma de transformar la curva de capacidad a espectro de capacidad es

por medio de las ecuaciones (4.1) y (4.2):

$$S_a = \frac{V/W}{\alpha_1} \quad (4.1)$$

$$S_d = \frac{\Delta_{techo}}{PF_1 * \phi_{1,techo}} \quad (4.2)$$

donde S_a , S_d son la aceleración y el desplazamiento espectral, respectivamente, V es el cortante en la base, W es la masa total, α_1 es la masa efectiva del primer modo de vibración, Δ_{techo} es el desplazamiento en el último piso, PF_1 es el factor de participación modal y $\phi_{1,techo}$ es el desplazamiento modal en la última planta del edificio. En estas ecuaciones, S_a representa la aceleración que sufre la masa desplazada según el modo fundamental, de igual forma, S_d es el desplazamiento generalizado del primer modo cuando el desplazamiento del techo es Δ_{techo} .

4.3.1. Espectro de capacidad bilineal

Con la finalidad de tener parámetros objetivos y cuantificables respecto al comportamiento de la estructura, el espectro de capacidad se representa por medio de una curva bilineal simplificada definida por dos puntos de control: capacidad de cedencia (Dy , Ay) y capacidad última (Du , Au) (ver figura 4.4).

El punto de *cedencia* representa el desplazamiento en el que la respuesta del edificio empieza a ser fundamentalmente no lineal. Este punto viene definido por (Dy , Ay), donde D se refiere al desplazamiento, A a la aceleración y el subíndice y se refiere a la cedencia.

El punto de capacidad *última* representa el desplazamiento en el que el sistema estructural global ha alcanzado el mecanismo de colapso. Este punto viene definido por (Du , Au), donde el subíndice u se refiere a la capacidad última.

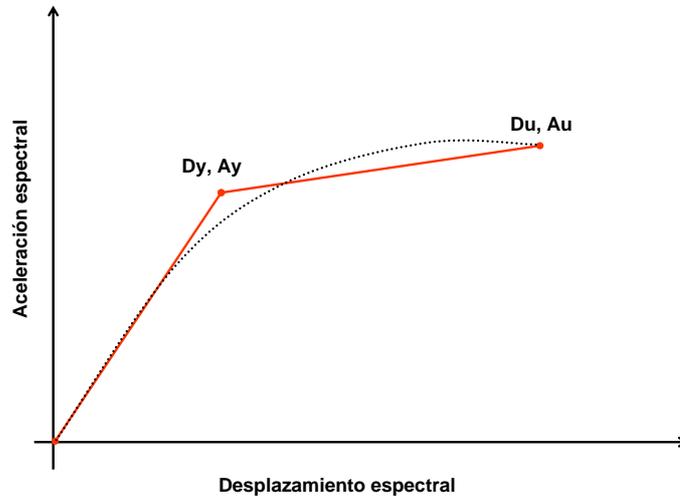


Figura 4.4: Representación bilineal de la curva de capacidad.

Los puntos de capacidad de cedencia y capacidad última son fundamentales ya que se relacionan con la ductilidad global de la estructura.

En este trabajo, la representación bilineal de la curva del espectro de capacidad se determinó con un criterio de balance de energía. Así, se busca una curva bilineal que pueda absorber la misma energía que la curva de capacidad real (área bajo la curva) 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.

El punto de desplazamiento último se obtiene cuando la estructura alcanza su capacidad última o cuando alcanza su máxima ductilidad de desplazamiento (μ_d), definida como,

$$\mu_d = \frac{D_u}{D_y} \quad (4.3)$$

Una estructura tiene ductilidad, cuando es capaz de responder inelásticamente a una acción sísmica prevista en su diseño, sin una degradación significativa

de la resistencia.

4.4. Espectro de demanda

El punto clave de la estimación del daño esperado en un edificio sometido a una acción sísmica es la determinación del máximo desplazamiento espectral que éste va a experimentar. El método del espectro de capacidad permite la obtención de esta respuesta máxima.

El método del espectro de capacidad fue desarrollado por Freeman (1990). Es el método adoptado por el ATC-40 (ATC, 1996) y por la metodología HAZUS (FEMA, 1999). En esta sección se ofrece una descripción del método del espectro de capacidad (*CSM: capacity spectrum method*). Este es el método que se utiliza, en este trabajo, para definir el punto de desempeño de la estructura. La elección de este método, ante otros métodos de evaluación de la respuesta máxima, se basa en que es un método ampliamente utilizado. Este método está implementado en una potente herramienta de cálculo estructural como es el programa de análisis dinámico no lineal SAP2000 (2002). Razón por la cual este método se ha implementado en un programa propio para conseguir el espectro reducido y la respuesta máxima estructural. El ATC-40 (1996) indica que, de acuerdo con estudios recientes para estructuras dominadas por la respuesta del primer modo de vibración, la metodología del espectro de capacidad da una buena estimación del desplazamiento máximo al compararse con una serie de análisis de historias en el tiempo (*time-history*), en los que fueron utilizados diferentes registros con la misma envolvente espectral.

El espectro de demanda es la representación de la acción sísmica y se basa en el espectro de respuesta de diseño, de la zona de estudio, con 5% de amortiguamiento, reducido para niveles mayores de amortiguamiento efectivo. El espectro es reducido para simular la energía disipada por la respuesta inelástica de la estructura mediante un amortiguamiento efectivo adicional. Cuando

una estructura es conducida al rango inelástico debido a un movimiento del suelo, el amortiguamiento efectivo puede ser visto como una combinación de amortiguamiento viscoso e hysterético.

La energía disipada por los ciclos de histerésis puede ser representada como amortiguamiento viscoso equivalente (ξ_{eq}) asociado a un desplazamiento máximo:

$$\xi_{eq} = \xi_0 + \xi_I \quad (4.4)$$

donde ξ_0 es el amortiguamiento hysterético representado como amortiguamiento viscoso equivalente, y donde ξ_I es el amortiguamiento viscoso inherente de la estructura en el rango elástico, el cual, para estructuras de hormigón armado y de mampostería, usualmente, se asume 0.05 (5 %).

Cuando un edificio cede en respuesta a la demanda sísmica, éste disipa energía con el amortiguamiento hysterético. Aquellos edificios que tienen una curva de histerésis estable durante su cedencia cíclica, tienen capacidad de disipar más energía que aquellos con curvas de histerésis con estrechamientos en el origen (efecto *pinching*) causada por la degradación de la resistencia y rigidez. Para considerar este tipo de respuestas menos dúctiles, se introduce un factor de modificación (κ) para definir el amortiguamiento viscoso efectivo (ξ_{eff}). De esta forma, el amortiguamiento viscoso equivalente definido en la ecuación (4.4) se modifica para tener en cuenta esta degradación. Así pues, el amortiguamiento viscoso efectivo viene dado por la ecuación (4.5):

$$\xi_{eff} = \kappa\xi_0 + \xi_I \quad (4.5)$$

El valor de ξ_0 puede ser obtenido a partir de:

$$\xi_0 = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{SO}} \quad (4.6)$$

donde E_D es la energía disipada por el amortiguamiento hysterético, que corresponde al área del paralelograma de la figura 4.5.

$$E_D = 4 (S_{ay}S_{dpi} - S_{api}S_{dy}) \quad (4.7)$$

E_{SO} corresponde a la máxima energía de deformación absorbida por la estructura, que es el área triangular sombreada de la figura 4.5.

$$E_{SO} = \frac{1}{2} (S_{dpi} S_{api}) \quad (4.8)$$

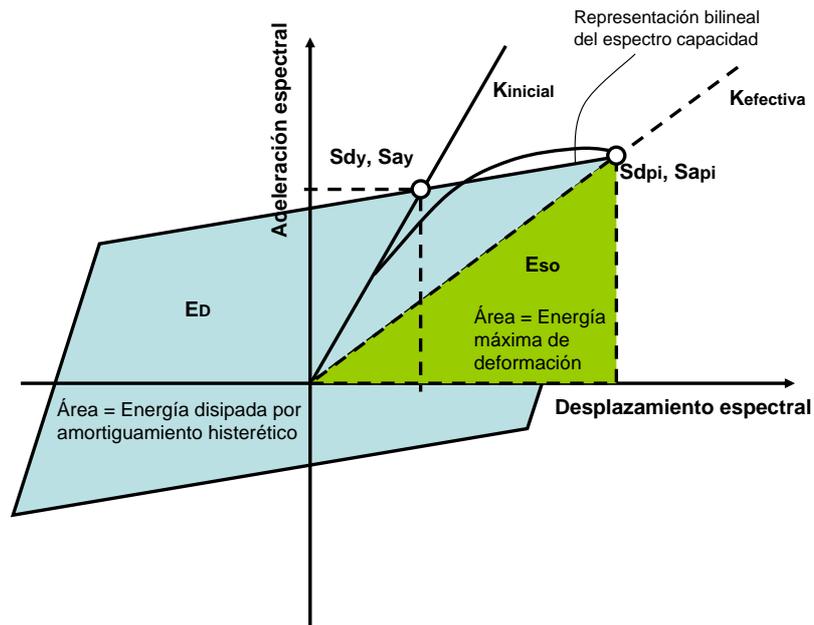


Figura 4.5: Energía disipada.

Como se dijo anteriormente, el factor κ depende del comportamiento global de los ciclos de histéresis del edificio. El ATC-40 (1996) ofrece tres categorías para definir el comportamiento de las estructuras de edificación, éstas son:

- Tipo A: edificios con, razonablemente, una curva de histéresis completa.
- Tipo B: edificios con reducción moderada del área de la curva de histéresis.
- Tipo C: edificios que presentan un comportamiento hysterético pobre con una reducción substancial del lazo de histéresis.

La Tabla 4.1, muestra los valores para el factor de modificación del amortiguamiento dependiendo del comportamiento estructural:

Tabla 4.1. Valores para el factor de modificación del amortiguamiento (ATC-40, 1996).

| Comportamiento Estructural | ξ_0 (%) | κ |
|----------------------------|-----------------|--|
| Tipo A | ≤ 16.25 | 1.0 |
| | > 16.25 | $1.13 - 0.51 \cdot \frac{E_D/4}{2 \cdot E_{SO}}$ |
| Tipo B | ≤ 25.0 | 0.67 |
| | > 25.0 | $0.845 - 0.446 \cdot \frac{E_D/4}{2 \cdot E_{SO}}$ |
| Tipo C | Cualquier valor | 0.33 |

A partir de aquí se obtiene el espectro de demanda reducido mediante la derivación numérica de los factores de reducción espectral, los cuales dependen del amortiguamiento efectivo y están definidos en la siguiente ecuación:

$$SR_a = \frac{3,21 - 0,68 \ln(\xi_{eff})}{2,12} \quad SR_v = \frac{2,31 - 0,41 \ln(\xi_{eff})}{1,65} \quad (4.9)$$

donde SR_a y SR_v son los factores de reducción en el dominio de aceleración constante y velocidad constante, respectivamente (ver figura 4.6).

Se debe comprobar que los valores resultantes de la derivación numérica de los factores de reducción espectral, sean mayores o iguales que los de la Tabla 4.2 (ATC-40, 1996).

Tabla 4.2. Valores mínimos permitidos SR_a y SR_v (ATC-40, 1996).

| Comportamiento Estructural | SR_a | SR_v |
|----------------------------|--------|--------|
| Tipo A | 0.33 | 0.50 |
| Tipo B | 0.44 | 0.56 |
| Tipo C | 0.56 | 0.67 |

A partir de aquí se calcula el espectro de demanda.

4.4.1. Punto de desempeño

Superponiendo el espectro de capacidad y el de demanda se obtiene la respuesta máxima del edificio, en el punto de intersección de ambos espectros. Este punto es conocido como *punto de desempeño*, o bien en la literatura inglesa como *Performance Point*. El punto de desempeño (PD) representa el máximo desplazamiento estructural esperado para el terremoto de demanda (figura 4.6).

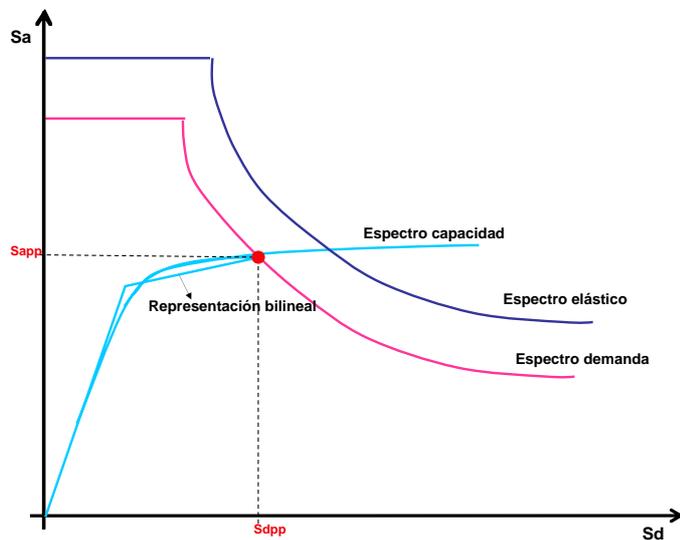


Figura 4.6: Espectros de capacidad y demanda y punto de desempeño.

Obsérvese que los factores de reducción del espectro dependen del nivel de no linealidad a la que la estructura está trabajando, el cual, a su vez, depende de la intersección del mismo espectro de demanda con el espectro de capacidad. Lo que significa que el cálculo del *PD* es un proceso iterativo.

Existen varios métodos para calcular el *PD*, a continuación se explican los pasos a seguir para calcular el espectro de demanda y el punto de desempeño, siguiendo el *Procedimiento A* del ATC-40 (1996).

El método de obtención del punto de desempeño se basa en un proceso iterativo que puede ser programado. Los pasos a seguir para llevar a cabo este

procedimiento son:

1. Obtener el espectro de respuesta elástico (5 % de amortiguamiento).
2. Transformar la curva de capacidad a espectro de capacidad (*sección 4.3*).
3. Seleccionar un punto de prueba (ap_i, dp_i). Se recomienda tomar, como punto de partida dp_i , el punto donde siguiendo con la misma pendiente inicial de la curva de capacidad, ésta corte al espectro de respuesta. La ordenada ap_i será la correspondiente al dp_i en la curva de capacidad.
4. Construir una representación bilineal del espectro de capacidad para estimar el amortiguamiento efectivo y tener una apropiada reducción del espectro de demanda. La representación bilineal del espectro de capacidad se realiza de forma que el área bajo y sobre la curva de capacidad sean iguales.
5. Calcular los factores de reducción SR_a y SR_v y dibujar los espectros de demanda y de capacidad sobre un mismo gráfico.
6. Determinar si dp_i está dentro del intervalo de tolerancia. El ATC-40 (1996), recomienda el rango: $0.95dp_i \leq dp_i \leq 1.05dp_i$. Debe haber una intersección entre el espectro de demanda y el espectro de capacidad dentro de esta tolerancia, si esto no ocurre, se debe seleccionar un nuevo punto de prueba y repetir el proceso, se tiene que iterar hasta encontrar un dp_i dentro de la tolerancia dada.

Este método ha sido implementado en un programa, que permite fijar y reducir el factor de tolerancia y el tipo de comportamiento estructural (Tabla 4.2). Debido a que los espectros de demanda y capacidad se dan de forma discreta, para la construcción de la curva bilineal ha sido necesario implementar un algoritmo de integración numérica. Se ha empleado la regla del trapecio. Finalmente, para los cálculos hechos en esta tesis, la tolerancia se redujo a

un 3%, ya que no suponía un aumento excesivo del esfuerzo de cálculo y se conseguía una mejor tolerancia.

4.5. Curvas de fragilidad

La fragilidad de un edificio está relacionada con su vulnerabilidad sísmica y se cuantifica mediante curvas de fragilidad.

La curva de fragilidad es 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 dada.

Las curvas de fragilidad se construyen con respecto a una variable que caracteriza la acción sísmica. Esta variable suele ser la aceleración pico efectiva (PGA), la velocidad pico efectiva (PGV), el desplazamiento espectral (Sd), o la aceleración espectral (Sa).

En este trabajo se ha adoptado la metodología HAZUS (FEMA, 1999) que define estas curvas suponiendo que siguen una distribución de probabilidad tipo lognormal. Así pues, las curvas de fragilidad se definen mediante la siguiente ecuación,

$$P[ED \geq ED_i] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ED}} \ln \left(\frac{Sd}{\bar{S}d_{ED}} \right) \right] \quad (4.10)$$

donde $\bar{S}d_{ED}$ 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, Φ es la función de distribución normal estándar acumulada y Sd es el desplazamiento espectral.

En la metodología HAZUS (FEMA, 1999), los valores medios de desplazamiento espectral ($\bar{S}d_{ED}$), y los valores de desviación estándar (β_{ED}) son dados para 36 clases de edificios. Estos valores se basan en ensayos experimentales

y en la opinión de expertos. En HAZUS, estos valores medios se definen en términos de las derivas del edificio. Sin embargo, es posible convertir estas derivas a desplazamientos espectrales mediante la siguiente ecuación:

$$\bar{S}d_{ED} = \delta_{ED} \alpha_2 H \quad (4.11)$$

donde $\bar{S}d_{ED}$ es el valor medio del desplazamiento espectral de los componentes estructurales para el estado de daño (ED), δ_{ED} es la deriva en el umbral del estado de daño, α_2 es la fracción de la altura del edificio en el que se localiza el desplazamiento del modo del pushover y H es la altura total del edificio. Los valores de las derivas δ_{ED} propuestas en HAZUS, se basan en un estudio realizado por la empresa *OAK Ingenieros* (OAK, 1994), los cuales revisaron y sintetizaron la información disponible de deriva-daño a partir de varias publicaciones (Kustu et al., 1982; Ferritto, 1982 y 1983; Czarnecki, 1973; Hasselman et al., 1980; Whitman et al., 1977 y Wong, 1975).

Así pues, cada curva de fragilidad puede ser definida por un valor medio del parámetro de demanda, por ejemplo, por el desplazamiento espectral medio, $\bar{S}d_{ED}$, correspondiente al umbral de un estado de daño y por la variabilidad asociada con este estado de daño.

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 aquel para el que no se produce daño, hasta aquel 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. La metodología HAZUS proporciona curvas de fragilidad para 36 tipos de edificios por lo que, a falta de datos específicos, es posible adoptar los valores allí propuestos para tipologías razonablemente similares. 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. A continuación se define una forma simplificada para hallar los parámetros que caracterizan las curvas de fragilidad.

4.5.1. Umbrales de los estados de daño

El daño esperado en un edificio depende de su capacidad y de su fragilidad, estos no son conceptos independientes sino que se hallan íntimamente relacionados entre sí. Existen diferentes formas para cuantificar el daño de una estructura sometida a un evento sísmico. En este apartado se expone 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. A partir de estos umbrales de daño, los valores de β_{ED} han sido calculados para construir las curvas de fragilidad.

A continuación se presentan y describen los umbrales de daño utilizados para la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de los edificios analizados en este trabajo. Estos estados de daño forman parte de la propuesta, por parte de Lagomarsino y Penna (2003), en el proyecto de la Comisión Europea RISK-UE.

Se suponen cuatro estados de daño diferentes del estado de daño nulo (no daño): leve, moderado, severo y completo. Los umbrales de daño o valores medios de la distribución de probabilidad de las curvas de fragilidad definidos en la ecuación (4.10) se determinan a partir de los parámetros Dy (desplazamiento de cedencia) y Du (desplazamiento último) definidos en la forma bilineal de la curva de capacidad.

Definición de los umbrales de daño, $\bar{S}d_i$:

- *Daño leve*, es definido antes de alcanzar el punto de cedencia,

$$\bar{S}d_1 = 0,7 Dy \quad (4.12)$$

- *Daño moderado*, es definido en el punto de la capacidad de cedencia,

$$\bar{S}d_2 = Dy \quad (4.13)$$

- *Daño severo*, es definido después del punto de cedencia, pero no mucho más allá de éste,

$$\bar{S}d_3 = Dy + 0,25 (Du - Dy) \quad (4.14)$$

- *Daño completo*, es un daño muy fuerte donde la estructura es inhabitable pero no colapsa, es definido en el punto de la capacidad última,

$$\bar{S}d_4 = Du \quad (4.15)$$

La figura 4.7 muestra un ejemplo de representación de los umbrales de daño.

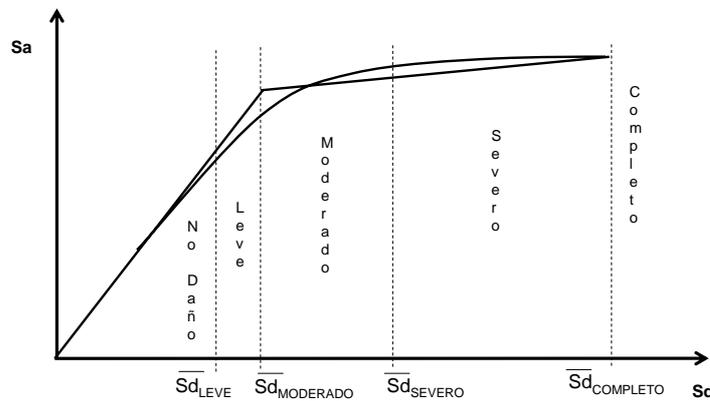


Figura 4.7: Umbrales de los ED adoptados en RISK-UE.

Obsérvese que los valores 0.7 para el estado de daño leve y 0.25 para el estado de daño severo proceden de un juicio experto. En el capítulo siguiente, se efectúa un análisis de sensibilidad del método aquí expuesto y se discute y efectúa una propuesta alternativa. Esta propuesta original para la determinación de los umbrales de daño, tiene en cuenta una descripción más completa de la capacidad estructural, dependiendo, además, de la ductilidad y del endurecimiento global que presenta la curva de capacidad.

4.5.2. Desviación estándar

El procedimiento propuesto para determinar la desviación estándar asociada a cada desplazamiento espectral medio se ha desarrollado dentro del proyecto europeo *RISK-UE: “An advanced approach to earthquake risk scenarios with application to different European towns”*, dentro del grupo de trabajo nº 4, titulado: *“Vulnerability Assessment of Current Buildings”*, el cual se encarga de la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificios. Los desarrollos realizados en el proyecto RISK-UE, permiten obtener escenarios de riesgo sísmico mediante dos metodologías. La metodología 1 (L1) define funciones de vulnerabilidad media semi-empírica que correlacionan un grado de daño medio (μ_d) con la intensidad macrosísmica (I) y un índice de vulnerabilidad (V_I). La metodología 2 (L2) es análoga a la metodología HAZUS (FEMA, 1999), donde el sismo de entrada se expresa en términos del espectro de demanda.

Para obtener la desviación estándar correspondiente a cada desplazamiento espectral medio, se tiene en cuenta que la probabilidad de cada estado de daño en su desplazamiento espectral medio es del 50 % y se supone que la probabilidad de los otros estados de daño siguen una distribución binomial (o beta). En los siguientes pasos se presenta este procedimiento para la obtención de la desviación estándar (Moreno et al., 2003b); primero, en los puntos 1, 2 y 3, se describe someramente cómo se obtiene la distribución del daño en el método L1 de RISK-UE y en el punto 4, se explica cómo utilizar este tipo de distribuciones para estimar las desviaciones típicas.

1. Se estima el índice de vulnerabilidad (V_I), el cual se utiliza para cuantificar de forma convencional el comportamiento de un edificio. Este índice tiene en cuenta ciertos factores tales como el número de pisos, la edad de las estructuras, las irregularidades del edificio y, además, considera los datos de vulnerabilidad observada y de opinión de expertos.
2. Se estima el grado de daño medio (μ_d), para un índice de vulnerabilidad

(V_I) y la correspondiente intensidad sísmica (I)

$$\mu_D = 2,5 \left\{ 1 + \tanh \left(\frac{I + 6,25V_I - 13,1}{2,3} \right) \right\} \quad (4.16)$$

El índice de vulnerabilidad varía entre 0 y 1, los valores cercanos a 1 representan los edificios más vulnerables, μ_d toma valores entre 0 y 5.

3. Se estima la distribución del daño, se debe calcular usando la función de distribución de probabilidad beta (FDP), ésta es usada para calcular la matriz de probabilidad de daño para cada clase de vulnerabilidad

$$FDP : P_\beta(x) = \frac{\Gamma(t)}{\Gamma(r)\Gamma(t-r)} \frac{(x-a)^{r-1}(b-x)^{t-r-1}}{(b-a)^{t-1}} \quad (4.17)$$

La FDP es utilizada para obtener la distribución de probabilidad discreta correspondiente a los cinco estados de daño (incluyendo el no daño). a , b , t , r son los parámetros de la distribución y x es la variable continua y está acotada por: $a \leq x < b$

El parámetro r es una función de t y μ_d , definida por el siguiente polinomio de tercer grado

$$r = t (0,007 \mu_D^3 - 0,0525 \mu_D^2 + 0,2875 \mu_D^1) \quad (4.18)$$

El parámetro t afecta la dispersión de la distribución. Para que esta distribución se ajuste bien a la distribución binomial se utiliza un valor de $t=8$. Esta distribución está señalada en la escala de intensidad EMS-98 (Grünthal, 1998) como la que mejor ajusta la distribución de los daños observados.

Para usar la distribución beta, es necesario hacer referencia al grado de daño, el cual es una variable discreta, caracterizado por 5 grados de daño, por lo tanto $a=0$ y $b=5$ (Lagomarsino et al., 2002).

La probabilidad de que el daño sea mayor o igual a un grado de daño, se obtiene integrando la función FDP , ecuación (4.17), entre a y el grado de daño correspondiente x (ver ecuación (4.19)):

$$P_c(x) = \int_a^x P_\beta(\varepsilon) d\varepsilon \quad (4.19)$$

Las curvas de fragilidad definen la probabilidad de alcanzar o exceder un cierto grado de daño x y son obtenidas directamente a partir de una distribución de probabilidad acumulada beta como: $P(ED \geq ED_x) = 1 - P_\beta(x)$.

En la Tabla 4.4 se presentan los valores obtenidos de μ_d junto con la distribución de probabilidad del estado de daño esperado, cuando la probabilidad para cada estado de daño: leve, moderado, severo y completo (1, 2, 3 y 4, respectivamente) está fijada al 50%.

Tabla 4.4. Distribución discreta de las probabilidades.

| Condición | μ_d | $P_\beta(1)$ | $P_\beta(2)$ | $P_\beta(3)$ | $P_\beta(4)$ |
|---------------------|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| $P_\beta(1) = 0,50$ | 0.911 | 0.500 | 0.119 | 0.012 | 0.000 |
| $P_\beta(2) = 0,50$ | 1.919 | 0.896 | 0.500 | 0.135 | 0.008 |
| $P_\beta(3) = 0,50$ | 3.081 | 0.992 | 0.866 | 0.500 | 0.104 |
| $P_\beta(4) = 0,50$ | 4.089 | 1.000 | 0.988 | 0.881 | 0.500 |

4. Se determina la desviación estándar β_{ED} . Éstas son determinadas a partir de un ajuste por mínimos cuadrados de la distribución lognormal de la ecuación (4.10) que define las curvas de fragilidad de los puntos dados de la Tabla 4.4.

Un ejemplo de las curvas de fragilidad ajustadas se puede observar en la figura 4.8. Los puntos que están en la figura son los puntos dados en la Tabla 4.4.

En este trabajo, se ha utilizado éste método para la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico en los edificios de hormigón armado para los diferentes escenarios sísmicos de Barcelona (ver *Capítulo 6*). Así como también, en algunos casos de evaluación, se han utilizado los valores de β_{EDi} dados en HAZUS para un mismo tipo de edificio a los aquí analizados.

Después de obtener las curvas de fragilidad, es posible construir matrices de probabilidad de daño y calcular un parámetro indicador del daño global de

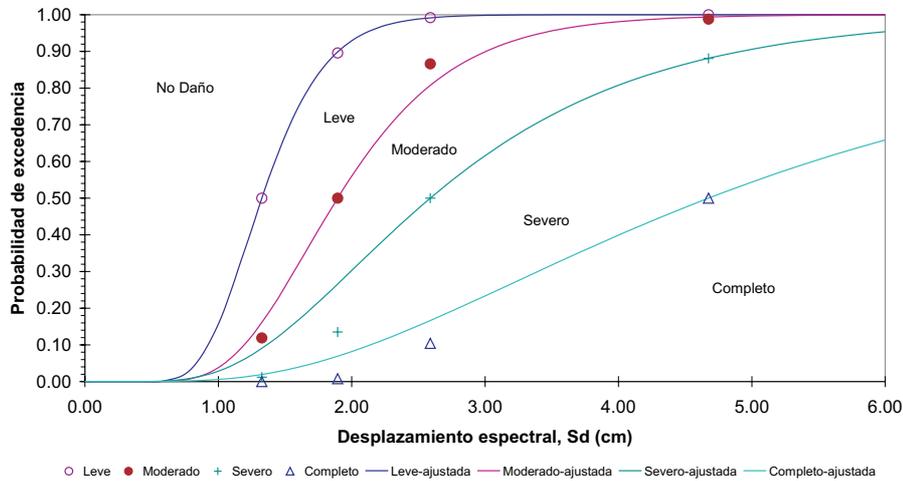


Figura 4.8: Curvas de fragilidad ajustadas por mínimos cuadrados.

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.

4.6. Matrices de probabilidad de daño

A partir de las curvas de fragilidad es posible obtener la probabilidad de ocurrencia de cada estado de daño y construir *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 desplazamiento espectral, ver figura 4.10) y obtener las probabilidades

correspondientes a cada estado de daño. Así, por ejemplo, la probabilidad de que se dé el estado de daño moderado para un desplazamiento espectral S_d , vendrá dada por la diferencia entre la probabilidad del umbral de daño moderado menos la probabilidad del umbral de daño severo, ver figura 4.9 y ecuación (4.20).

$$P[ED_i / S_d] = P_c(ED_i / S_d) - P_c(ED_{i+1} / S_d) \quad (4.20)$$

$P[ED_i / S_d]$ es la probabilidad de que ocurra el estado de daño ED_i cuando la estructura tiene un desplazamiento espectral S_d y $P_c(ED_i / S_d)$ es la probabilidad de excedencia de ED_i para un S_d , es decir, la curva de fragilidad correspondiente al ED_i .

La figura 4.9 muestra el procedimiento de lectura de los estados de daño sobre las curvas de fragilidad.

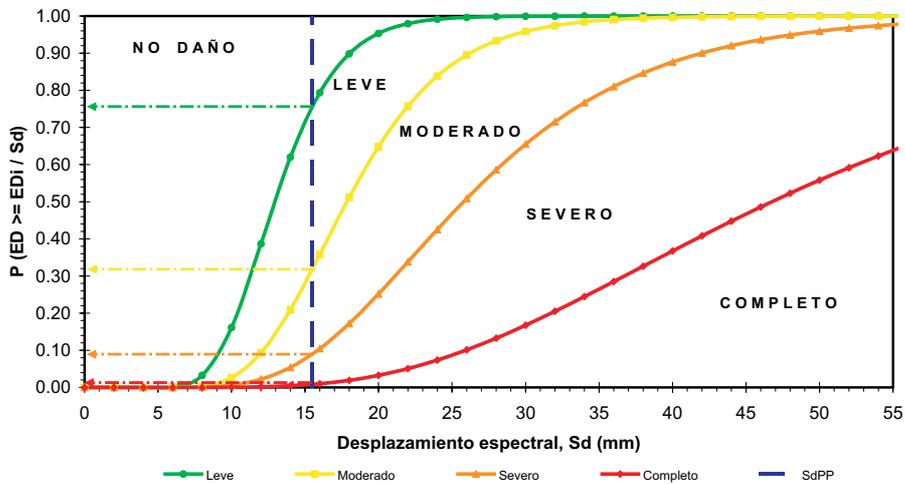


Figura 4.9: Lectura de los ED sobre las curvas de fragilidad.

En este trabajo se construirán espectros de capacidad y curvas de fragilidad para edificios de hormigón armado y de mampostería típicos de Barcelona. Asimismo, se desarrollarán matrices de probabilidad de daño específicas para escenarios sísmicos que es razonable esperar para la ciudad.

4.7. Parámetro de daño medio

Una vez obtenido el punto de desempeño y calculadas las curvas de fragilidad para una clase de edificio específico, se obtiene la probabilidad de alcanzar o exceder un estado de daño. Este proceso de estimación del daño del edificio, está esquematizado en la figura 4.10, donde las curvas de fragilidad se han caracterizado usando el desplazamiento espectral como parámetro representativo de la acción sísmica. El proceso de la figura 4.10 para obtener matrices de probabilidad de daño sigue este orden: primero, se obtiene la respuesta del edificio (Sd_{pp}) como se muestra en la figura 4.10 (arriba y a la izquierda), luego se obtienen las curvas de fragilidad (figura 4.10, abajo), en esta misma figura, se entra en las curvas de fragilidad con la respuesta del edificio y se obtienen las probabilidades para cada estado de daño, las cuales se muestran en la figura 4.10 (arriba y a la derecha).

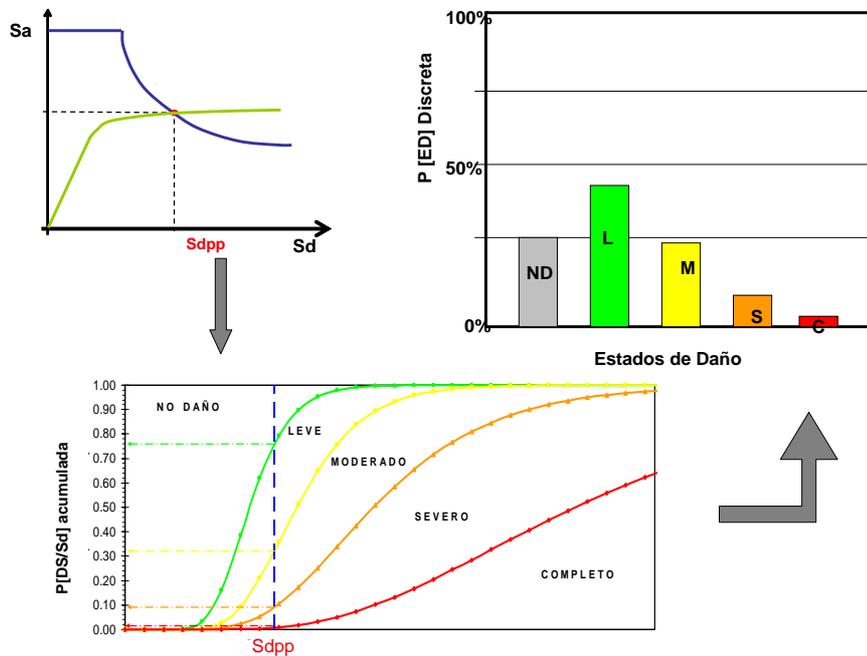


Figura 4.10: Proceso de estimación del daño en edificios.

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

$$D_M = \sum_{i=0}^{i=4} i.P(i) \quad (4.21)$$

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 4.5 muestra los intervalos de variación de D_M :

Tabla 4.5. Intervalos de variación del parámetro de D_M .

| Estado 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 | $3.5 \leq D_M < 4.0$ |

A partir de aquí se pueden generar *escenarios de daño sísmico* para una tipología de edificios situados dentro de un entorno urbano. Estos escenarios permiten analizar el comportamiento sísmico de las estructuras y, a partir de ellos, se pueden generar planes de emergencias. Una vez obtenido el daño físico directo, se pueden emplear técnicas para analizar o desarrollar otros escenarios de interés, tales como pérdidas económicas, escombros y números de fallecidos, entre otros.

Coburn y Spence (2002) proponen fórmulas empíricas que permiten hacer estimaciones razonables de este tipo de pérdidas.

4.8. Resumen

Se ha presentado una metodología para llevar a cabo un análisis de la vulnerabilidad y del riesgo sísmico por medio de curvas de fragilidad, las cuales describen las fronteras entre los estados de daño. Las curvas de fragilidad se han generado a partir de una función de distribución lognormal. Para esto, se ha necesitado calcular, principalmente, dos parámetros, uno es el desplazamiento espectral medio asociado a los estados de daño, el cual se obtuvo a partir de un espectro de capacidad que resulta de un análisis estático no lineal, y el segundo parámetro necesario es la desviación estándar, la cual se obtiene mediante una técnica de evaluación del daño.

El análisis estático no lineal es una técnica útil para estudiar la respuesta no lineal de estructuras sometidas a un patrón de fuerzas horizontales ya conocido, para así determinar la relación fuerza-desplazamiento. Este proceso es independiente del método utilizado para calcular la demanda.

La respuesta máxima estructural se ha determinado por medio del método del espectro de capacidad, superponiendo el espectro de demanda y el espectro de capacidad. El punto de intersección de ambos espectros determina la respuesta máxima de la estructura, para esto, es necesario realizar un proceso iterativo. Este método fue implementado en un programa de ordenador.

Como umbrales de daño, se han utilizado los propuestos, en el proyecto RISK-UE por Lagomarsino y Penna (2003). Estos umbrales se definen a partir de los puntos de capacidad de cedencia y capacidad última del espectro de capacidad.

La variabilidad de cada estado de daño β_{EDi} , se ha definido a partir de suponer que, dado un estado de daño, la distribución de daño para una

misma clase de edificio sigue una distribución binomial. Por lo tanto, para cada estado de daño es necesario calcular $\bar{S}d_{EDi}$ y β_{EDi} , siendo el subíndice i un estado de daño.

Esta metodología se aplicará más adelante, a un grupo de edificios de la ciudad de Barcelona, pertenecientes a tipologías ampliamente existentes en la ciudad, como son los edificios de hormigón armado y los de obra de fábrica de ladrillo (conocidos en Latinoamérica como edificios de *concreto armado* y de *mampostería no reforzada*). Los resultados obtenidos de la evaluación de estas estructuras se presentan en los próximos capítulos.

