

Capítulo 4

Curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño

4.1 Introducción

El campo de la fiabilidad estructural (seguridad de funcionamiento) proporciona un marco ideal para evaluar la importancia que, sobre su seguridad, funcionamiento y durabilidad, tienen las incertidumbres en la amenaza, las cargas estructurales, la resistencia y la rigidez de la estructura. En este contexto el diseño, para determinados niveles de desempeño, requiere la conexión entre los estados límite estructurales y su probabilidad de ocurrencia. Una de las formas más utilizadas para representar el funcionamiento de una estructura son las curvas de fragilidad. Éstas representan la probabilidad de que la respuesta de una estructura exceda un determinado estado límite, en función de un parámetro que define la intensidad del movimiento del suelo. En otras palabras, puede decirse que son una medida de la vulnerabilidad sísmica de una estructura en términos probabilistas. La construcción de estas curvas, requiere de un entendimiento completo de los mecanismos de respuesta del sistema estructural para diferentes niveles de la demanda sísmica, los cuales varían entre movimientos frecuentes de baja intensidad hasta movimientos fuertes poco frecuentes. Generalmente para estos últimos, el comportamiento de la estructura es altamente no lineal e implica un grado de complejidad elevado, por lo tanto, se recomienda utilizar un tipo de análisis que permita modelar este comportamiento. Una buena opción consiste en definir un grupo de acelerogramas que representen las principales características de los movimientos en la zona, tanto desde el punto de vista de aceleraciones pico o efectivas como de duración y contenido frecuencial y, evaluar la respuesta de la estructura cuando se somete a estas aceleraciones, mediante un análisis dinámico no lineal.

Las curvas de fragilidad son de gran utilidad para los ingenieros de diseño, investigadores, expertos en fiabilidad, expertos de compañías de seguros y administradores de sistemas críticos, tales como hospitales y autopistas, entre otros, debido a que

son un ingrediente esencial para los siguientes tipos de estudio:

- Evaluación del riesgo sísmico de los sistemas estructurales.
- Análisis, evaluación y mejora del funcionamiento sísmico tanto de los sistemas estructurales como de los no estructurales.
- Identificación de diseños óptimos y estrategias de rehabilitación.
- Determinación de las probabilidades de los márgenes de seguridad de las estructuras para diferentes movimientos sísmicos, las cuales pueden servir para la toma de decisiones y elaboración de las normativas utilizadas por las entidades responsables de la seguridad de los sistemas y protección de los usuarios.

En este capítulo se presentan los principales métodos utilizados para la generación de las curvas de fragilidad, los cuales difieren básicamente en los datos de entrada y en el método de obtención de las probabilidades asociadas a cada estado de daño, estos son: 1) métodos basados en observaciones de campo, 2) métodos experimentales, 3) métodos basados en la opinión de expertos y 4) métodos analíticos. Por lo general, todos ellos ajustan una función de distribución lognormal, $\Phi[\cdot]$, a los resultados obtenidos, de tal forma que es posible determinar las probabilidades de exceder o igualar un estado discreto de daño ED_i para un cierto valor del parámetro indicador de la intensidad sísmica (PIS) esto es:

$$P(ED \geq ED_i / PIS) = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{PIS,ED_i}} \ln \left(\frac{PIS}{\overline{PIS}} \right) \right] \quad (4.1)$$

\overline{PIS} y β_{PIS,ED_i} son respectivamente la media y la desviación estándar del logaritmo natural de PIS para el estado de daño ED_i . Estos valores se determinan por medio de un ajuste de mínimos cuadrados sobre las probabilidades obtenidas mediante cualquier métodos de evaluación (analítico, experimental, empírico, etc).

Durante el desarrollo de este capítulo se hace especial énfasis en los métodos analíticos que se han utilizado para generar curvas de fragilidad para edificios de mampostería no reforzada característicos de la ciudad de Barcelona (España) y edificios de hormigón armado típicos de la ciudad de Manizales (Colombia).

4.2 Métodos basados en observaciones de campo

Los métodos utilizados para la generación de curvas de fragilidad a partir de los daños observados, son de gran utilidad para calibrar los resultados obtenidos con los métodos analíticos y/o ensayos de laboratorio. En este sentido, los daños registrados durante, por ejemplo, los sismos de Marmara, en Turquía, y Chi-Chi, en Taiwan, fueron de gran utilidad para el desarrollo de curvas de fragilidad (Shinozuka et al., 2000).

Para aplicar estos métodos, las estructuras existentes se clasifican por tipologías y para cada una de ellas, se definen varias clases de acuerdo a las principales características geométricas (altura, área en planta, número de niveles, etc.) y a los aspectos relacionados con el uso e importancia de las estructuras. En cuanto a la intensidad del movimiento, ésta se determina en cada una de las zonas donde se encuentran localizadas las estructuras analizadas. Así, a partir de los daños observados durante las inspecciones después de ocurrido un sismo, es posible generar curvas de fragilidad para cada una de las clases identificadas previamente.

Este tipo de métodos requieren de la participación de expertos en diseño, análisis y patología de estructuras para poder elaborar los formularios de inspección que permiten describir los daños observados. Generalmente, estos formularios se componen de una serie de preguntas, tipo test, las cuales pueden ser luego utilizadas para relacionar los daños observados con el grado de deterioro de la estructura. Lo aconsejable es que estos formularios sean utilizados por profesionales especializados en el tema para reducir las incertidumbres asociadas al carácter subjetivo de estos métodos.

El procedimiento empleado para construir las curvas de fragilidad, para una clase de estructuras en particular, a partir de daños observados, puede describirse mediante los siguientes pasos:

- Sea n el número de sismos para los cuales se dispone de datos de daños.
- Para cada sismo i , se determina el parámetro que caracteriza la intensidad del movimiento, por ejemplo, la aceleración máxima del terreno a_i registrada en cada zona, esto es:

$$a_i = PGA_i \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n \quad (4.2)$$

donde $a_1 < a_2 < \dots < a_n$.

- Determinación del número de estructuras N_k sometidas a un sismo i con una aceleración máxima del terreno igual a a_i .
- Definición y descripción del número de estados discretos de daño ED_j .
- Cálculo del número de estructuras m_l que exceden los estados de daño ED_j , para cada a_i .
- Para cada estado de daño ED_j , se estima la probabilidad de fallo f_i de la estructura cuando se ve sometida a un sismo con una $PGA = a_i$, mediante la siguiente expresión:

$$f_i = \frac{m_l}{N_k} \quad (4.3)$$

- Ajuste de una función de distribución para el grupo de datos obtenidos (a_i, f_i) correspondientes a cada estado de daño ED_j , como por ejemplo la función lognormal de la ecuación (4.1).

Un ejemplo reciente de aplicación de este tipo de metodologías, son las curvas de fragilidad desarrolladas por Yamaguchi y Yamazaki (2000) para los edificios en Japón, a partir del informe realizado por el gobierno de la ciudad de Nishinomiya de los daños observados en diferentes estructuras después del sismo del 17 de Enero de 1995 en Hyogoken-Nanbu (Kobe - Japón). La Figura 4.1 muestra las curvas de fragilidad obtenidas para los edificios aporticados de madera para diferentes períodos constructivos. En este caso se utilizan la velocidad máxima del terreno PGV y la relación de daño (Damage Ratio), para representar la acción sísmica y la respuesta estructural respectivamente.

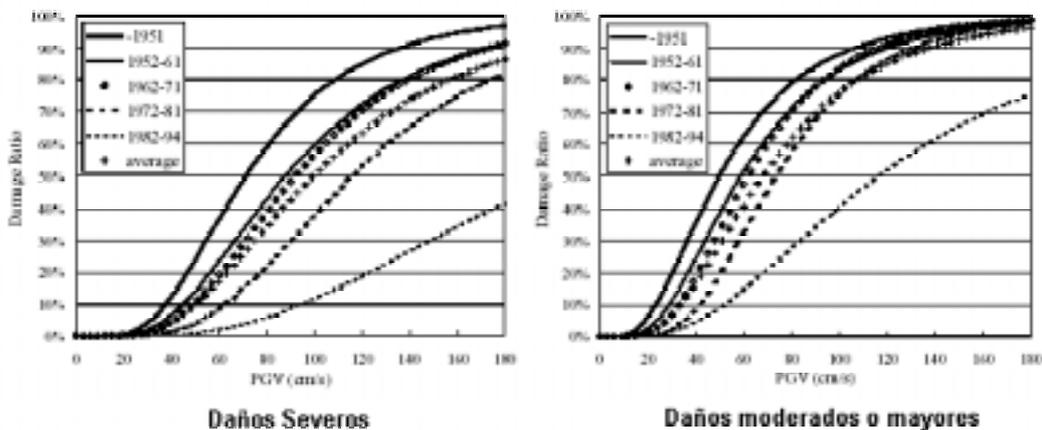


Figura 4.1. Curvas de fragilidad obtenidas a partir de los daños observados en el sismo de Kobe (Yamaguchi y Yamazaki, 2000).

Los métodos basados en las observaciones de campo, sólo deben ser utilizados para evaluar, de manera global, el comportamiento de las estructuras de una misma clase y no son recomendados para el análisis de una estructura en particular.

4.3 Métodos experimentales

El mismo procedimiento utilizado para generar las curvas de fragilidad a partir de observaciones de daño, puede ser empleado para los datos obtenidos a partir de ensayos de laboratorio. En este caso, el rango de intensidades y el tipo de estructura puede ser controlado de acuerdo a los requerimientos establecidos previamente. Sin embargo, los ensayos pueden ser costosos y la cantidad de observaciones de daños está limitada al número de pruebas que se realicen.

Estos métodos implícitamente, requieren de una serie de simplificaciones impuestas por el modelo a escala que se construye para representar el comportamiento de la estructura y por los patrones de carga utilizados para modelar la acción sísmica. Sin embargo, debe intentarse que estas simplificaciones no alteren la respuesta esperada de la estructura ante determinados movimientos sísmicos, para que, de esta forma, los resultados obtenidos puedan ser representativos del comportamiento global de la estructura.

En la actualidad, existen básicamente dos tipos de ensayos que pueden ser utilizados para construir estas curvas: 1) ensayos de carga monotónicamente creciente mediante actuadores de carga o desplazamientos y 2) ensayos sobre mesa vibradora, utilizando historias temporales de aceleración. Ambos ensayos proporcionan información de gran utilidad, no obstante, los ensayos del segundo tipo, son mucho más realistas, debido a que representan, de una forma más adecuada, la acción sísmica.

Chong y Soong (2000) desarrollaron curvas de fragilidad experimentales para componentes no estructurales. Para ello, determinaron los desplazamientos relativos entre un bloque rígido independiente y una superficie de piso rugosa, a partir de los ensayos realizados en una mesa vibradora utilizando cinco registros de aceleraciones de sismos típicos (El centro, Taft, Pacoima, Kobe y Northridge) elegidos aleatoriamente. Se consideraron cinco valores de aceleración máxima horizontal ($hPGA = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ y $0.7g$) y cuatro factores de escala diferentes para representar la aceleración máxima vertical ($\frac{vPGA}{hPGA} = 0, 1/4, 1/3$ y $1/2$). El primero de estos factores ($\frac{vPGA}{hPGA} = 0$), corresponde al caso en que no se considera la componente de aceleración máxima vertical. Las mediciones de los valores de $hPGA$ y $vPGA$ se hicieron en varios puntos de la mesa. Para medir los desplazamientos horizontales del bloque, se utilizaron tanto transductores de desplazamiento (Temposonic displacement transducers LVDT) como indicadores permanentes localizados sobre la superficie de deslizamiento. Se construyeron curvas de fragilidad para 8 umbrales de desplazamiento relativo entre 0.1 y 3 pulgadas. Estos umbrales pueden relacionarse directamente con los estados discretos de daño. La Figura 4.2 muestra un ejemplo de las curvas obtenidas para un umbral de desplazamiento relativo igual a 1 pulgada. En el eje de las abscisas están los valores de aceleración máxima horizontal, $hPGA$, y en las ordenadas las probabilidades de que el desplazamiento relativo sea mayor o igual a 1 pulgada.

4.4 Métodos a partir de la opinión de expertos

La estimación del porcentaje esperado de daño que puede sufrir un grupo de estructuras ante una intensidad sísmica dada, se determina también a partir de las respuestas de expertos en análisis, diseño y patología estructural, a una serie de preguntas relacionadas con el comportamiento de la estructura considerada. A partir de esta información se puede calcular un parámetro cuantificador del daño, que

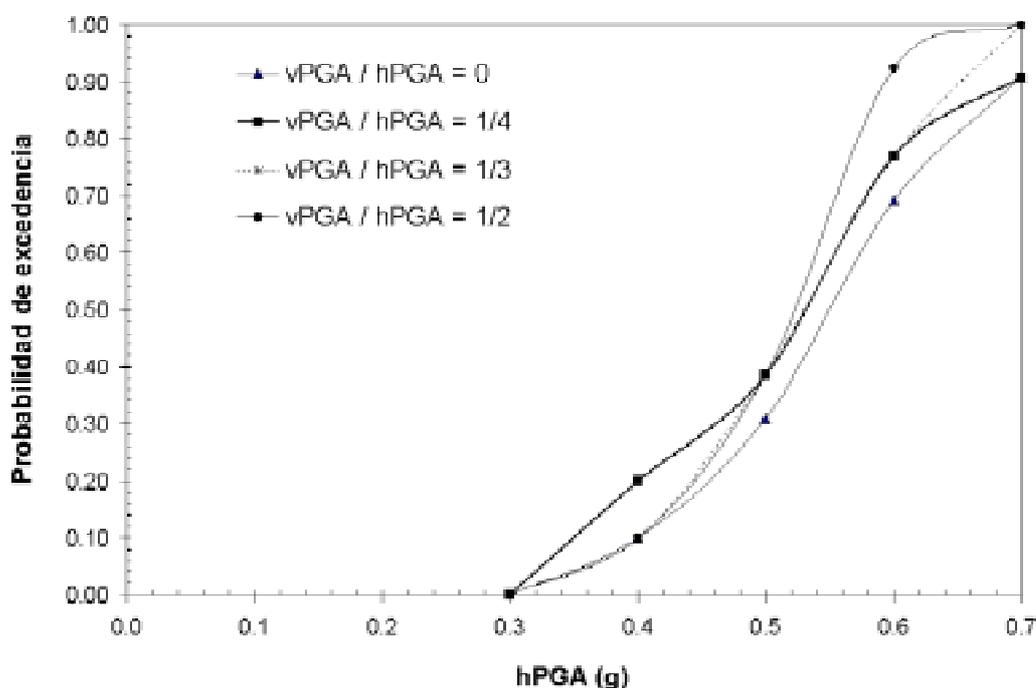


Figura 4.2. Ejemplo de curvas de fragilidad experimentales para un desplazamiento relativo máximo de 1 pulgada (Chong y Soong, 2000).

es función de la intensidad sísmica del movimiento. Una vez calculado este factor, para todas las estructuras correspondientes a una misma clase, se determinan los estadísticos de los resultados obtenidos y se ajusta una función de distribución de probabilidad (generalmente se utiliza la función beta). Posteriormente, se establecen los estados discretos de daño que se desean considerar y, para cada uno de estos, se define un intervalo de variación del parámetro cuantificador del daño. Las probabilidades para cada estado de daño se pueden determinar integrando la función de distribución elegida entre los límites de los respectivos intervalos. Las curvas de fragilidad se obtienen graficando estas probabilidades para cada valor de la intensidad sísmica.

Anagnos et al., (1995) siguieron este método para transformar las matrices de probabilidad de daño del ATC-13, en curvas de fragilidad para 40 clases de edificios. Para ello, utilizan la escala de intensidad de Mercalli modificada *MMI* para caracterizar la demanda sísmica y el factor de daño *df* (damage factor) para representar el comportamiento de la estructura. Este parámetro se define como la relación entre el costo de reparación y el costo de reposición para un determinado valor de la intensidad sísmica del movimiento. Se consideran 7 valores de *MMI* (variando entre *VI* y *XII* cada grado de intensidad) y 6 factores de daño *df* (0.1%, 1.0%, 10%, 30%, 60% y 99%). Para calcular las probabilidades de exce-

dencia, se utilizan los intervalos de variación propuestos en el ATC-13 (ver Tabla 4.1) y la función de distribución beta. Así por ejemplo de acuerdo a la Tabla 4.1, la probabilidad de exceder o igualar el estado de daño "Mayor" se obtiene integrando la función de distribución de probabilidad beta para los valores del factor de daño mayores o iguales al 60 %. La Figura 4.3 muestra cinco curvas de fragilidad para un edificio de mampostería no reforzada de elevación media obtenidas mediante este método. En este caso, los estados de daño están representados por los valores discretos del factor de daño.

Estado de Daño	Intervalo del Factor de Daño (%)	Factor de Daño Central (%)
Sin daño	0	0
Leve	0 - 1	0.5
Suave	1 - 10	5
Moderado	10 - 30	20
Fuerte	30 - 60	45
Mayor	60 - 100	80
Destrucción	100	100

Tabla 4.1. Estados discretos de daño e intervalos de variación del factor de daño (ATC, 1985).

En estos métodos, además de las incertidumbres inherentes a cualquier estimación del daño debido a la variabilidad en el actual desempeño de las construcciones, es necesario considerar las incertidumbres relacionadas con la opinión de los expertos. Adicionalmente, las curvas de fragilidad obtenidas por este tipo de métodos, son también difíciles de calibrar o modificar para incorporar nuevos datos o tecnologías (Anagnos et al., 1995).

4.5 Métodos analíticos

Estos métodos utilizan análisis numéricos y pueden ser empleados para zonas donde no se dispone de observaciones de daños debidos a sismos, ni de suficientes resultados de ensayos de laboratorio. También pueden ser útiles para el análisis de la vulnerabilidad sísmica de una estructura en particular, como por ejemplo, el caso de estructuras esenciales.

Los resultados obtenidos con este tipo de métodos, son muy sensibles a los modelos construidos para representar las estructuras y la acción sísmica, por lo tanto, deben utilizarse modelos que representen de la mejor forma posible tanto el comportamiento sísmico estructural como las principales características de los movimientos del terreno.

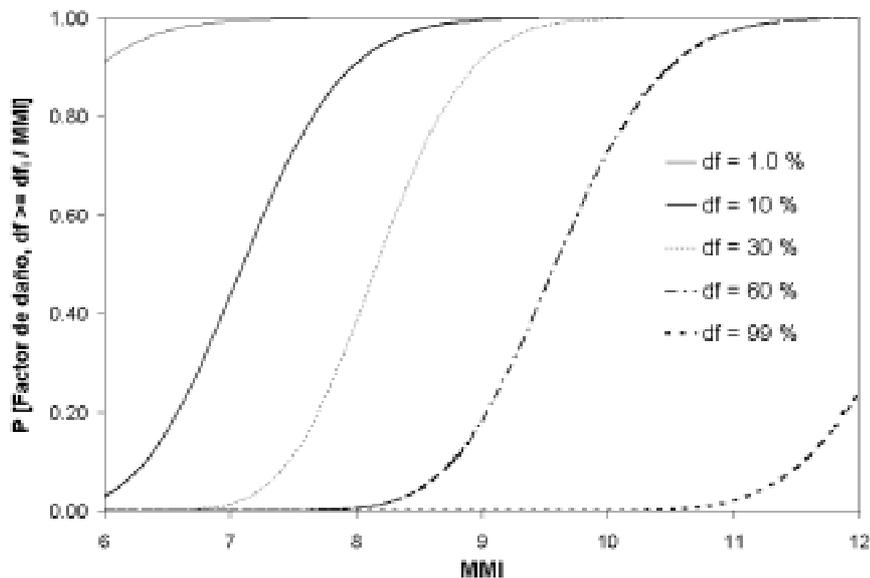


Figura 4.3. Ejemplo de curvas de fragilidad obtenidas a partir de la opinión de expertos para un edificio de mampostería de elevación media (Anagnos et al., 1995). df es el factor de daño o "damage factor".

Una de las grandes ventajas de este tipo de métodos, es que constituyen una herramienta fundamental para los estudios de prevención y atención desastres, debido a que pueden ser utilizados para comenzar a reducir la vulnerabilidad y, de este modo, a reducir el riesgo a que se encuentran expuestas las estructuras, sin que sea necesaria la ocurrencia de un evento sísmico.

Existen básicamente dos tipos de métodos analíticos: los probabilistas y los deterministas. A continuación se describe cada uno de ellos.

4.5.1 Métodos probabilistas

Los recientes avances en la ingeniería sísmica indican que los métodos probabilistas deben ser utilizados para proporcionar las bases para la mejora del diseño sismo-resistente de estructuras y para establecer las condiciones de las metodologías de evaluación del daño. Las comparaciones realizadas entre los daños observados y los calculados, muestran que, a pesar de los recientes avances en el análisis dinámico no lineal y en el modelado de estructuras, hay fuertes limitaciones en utilizar métodos puramente deterministas para evaluar el daño en las estructuras después de ocurrido un sismo. Las incertidumbres tanto en los parámetros sísmicos como estructurales, pueden producir discrepancias significativas entre el comportamiento observado y el calculado. Por lo tanto, los métodos probabilistas son esenciales para proporcionar una perspectiva del comportamiento estructural ante la ocurrencia de un determi-

nado sismo (Ellingwood, 2001).

Uno de los puntos más importantes para obtener las curvas de fragilidad utilizando estos métodos, consiste en definir adecuadamente el Parámetro indicador de la Intensidad Sísmica *PIS* y el Parámetro Indicador del Daño *PID* en la estructura. En el caso de la acción sísmica, una solución ideal para este problema, sería contar con un amplio número de registros de sismos que hayan ocurrido en la zona de interés, que permitieran definir claramente la sismicidad de la zona y los efectos locales. "Desafortunadamente" son muy pocas las zonas que, aún con una actividad sísmica alta, disponen de una cantidad suficiente de registros. Una forma de superar esto, consiste en generar un grupo de acelerogramas sintéticos, a partir de la información existente, que reflejen tanto las variaciones de intensidad, duración, amplitud y contenido frecuencial, como las condiciones locales del suelo. En cuanto al indicador de la respuesta estructural, es necesario seleccionar un parámetro que permita cuantificar el daño y que pueda relacionarse, a partir de ciertos criterios, con los estados discretos de daño, los cuales describen de manera cualitativa los efectos producidos por el sismo en la estructura.

Para considerar las incertidumbres en los parámetros sísmicos y estructurales, los métodos probabilistas utilizan técnicas de simulación, como por ejemplo, el método de Monte Carlo, mediante el cual, ambos parámetros se definen como variables aleatorias que se generan a partir de sus funciones de distribución de probabilidad. Para reducir el tamaño de la muestra y por consiguiente el número de análisis requeridos, se utilizan técnicas de optimización, como por ejemplo el método del Hiper cubo Latino Mejorado.

Una vez definidos los indicadores de la acción sísmica y la respuesta estructural, es necesario determinar la relación existente entre ambos parámetros desde un punto de vista probabilista. Lo anterior, implica llevar a cabo una serie de análisis dinámicos no lineales, que permitan cuantificar el efecto del grupo de acelerogramas sintéticos sobre el modelo estructural. Se obtienen de esta forma, para cada valor del indicador de la intensidad del movimiento, las curvas que relacionan la probabilidad acumulada de daño con el parámetro seleccionado para representar la respuesta estructural. Finalmente, teniendo en cuenta estas curvas y los límites de los estados discretos definidos previamente, se obtienen las curvas de fragilidad.

La Figura 4.4 esquematiza la metodología desarrollada en este trabajo para generar curvas de fragilidad mediante un método analítico probabilista. Esta metodología se aplica en el capítulo 9, para evaluar la vulnerabilidad sísmica de los edificios de hormigón armado típicos de la ciudad de Manizales. A continuación, se describen los principales pasos involucrados en el método. Es importante tener en cuenta también que pueden definirse otros procedimientos similares, utilizando parámetros y análisis diferentes a los que aquí se presentan.

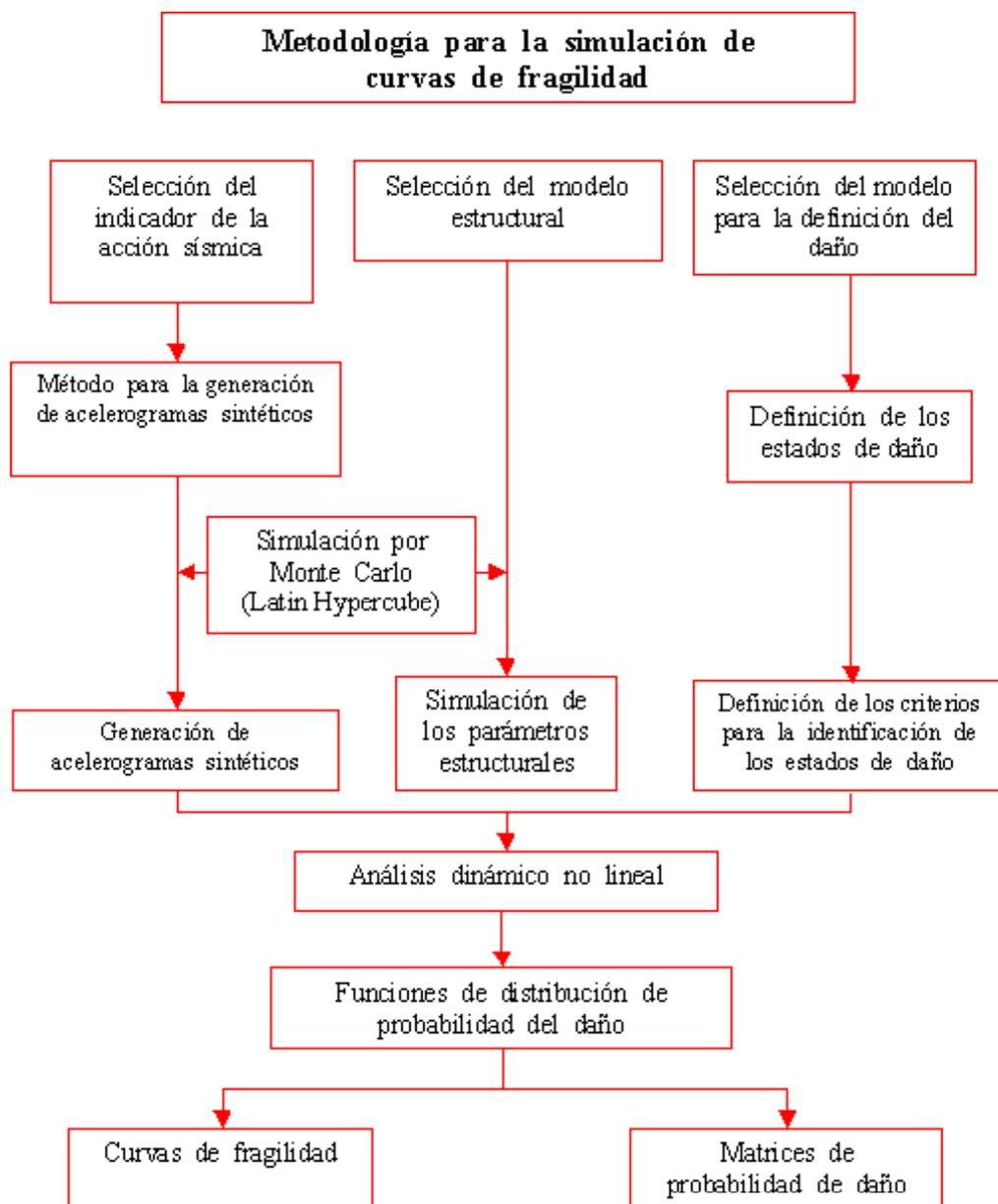


Figura 4.4. Esquema de los pasos requeridos para la generación de curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño correspondientes, desde una óptica probabilista.

En todo caso, se requieren tres pasos previos orientados a: 1) selección del indicador de la acción sísmica, 2) selección del modelo estructural y 3) el modelo de daño. Se analizan a continuación estos tres aspectos preliminares.

Indicador de la intensidad de la acción sísmica

La elección de un buen Parámetro indicador de la Intensidad Sísmica (*PIS*) es un aspecto fundamental para una adecuada y acertada construcción de las curvas de fragilidad y sin embargo, no es una tarea fácil. Tradicionalmente, la fuerza destructiva de los terremotos ha sido relacionada con la aceleración máxima del terreno *PGA*. Sin embargo, este parámetro refleja muy poca información tanto de la acción sísmica como del daño en edificios, y no es suficientemente fiable, ya que en varias situaciones se han observado daños poco relevantes en estructuras sometidas a movimientos sísmicos con aceleraciones máximas muy altas. Esto se debe a que otras características de los sismos, tales como el contenido frecuencial, la duración de la fase fuerte del movimiento, T_d , y la secuencia en que se producen los choques, entre otros, pueden tener una influencia mucho más importante en la degradación de la estructura.

Otros parámetros utilizados para representar la intensidad del movimiento sísmico son: la velocidad (*PGV*) y el desplazamiento (*PGD*) máximos del terreno, las características espectrales, la intensidad sísmica usando la Escala Macrosísmica Europea (European Macroseismic Scale EMS-98) o la escala de intensidad de Mercalli modificada (Modified Mercalli Intensity scale *MMI*). Esta última, ha sido ampliamente utilizada por la mayoría de investigadores para representar la acción sísmica en edificios, debido a la cantidad de datos disponibles para la mayoría de las regiones sísmicamente activas en el mundo. No obstante, este parámetro tiene una componente altamente subjetiva.

Singhal y Kiremidjian (1995) han hecho un llamamiento a mejorar esta situación, utilizando la aceleración espectral S_a como indicador de la intensidad sísmica. Para ello es necesario contar con un amplio número de registros históricos en la zona, lo cual en la mayoría de los casos no siempre es posible.

Para estudios de riesgo sísmico, la elección del *PIS* esta asociada directamente al parámetro que define la amenaza sísmica en la región bajo estudio, lo cual en algunos casos, conduce a utilizar un indicador que revela muy poca información en comparación con otros factores de los sismos. Por lo tanto, los estudios de microzonificación sísmica que actualmente se realizan en varios lugares del mundo, deben utilizar los parámetros que mejor representen las características de la acción sísmica.

En este estudio, se ha elegido la aceleración máxima del terreno, *PGA*, como indicador de la acción sísmica en la ciudad de Manizales (Colombia), debido a que la amenaza sísmica está definida en función de este parámetro, en todo el territorio Colombiano.

Selección del modelo estructural

El modelo analítico de la estructura debe representar todas las componentes que influyen sobre su masa, resistencia, rigidez y deformabilidad. Los elementos que no influyen significativamente sobre las principales propiedades de la estructura no necesitan ser modelados. Así, para representar adecuadamente una zona desde el punto de vista estructural, deben construirse modelos que consideren los diferentes tipos de materiales y características geométricas existentes. Lo anterior implica un reconocimiento de campo que permita identificar los sistemas constructivos y el número de estructuras correspondientes a cada uno de ellos, etc. A partir de esta información y con la ayuda de planos estructurales y arquitectónicos, memorias de cálculo y la opinión de expertos, pueden realizarse estudios estadísticos que permitan definir los principales modelos estructurales. No obstante, recopilar toda esta información, dado el caso que exista la posibilidad de acceder a ella, puede llevar bastante tiempo. Por lo tanto, la definición de modelos teóricos es una alternativa para superar estas limitaciones. Para ello, es necesario contar con la opinión de expertos en el análisis y diseño de estructuras representativas de la zona de interés, de tal forma que puedan representarse las principales características geométricas y mecánicas de las estructuras existentes.

Un aspecto importante para la construcción de estos modelos, consiste en la definición de la dimensión (2D o 3D) en la cual deben analizarse las estructuras. Es obvio que los modelos deben representar las características tridimensionales completas del comportamiento de la estructura, no obstante el uso de modelos 3D para la ejecución de un análisis dinámico no lineal y un proceso de simulación por el método de Monte Carlo, a menudo requiere de un esfuerzo computacional bastante alto. Por lo tanto, pensar en miles de análisis de este tipo puede llegar a ser una tarea bastante costosa en términos de tiempo computacional. Una alternativa ampliamente utilizada son los modelos en dos dimensiones, siempre y cuando éstos representen adecuadamente la respuesta global de las estructuras. En el caso de edificios regulares, los modelos 2D son más que suficientes, debido a que los efectos tridimensionales son prácticamente despreciables y no producen fuertes modificaciones en la respuesta estructural. Para edificios irregulares se recomienda utilizar modelos tridimensionales o modelos bidimensionales que consideren, mediante modificaciones simples, los parámetros que controlan la respuesta estructural, las variaciones en planta y los posibles problemas de torsión que pueden presentarse.

Modelo de definición del daño

Los modelos que se utilizan para representar el daño han sido enunciados en la sección 2.3.6. En este caso, se hace referencia a las representaciones mecánicas. Considerando que los elementos estructurales y algunos componentes no estructurales son muy sensibles a los desplazamientos relativos entre diferentes niveles producidos durante los sismos, se propone en este método, la deriva máxima entre piso δ_{\max}

como Parámetro Indicador del Daño estructural (*PID*). Adicionalmente, este parámetro se utiliza para controlar la respuesta de las estructuras en las diferentes normativas de diseño sismorresistente, lo cual facilita considerablemente la implementación de los resultados obtenidos en estas normativas y su interpretación, por parte de los ingenieros, calculistas y personal a cargo de la construcción.

La deriva entre piso corresponde a la diferencia entre los desplazamientos horizontales totales de un nudo en el piso i , Δ_i , y un nudo localizado en el mismo eje vertical en el piso $i - 1$, Δ_{i-1} , divididos por la altura del piso h_i , esto es:

$$\delta_i = \frac{\Delta_i - \Delta_{i-1}}{h_i} \quad (4.4)$$

A partir de la ecuación (4.4) se determina el valor máximo de la deriva entre piso δ_{\max} , esto es:

$$\delta_{\max} = \max(\delta_i) \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n \quad (4.5)$$

siendo n el número de niveles o pisos de la estructura.

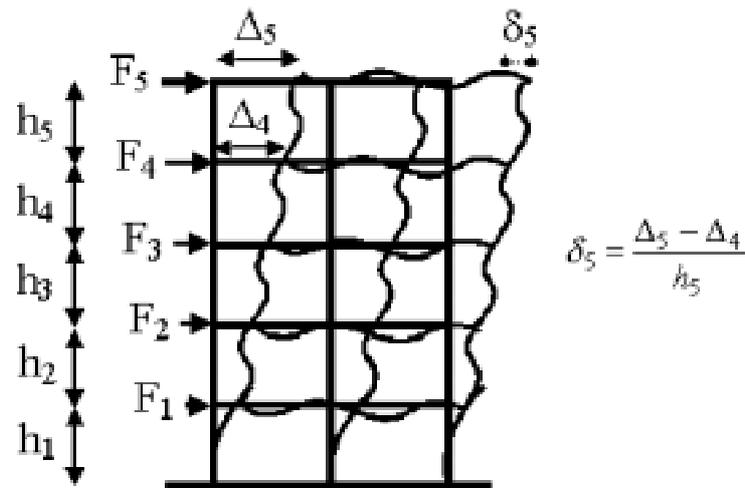


Figura 4.5. Representación del concepto de la deriva entre piso.

La Figura 4.5 muestra, gráficamente, la deformada de un pórtico de 5 niveles y dos vanos, producida por las fuerzas horizontales F_i actuantes. A partir de las deformaciones en cada nivel, es posible determinar las derivas entre piso. Así pues, en la Figura se muestra la deriva entre piso en el último nivel, δ_5 , que se obtiene como la relación entre la diferencia de desplazamientos en los niveles 4 y 5 ($\Delta_5 - \Delta_4$) y la altura del último nivel h_5 .

En general, durante un sismo, la deriva entre piso está asociada con los siguientes efectos:

- Deformación inelástica de los elementos estructurales y no estructurales.
- Estabilidad global de la estructura.
- Daño a los elementos estructurales que forman parte del sistema resistente de cargas laterales y a los elementos no estructurales, tales como muros divisorios, particiones, enchapes, acabados, instalaciones eléctricas, mecánicas, etc.
- Alarma y pánico entre las personas que ocupan la edificación.

Por lo tanto, es indispensable realizar un control estricto durante el diseño, del cumplimiento de los requisitos de deriva establecidos en las diferentes normativas, con el fin de obtener un adecuado comportamiento de la estructura y de sus contenidos.

En un segundo nivel del esquema metodológico propuesto, se consideran la generación de las acciones sísmicas y la definición de los estados de daño.

Generación de acelerogramas sintéticos

Los modelos para la generación de acelerogramas sintéticos surgen de la necesidad o conveniencia de definir la acción sísmica como "input" en estudios de diseño, amenaza, vulnerabilidad y riesgo sísmico. Particularmente estos son imprescindibles en zonas con pocos registros de aceleración, así como en regiones donde los datos instrumentales disponibles no han alcanzado las características de aceleración y duración correspondientes a un evento con un período de retorno dado.

Para generar curvas de fragilidad por medio de métodos analíticos probabilistas, es necesario contar con un grupo representativo de acelerogramas que cubran un amplio rango de valores correspondientes al *PIS* seleccionado y que puedan ser utilizados para el análisis dinámico no lineal de los modelos estructurales. En general, la escasez de datos obliga a utilizar técnicas para la generación de acelerogramas sintéticos para el intervalo de variación del *PIS*.

En la actualidad, hay una gran variedad de modelos, cada uno de ellos caracterizado por sus respectivos parámetros. Estos modelos pueden ser clasificados dentro de dos grandes grupos:

1. Acelerogramas compatibles con un espectro de respuesta, el cual a menudo corresponde al espectro suavizado proporcionado por una normativa de diseño. Este modelo utiliza una superposición de ondas sinusoidales moduladas por una función temporal envolvente que define la forma del acelerograma. Las amplitudes de estas señales, se calculan a partir de una función estacionaria de densidad espectral de potencia que, a su vez, se obtiene a partir de las ordenadas de un espectro de respuesta (aceleraciones o velocidades). Para que la diferencia entre el espectro de respuesta utilizado y el correspondiente a la señal generada sea mínima, se utiliza un proceso iterativo. Los acelerogramas

generados a partir de espectros suavizados de norma tienen un ancho de banda frecuencial excesivamente grande, lo cual es poco realista si se compara con los registros de sismos reales. Por lo tanto, debe tenerse cuidado en la interpretación de los resultados obtenidos con estas señales para el caso de análisis no lineal, ya que para edificios con períodos medios y altos pueden llegar a sobreestimar su respuesta estructural como se discutirá en el capítulo 6. La Figura 4.6 muestra un acelerograma sintético generado a partir del espectro de diseño de la Normativa Colombiana para la ciudad de Armenia para una aceleración máxima del terreno de 0.25 g.

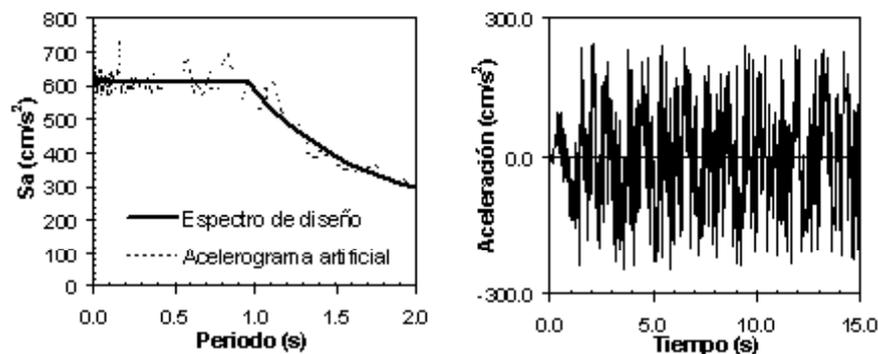


Figura 4.6. Acelerograma sintético generado a partir del espectro de diseño para la ciudad de Armenia (Quindío - Colombia) (Bonett et al., 2002).

2. Acelerogramas no compatibles con un espectro de respuesta: existe una gran variedad de modelos desarrollados para la generación de historias temporales de aceleración, que han sentado las bases de una nueva ciencia, llamada Ingeniería Sismológica. Su objetivo principal es justamente definir la acción de los sismos sobre las estructuras de manera compatible con las teorías y modelos propios de la sismología y la geofísica. Los primeros modelos, consideraban los sismos como procesos estacionarios modulados por funciones deterministas utilizadas para representar la variación temporal de la intensidad del sismo. Para generar acelerogramas a partir de estos modelos, se utilizan las propiedades de un ruido blanco, las secuencias de números aleatorios y la información disponible en la zona. Entre los modelos más utilizados de este tipo se encuentran: la superposición de ondas o pulsos propuesta por Housner y Jennings (1964), el modelo de Kanai - Tajimi y el modelo de Clough - Penzien, entre otros. Posteriormente, Gasparini y Vanmarcke (1976) definieron un modelo de superposición de ondas armónicas, donde las amplitudes se modulaban por una función envolvente, lo cual permitió obtener un proceso no estacionario. No obstante, la no estacionariedad de los movimientos producidos por un sismo,

se manifiesta tanto en el dominio temporal como frecuencial. Para considerar estos dos aspectos, Priestley (1965) introdujo el concepto de espectros evolutivos, el cual se aplica a los procesos no estacionarios conocidos como procesos oscilatorios. A finales de la década de los 70, aparecen los primeros modelos sismológicos, que incorporan las propiedades físicas de la fuente y del medio en que se propaga el movimiento. Estos modelos permiten la incorporación directa de los parámetros sísmicos tales como la magnitud, la distancia focal, dimensiones de la falla, atenuación y velocidad de las ondas de cizalla. Adicionalmente tienen enormes ventajas sobre los métodos empíricos, debido a que ayudan a comprender mejor los mecanismos que originan los sismos y sus resultados pueden ser extrapolados para los casos en que no hay datos disponibles. No obstante, resultan complicados debido al gran número de parámetros que se encuentran implicados. Varios autores desarrollaron modelos gaussianos estacionarios y modelos ARMA ("Autorregresive Moving Average") (Liu, 1970; Polhemus y Cakmak, 1981; Kozin, 1988), para tener en cuenta la naturaleza multidimensional y multivariable de los sismos. Deodatis y Shinozuka (1989) propusieron un modelo estocástico con espectros evolutivos para considerar la variación espacial de las ondas, que interesan para el análisis de estructuras de gran envergadura, como por ejemplo los puentes y las presas. Otros modelos que consideran la variación espacial de las ondas han sido desarrollados por Loh (1985), Loh y Yeh (1988), Harrada (1992), Tamura et al., (1992) y Deodatis y Theoharis (1992).

La elección del modelo a utilizar está asociada a la información disponible. Sin embargo, es necesario considerar que, en un análisis dinámico no lineal, la respuesta de la estructura es muy sensible a las características del movimiento y, por lo tanto, se sugiere utilizar técnicas de generación de acelerogramas que consideren tanto la naturaleza evolutiva de los sismos (tanto en amplitud como en contenido frecuencial) como los parámetros relacionados con las características de la fuente y el suelo local.

En este trabajo, se utiliza un modelo estocástico desarrollado por Hurtado (1999) para la ciudad de Manizales (Colombia). Para considerar la naturaleza evolutiva de los sismos, se utiliza la función de densidad espectral de potencia propuesta por Yeh y Wen (1990), debido a su facilidad de acoplamiento con las ecuaciones de la dinámica del sistema estructural, lo que facilita su uso en el campo de los métodos analíticos de vibraciones aleatorias. Los parámetros que caracterizan el modelo, se definen a partir de un grupo de historias temporales de aceleración registradas en la ciudad de Manizales (Colombia). La descripción detallada del modelo y el procedimiento utilizado para obtener los parámetros, se presentará en el capítulo 7.

Definición de los estados discretos de daño

En la sección 2.3.5 se ha presentado una descripción detallada de los estados discretos de daño, así como algunas de las clasificaciones que se han propuesto hasta

el momento. Para construir las curvas de fragilidad es necesario establecer una descripción cualitativa del daño producido en los elementos de las estructuras y en sus contenidos, de tal forma que pueda evaluarse de manera rápida, sencilla y global su comportamiento cuando se ven sometidas a movimientos sísmicos de diferente intensidad. Normalmente el número de estados discretos utilizados para representar el daño son pocos, debido a la dificultad para diferenciarlos. Los límites entre cada uno de ellos se determina a partir de ensayos de laboratorio, opiniones de expertos o inferidos a partir de las observaciones de daños después de ocurrido un sismo. Se han realizado varios estudios para relacionar diferentes parámetros de la respuesta estructural con estados discretos de daño (Park et al., 1987; Gunturi, 1992; Nielsen et al., 1992;), sin embargo, lo recomendable es contar con intervalos calibrados mediante experimentación y/o levantamientos de daño en la zona bajo estudio, debido a la variabilidad que puede presentarse en la respuesta estructural. Por ejemplo, los umbrales que permiten definir los estados discretos de daño para una estructura diseñada según las recomendaciones existentes en una región de alta sismicidad pueden ser mucho mayores que los correspondientes a una zona de sismicidad moderada.

La metodología desarrollada en este trabajo, considera 5 estados discretos de daño, los cuales se relacionan de forma directa con los niveles de desempeño sísmico propuestos por el comité VISION 2000, estos son: sin daño (totalmente operacional), leve (operacional), moderado (seguridad), severo (próximo al colapso) y colapso (colapso). La descripción de los daños físicos estructurales depende de cada tipología, sin embargo, la descripción de los niveles de desempeño de acuerdo al comité VISION 2000 es la misma para todas las estructuras. En cuanto a los valores límite de los estados de daño, éstos se determinan en este caso, a partir de un análisis estático no lineal de las estructuras. Con este tipo de análisis es posible identificar fácilmente puntos límite tales como: el agrietamiento, la cedencia y el agotamiento de la capacidad última de los diferentes elementos estructurales, los cuales pueden relacionarse de manera directa con los estados de daño considerados. Se ha elegido este procedimiento, debido a que para las dos zonas estudiadas; Manizales en Colombia y Barcelona en España, no se conoce la existencia de información proveniente de ensayos de laboratorio o levantamientos de daño que permitan establecer estos umbrales.

Incertidumbres en los parámetros sísmicos y estructurales

Los parámetros que definen la acción sísmica y la respuesta estructural involucran aleatoriedad e incertidumbre. Por ejemplo, no es posible predecir con exactitud la ocurrencia de un sismo y mucho menos estimar, con una precisión adecuada, la amplitud máxima, el contenido frecuencial y la duración del acelerograma esperado. Por otra parte, la respuesta estructural se evalúa usualmente por medio de modelos y programas de ordenador y, por lo tanto, ésta puede desviarse de la respuesta real de la estructura. Adicionalmente, la capacidad estructural no puede determinarse

exactamente debido a que los parámetros básicos tales como la resistencia del material y las propiedades geométricas, siempre exhiben variaciones estadísticas. Por consiguiente, el uso de una metodología probabilista es la más apropiada para la generación de las curvas de fragilidad, ya que ésta, permite considerar todas estas incertidumbres (Hwang y Jaw, 1990).

Para considerar la incertidumbre de cualquier parámetro, se requieren datos experimentales, o simulados, que permitan ajustar una función de distribución que represente su variación. Estas funciones están definidas por pocos parámetros estadísticos, esto es, por ejemplo, la media, la desviación estándar o el coeficiente de variación, entre otros. Una vez se cuenta con una función de distribución para cada parámetro, éstos se definen como variables aleatorias y utilizando técnicas de simulación se puede obtener un muestreo adecuado de cada una de ellas.

En este trabajo, se utiliza un proceso de simulación por el Método de Monte Carlo (MMC), para generar los valores correspondientes a las variables aleatorias. Este método permite simular el comportamiento de sistemas físicos o numéricos y se distingue de otros métodos de simulación por ser estocástico, esto es, de alguna manera no determinista. Este comportamiento se debe generalmente al uso de secuencias de números aleatorios (Hammond et al., 1994). Adicionalmente ha sido ampliamente reconocido como el más preciso para todos los cálculos que requieren el conocimiento de la función de distribución de probabilidad, f_{dp} , de las respuestas de ciertos sistemas bajo ciertas excitaciones. La idea general del método consiste en que las respuestas "Y" de un sistema dependen de un grupo de variables aleatorias "X", cuya descripción probabilista marginal es conocida. Por medio de algoritmos adecuados, se puede generar una población grande de muestras de cada una de esas variables, de tal manera que sus histogramas representen bien las distribuciones marginal y conjunta (Hurtado y Barbat, 1998).

Así pues, para generar curvas de fragilidad a partir de métodos analíticos probabilistas, resulta conveniente utilizar el MMC. En este caso en particular, el método es utilizado tanto para generar los acelerogramas sintéticos considerando las incertidumbres en los parámetros sísmicos, como para obtener la función de distribución condicional del daño de la estructura teniendo en cuenta la incertidumbre en los parámetros que caracterizan su respuesta. La aplicación de este método requiere de un gran número de ciclos de simulación para alcanzar un nivel de confianza aceptable en la estimación de las probabilidades. Por lo tanto, para reducir el tamaño de la muestra, se utiliza la técnica de optimización del hipercubo latino mejorado (Updated Latin Hypercube) (Florian, 1992).

Análisis dinámico no lineal

El nivel más sofisticado de análisis disponible, mediante el cual es posible predecir las fuerzas y los desplazamientos que se producen como consecuencia de un movimiento sísmico, es el análisis dinámico no lineal. Éste involucra una solución paso a paso,

en el dominio temporal, de ecuaciones del movimiento de sistemas de múltiples grados de libertad, las cuales representan la respuesta de una estructura. Para ello, se requiere de uno o más acelerogramas reales o simulados para representar la excitación (Paulay y Priestley, 1992). El análisis de la respuesta de la estructura a estos registros, considera la degradación de la rigidez y la pérdida de resistencia de los elementos del sistema estructural a través del tiempo.

En la actualidad existe una gran variedad de programas que realizan este tipo de análisis, entre ellos están; IDARC-2D (Kunnath et al., 1992), DRAIN-2DX (Prakah et al., 1993) y el RUAUMOKO-2D (Carr, 2000), entre otros. Todos ellos permiten modelar el comportamiento inelástico de diferentes miembros, que pueden exhibir degradación de rigidez, pérdida de resistencia y efectos de estrechamiento.

Es importante notar que el nivel de sofisticación de este tipo de análisis puede generar una excesiva confianza en la precisión de los resultados en los ingenieros inexpertos. Debe tenerse en cuenta que las suposiciones hechas, tanto en las características sísmicas como en las propiedades estructurales, implican una incertidumbre considerable en la predicción de la respuesta de las estructuras (Paulay y Priestley, 1992).

Para el caso de los edificios de la ciudad de Manizales, que se presentará en el capítulo 9, se ha elegido el programa RUAUMOKO 2D, desarrollado por el profesor Athol Carr de la Universidad de Canterbury (Nueva Zelanda). El programa tiene una amplia variedad de opciones disponibles para modelar estructuras. Así por ejemplo, la representación de las masas puede hacerse utilizando el criterio de masas concentradas o la matriz de masa consistente cinemáticamente; el amortiguamiento puede ser representado por los modelos de Amortiguamiento de Rayleigh, comúnmente impuestos, o por un rango de modelos que dan una mejor representación de la variación de la fracción del amortiguamiento crítico. Hay también una gran variedad de elementos o miembros para representar los sistemas estructurales y elementos de fundación que permiten representar los efectos de la interacción suelo estructura. Así mismo, hay un gran número de diferentes reglas histeréticas disponibles, que pueden ser usadas para representar la relación fuerza-desplazamiento en los diferentes tipos de elementos (Carr, 2000).

Sistematización del método de Monte Carlo

El proceso para generar las curvas de fragilidad, ha sido sistematizado mediante el uso de una avanzada herramienta computacional: PROMENVIR (CASA, 1997). Esta herramienta constituye una excelente plataforma capaz de realizar análisis estocásticos utilizando la simulación MMC y permite ejecutar cualquier programa (solver), generando los archivos de entrada de manera aleatoria y ejecutando cientos de procesos en paralelo mediante una red de estaciones de trabajo UNIX de alto rendimiento. Así, se obtienen las funciones de distribución condicional de los parámetros de salida seleccionados previamente. Es importante mencionar que, debido

al fuerte avance que ha sufrido el poder del cálculo de los ordenadores, que actualmente llegan a tener una velocidad comparable con las estaciones de trabajo, se puede hablar de otras plataformas como el STAC (CIMNE, 2002) que funcionan en este entorno, y que posee características muy similares a las del PROMENVIR.

La plataforma STAC, se utilizará más adelante para la generación de curvas de capacidad de edificios de mampostería.

La definición de un proyecto (proceso completo de simulación) en el PROMENVIR, o en el STAC, presenta tres etapas: 1) definición de las variables de entrada y salida, 2) definición de la ejecución del código determinista y finalmente 3) representación estadística de los datos generados. La Figura 4.7 muestra un diagrama de flujo del procedimiento utilizado por este programa para la obtención de las curvas de fragilidad y, a continuación, se efectúa una breve descripción de estas tres etapas.

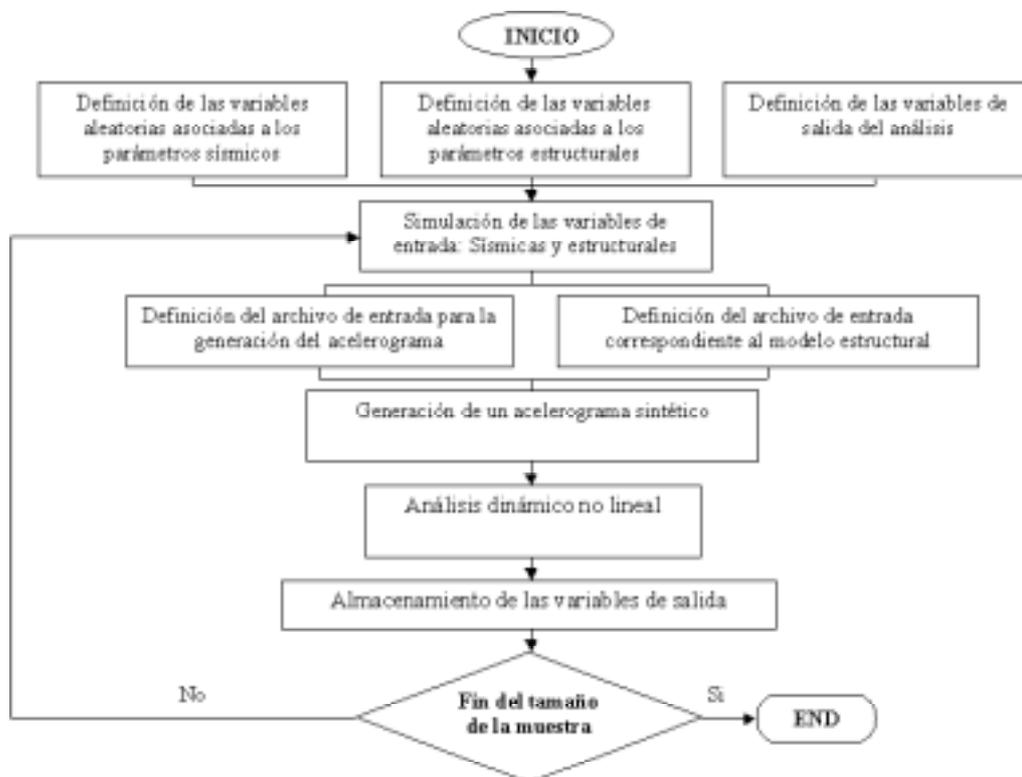


Figura 4.7. Esquema general de los módulos de los programas PROMENVIR y STAC.

- Las rutas y sentencias requeridas para la ejecución de los procesos y programas dentro de la plataforma, de tal forma que puedan solucionarse cada uno de los procesos deterministas.
- Los directorios para almacenar los archivos de salida de los programas de cálculo y los archivos que genera el programa.
- El número de tiros fallidos, es decir, el número de errores que se admite dentro un proceso de análisis. Estos errores generalmente están relacionados con la inestabilidad de los programas de cálculo para algunos de los valores aleatorios generados.
- Tiempo máximo destinado para realizar todo el análisis.

La Figura 4.9 muestra la ventana que ofrece el programa PROMENVIR para suministrar toda esta información.

Evidentemente esta etapa incluye la ejecución iterativa de la generación de acelerogramas y del análisis dinámico no lineal de los modelos estructurales.

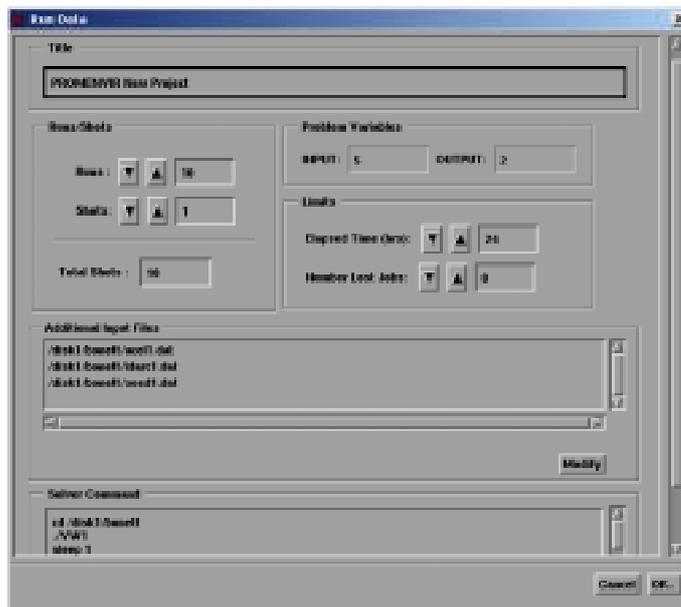


Figura 4.9. Ilustración de la definición del proceso de ejecución (cuadro de análisis).

Representación de los resultados Al finalizar el conjunto de cálculos correspondiente al tamaño de la muestra especificado, se calculan los momentos estadísticos más representativos sobre el conjunto de las variables definidas y se obtienen, de

forma directa, las funciones de distribución de probabilidad de las variables de salida. Igualmente se pueden realizar pequeños análisis de regresión entre las variables utilizadas (Zarate et al., 2002).

En el capítulo 9 (sección 9.3) se presenta en detalle, todo este proceso de simulación, que se realiza para evaluar la vulnerabilidad sísmica de edificios de hormigón armado típicos, de la ciudad de Manizales (Colombia). En el capítulo 11 se aplica para la obtención de curvas de capacidad de los edificios de mampostería típicos de Barcelona.

Funciones de distribución f_{dp} del Parámetro Indicador de Daño PID

Así pues, a partir de los resultados obtenidos del proceso de simulación por el MMC, se obtienen las curvas que representan las funciones de distribución de probabilidad del parámetro indicador del daño (PID) para cada nivel de intensidad sísmica (PIS_j).

Los puntos de estas curvas representan la probabilidad, f_{dp} , que el PID no exceda un cierto valor para una determinada intensidad sísmica (PIS_j), esto es:

$$f_{dp} = P[PID \leq PID_i | PIS = PIS_j] \quad (4.6)$$

En esta metodología se proponen dos tipos de ajustes a las probabilidades f_{dp} , estas son: 1) polinomios normales de tercer grado (Hong y Lind, 1996), los cuales se describen en el apéndice B y 2) la distribución lognormal $\Phi[\cdot]$ definida como:

$$f_{dp} = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{PID}} \ln \left(\frac{PID}{\overline{PID}} \right) \right] \quad (4.7)$$

donde \overline{PID} es el valor medio del parámetro indicador del daño y β_{PID} es la desviación estándar del logaritmo natural del PID .

La Figura 4.10 muestra los resultados obtenidos y las f_{dp} ajustadas mediante polinomios normales de tercer grado para un edificio de hormigón armado de 5 niveles. En este caso la deriva máxima entre piso δ_{max} y la aceleración máxima del terreno PGA corresponden a los parámetros indicadores del daño y la intensidad sísmica respectivamente.

Curvas de fragilidad

Utilizando las funciones de distribución condicional del parámetro de respuesta estructural f_{dp} (Figura 4.10) y los valores límites que definen los estados discretos de daño, se obtienen las curvas de fragilidad que relacionan el parámetro indicador de la intensidad sísmica (PIS) con la probabilidad de excedencia (FD) de un estado de daño determinado ED_i , esto es;

$$FD = P[ED \geq ED_i | PIS = PIS_i] \quad (4.8)$$

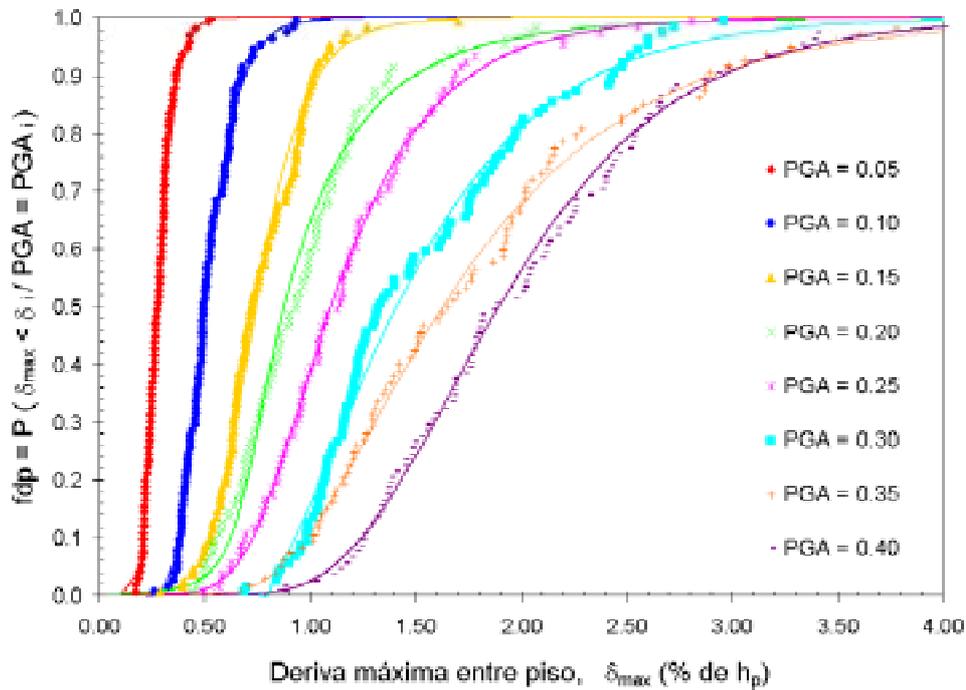


Figura 4.10. Funciones de distribución de probabilidad de no excedencia de una deriva entre piso. Aplicación a un edificio de HA de 5 niveles.

La Figura 4.11 muestra, de forma esquemática, el procedimiento de obtención de una curva de fragilidad para el caso del estado de daño severo. Por ejemplo, para una $PGA = 0.20 g$, y $\delta_{max} = 0.90 \%$ correspondiente al estado de daño severo, se tiene una $f_{dp} = 0.48$. La probabilidad de excedencia se obtiene como: $FD = 1 - f_{dp} = 1 - 0.48 = 0.52$, que representa una probabilidad del 52 % de alcanzar o exceder el nivel de daño severo para una aceleración máxima del terreno del 20% de g . Un procedimiento análogo se efectúa para cada estado de daño.

Análogamente al caso de las funciones f_{dp} , a los puntos así obtenidos, se pueden ajustar los polinomios normales propuestos por Hong y Lind (1996) o una distribución lognormal como la utilizada en la ecuación (4.1) esto es:

$$FD = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{PIS,ED_i}} \ln \left(\frac{PIS}{\overline{PIS}} \right) \right] \quad (4.9)$$

\overline{PIS} y β_{PIS,ED_i} son el valor medio y la desviación estándar del logaritmo natural del Parámetro indicador de la Intensidad Sísmica PIS para el estado de daño ED_i . La Figura 4.12 muestra las curvas de fragilidad obtenidas para un edificio de HA de 5 niveles. En este caso, el PIS y el PID corresponden respectivamente a la aceleración máxima del terreno PGA y la deriva máxima entre piso δ_{max} . Las curvas ajustadas corresponden a distribuciones lognormales obtenidas a partir de la ecuación (4.9) y

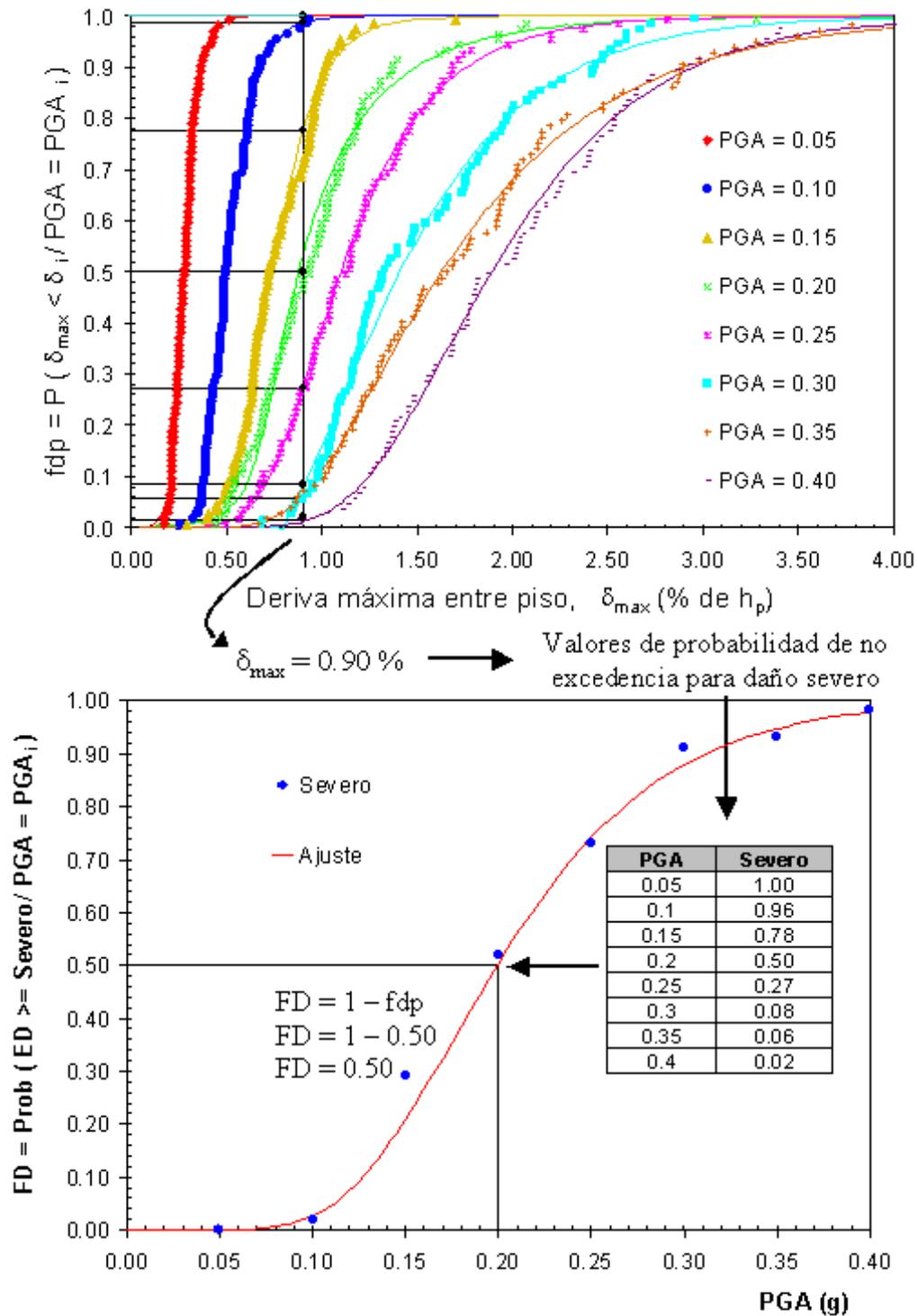


Figura 4.11. Procedimiento para la obtención de las curvas de fragilidad a partir de las f_{dp} y de los umbrales de los estados discretos de daño. a) Para el umbral de daño severo ($\delta_{max} = 0.9\%$) se leen las f_{dp} 's correspondientes a cada PGA . b) FD_i se obtiene como $1 - f_{dp_i}$ y se ajusta la curva de probabilidad a los puntos obtenidos.

sus estadísticos se muestran en la Tabla 4.2.

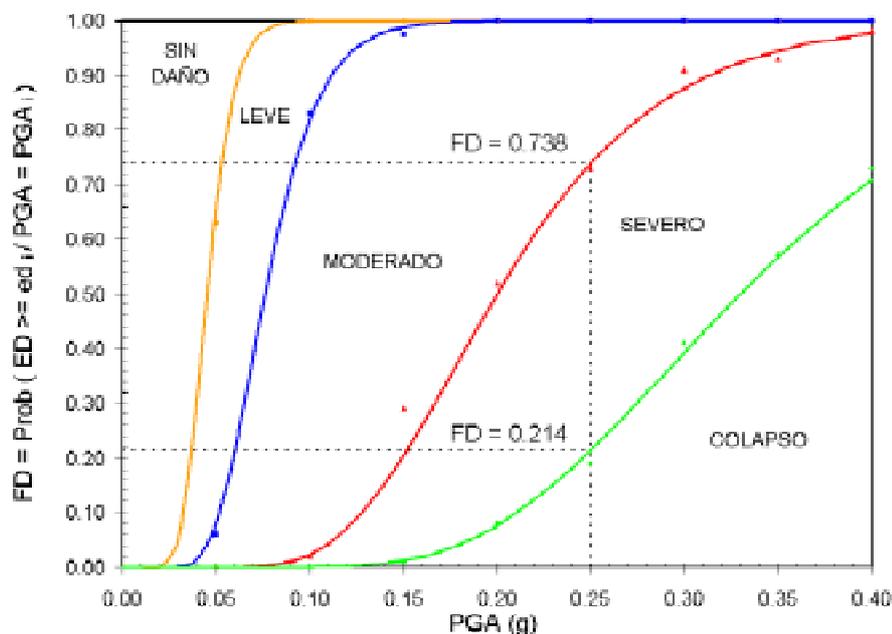


Figura 4.12. Curvas de fragilidad. Edificio de HA de 5 niveles.

	Estados discretos de daño ED_i			
	Leve	Moderado	Severo	Colapso
$PGA (g)$	0.045	0.076	0.200	0.330
β_{PGA}	0.25	0.30	0.35	0.35

Tabla 4.2. Estadísticos de la distribución lognormal para los estados de daño del edificio de HA de 5 niveles.

Matrices de probabilidad de daño

A partir de las funciones de distribución ajustadas para representar las curvas de fragilidad, se pueden determinar las probabilidades asociadas a cada uno de los estados de daño. Es necesario tener en cuenta que los puntos que se muestran en los gráficos de las curvas de fragilidad (como los de la Figura 4.12) corresponden a las probabilidades de alcanzar o exceder un estado de daño, por lo tanto, para calcular las probabilidades de ocurrencia es necesario aplicar la siguiente ecuación:

$$P(ED = ED_i / PIS_j) = P(ED \geq ED_i) - P(ED \geq ED_{i+1}) \quad (4.10)$$

Para ilustrar lo anterior, se calcula la probabilidad de que el daño en el edificio de HA de 5 niveles sea severo para una aceleración máxima del terreno igual a $0.25 g$. Para ello, utilizando la ecuación 4.9 y los parámetros de la Tabla 4.3, se determinan las probabilidades de excedencia del daño severo y el colapso para un $PGA = 0.25g$. Así, la probabilidad de ocurrencia del daño severo se obtiene a partir de la ecuación (4.10), esto es:

$$P(ED = Severo/PGA = 0.25g) = P(ED \geq Severo) - P(ED \geq Colapso) \quad (4.11)$$

$$P(ED = Severo/PGA = 0.25g) = 0.738 - 0.214 = 0.524 \quad (4.12)$$

La Tabla 4.3 muestra un ejemplo de matriz de probabilidad de daño, correspondiente a este mismo edificio para 8 valores de PGA .

PGA (g)	Valores de Probabilidad de daño (%)				
	Estado de Daño				
	Sin daño	Leve	Moderado	Severo	Colapso
0.05	0.37	0.57	0.06	0.0	0.0
0.10	0.0	0.17	0.81	0.02	0.0
0.15	0.0	0.03	0.68	0.28	0.01
0.20	0.0	0.0	0.48	0.44	0.08
0.25	0.0	0.0	0.27	0.52	0.21
0.30	0.0	0.0	0.09	0.50	0.41
0.35	0.0	0.0	0.07	0.36	0.57
0.40	0.0	0.0	0.02	0.25	0.73

Tabla 4.3. Ejemplo de matriz de probabilidad de daño de el caso del edificio de HA de 5 niveles.

4.5.2 Método expedito

Los métodos analíticos para resolver problemas complejos, requieren por lo general, de una cantidad considerable de tiempo e investigación para recopilar y procesar toda la información detallada necesaria para generar las curvas de fragilidad. Adicionalmente, si se desea considerar las incertidumbres involucradas tanto en el comportamiento de la estructura como en la acción sísmica, es necesario utilizar técnicas de simulación que involucren un tiempo computacional grande y el uso de herramientas de cálculo avanzadas.

No hay duda, que existen muchos casos en los cuales no se dispone ni de información del parque de estructuras existentes ni mucho menos, de las características de la acción sísmica. Incluso en determinadas zonas, no se cuenta con suficientes

recursos informáticos y mucho menos con el presupuesto necesario para recopilar y procesar toda la información. Por lo tanto, los métodos expeditos pueden ser una buena alternativa para superar estas limitaciones, debido a que éstos involucran técnicas de análisis simples, que requieren de pocos cálculos.

El procedimiento utilizado por estos métodos puede describirse de forma similar a los métodos probabilistas, mediante los siguientes pasos:

- Definición de un modelo estructural representativo de la estructura que se desea analizar.
- Definición de los Parámetro Indicadores del Daño PID y la Intensidad Sísmica PIS .
- Cálculo de la respuesta del modelo estructural ante un patrón de cargas o una historia temporal de aceleraciones mediante un análisis estático o un análisis dinámico no lineal, respectivamente.
- Descripción de los estados discretos de daño y definición del valor máximo del PID para cada uno de ellos.
- Generación de las curvas de fragilidad a partir de la función de distribución lognormal de la ecuación (4.1), donde el valor medio de la intensidad sísmica del movimiento \overline{PID} corresponde a los valores límites de PID para cada estado de daño y los valores de β_{PID} se pueden definir a partir del juicio de expertos, considerando los resultados obtenidos de observaciones de daño, ensayos de laboratorio o métodos probabilistas.

En este trabajo, se ha puesto a punto un método expedito para generar las curvas de fragilidad de los edificios de mampostería no reforzada de la ciudad de Barcelona (España). La Figura 4.13 esquematiza el procedimiento utilizado para obtener la curva de fragilidad del estado de daño moderado. En ella puede verse cómo sobre el espectro de capacidad obtenido a partir de un análisis estático no lineal, se pueden identificar los valores límites del desplazamiento espectral para cada estado de daño. A partir de ellos y utilizando los valores supuestos para el parámetro β_{S_d} se generan mediante la ecuación (4.1) las curvas de fragilidad para cada estado de daño, esto es:

$$FD = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{S_d}} \ln \left(\frac{S_d}{\overline{S_d}} \right) \right] \quad (4.13)$$

La Figura 4.14 muestra las curvas de fragilidad obtenidas para un edificio de 6 niveles de mampostería no reforzada construido en la zona del Eixample en Barcelona (España). La Tabla 4.4 muestra los parámetros a partir de los cuales se generan estas curvas.

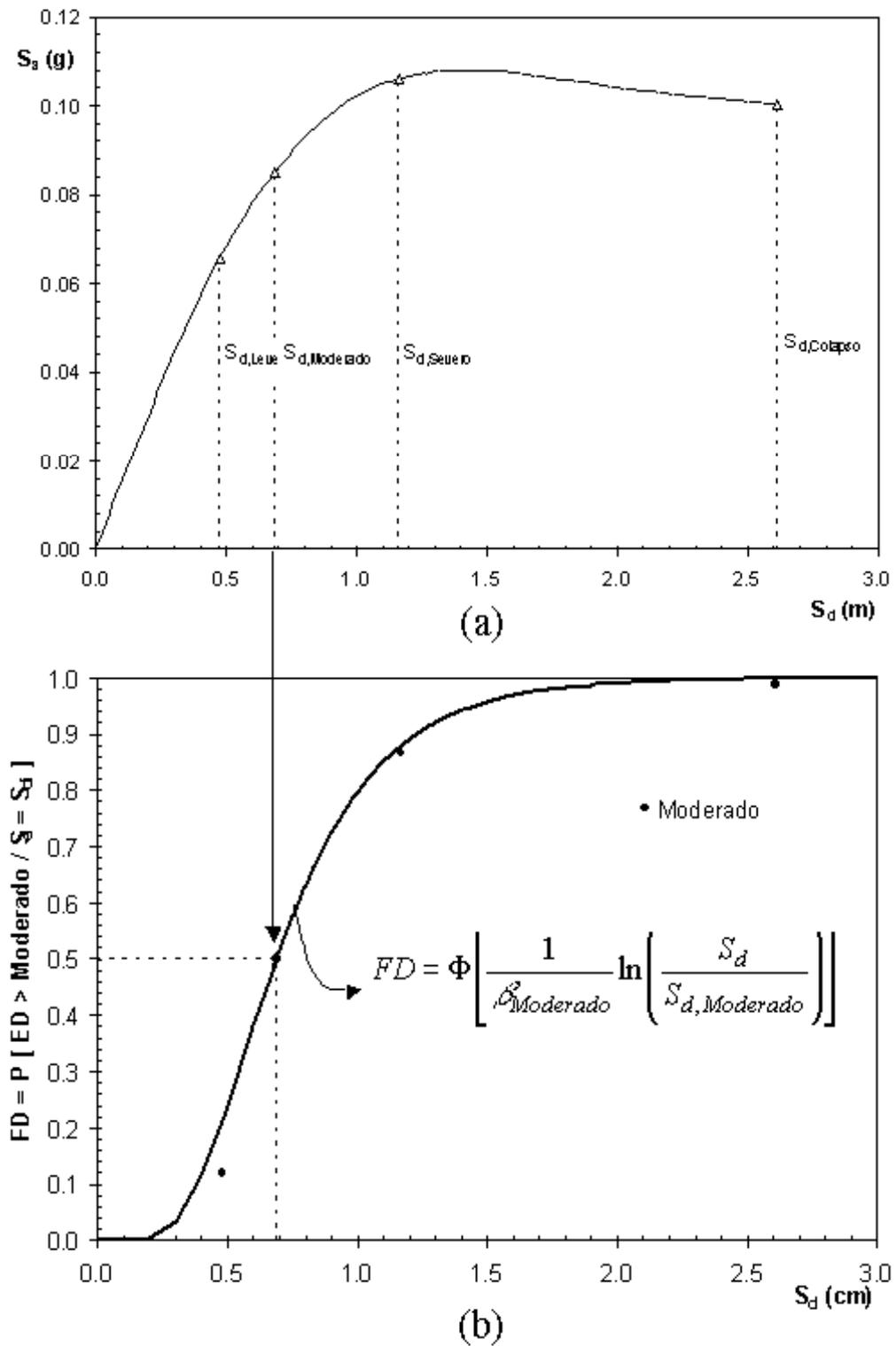


Figura 4.13. Esquema para la generación de curvas de fragilidad de forma expedita. El método se basa en un análisis pushover de la estructura. a) Espectro de capacidad de la estructura. b) Curva de fragilidad para el estado de daño moderado.

	Leve	Moderado	Severo	Colapso
\bar{S}_d (cm)	0.481	0.688	1.168	2.610
β_{S_d}	0.30	0.45	0.65	0.65

Tabla 4.4. Valor medio y desviación estándar de los desplazamientos espectrales para los estados discretos de daño.

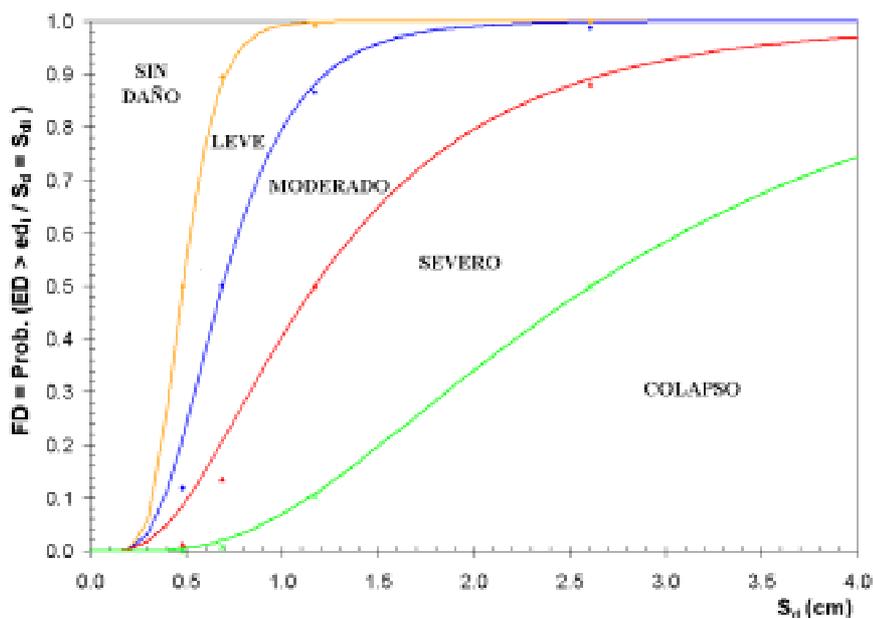


Figura 4.14. Curvas de fragilidad de un edificio de 6 niveles de mampostería no reforzada localizado en la ciudad de Barcelona-España (Bonett et al., 2003).

4.6 Resumen y discusión

En este capítulo se han presentado los métodos más utilizados para evaluar la vulnerabilidad sísmica mediante curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño; éstos son: 1) métodos a partir de observaciones de daños, 2) métodos experimentales, 3) métodos basados en la opinión de expertos y 4) métodos analíticos. Las diferencias existentes entre cada uno de ellos, se deben al tipo de información y a las técnicas de análisis que utilizan para evaluar el daño en las estructuras debido a movimientos sísmicos de diferente intensidad. Generalmente, todos estos métodos utilizan parámetros indicadores para representar la intensidad sísmica y el daño en las estructuras. Las curvas de fragilidad se construyen a partir del ajuste de funciones de distribución (generalmente la distribución lognormal) a los resultados obtenidos. A partir de estas funciones, es posible obtener matrices de probabilidad

de daño, las cuales proporcionan la probabilidad de ocurrencia de cada estado de daño para cada nivel de intensidad sísmica.

Los métodos que utilizan las observaciones de los daños registrados después de un sismo para generar las curvas de fragilidad, requieren de inspecciones de campo que permiten describir de manera cualitativa los efectos del sismo sobre las estructuras. Por lo general, este trabajo lo realiza un grupo de expertos en el análisis, diseño y patología estructural. A partir de toda la información recopilada durante estas inspecciones, se define algún Parámetro Indicador del Daño (*PID*) para una determinada intensidad sísmica. Los puntos que corresponden a un mismo estado de daño definen una curva de fragilidad.

Los métodos experimentales utilizan este mismo procedimiento pero los datos provienen de ensayos de laboratorio. En este caso, las características de la estructura y la acción sísmica se definen de acuerdo a los objetivos del ensayo. Con este tipo de métodos la cantidad de observaciones está condicionada al número de ensayos que se realicen.

Por otra parte, existen métodos que utilizan la opinión de expertos para evaluar el comportamiento de las estructuras ante la ocurrencia de un movimiento sísmico. Para ello, es necesario la elaboración de una serie de preguntas que permitan, mediante un *PID*, cuantificar el grado de daño de la estructura para una determinada intensidad sísmica. No obstante, los resultados obtenidos con este tipo de métodos pueden adolecer de subjetividad.

Por último, están los métodos de análisis numérico, los cuales pueden ser utilizados para las zonas en las cuales no se dispone de registros de daños sísmicos. Adicionalmente, para las zonas con una actividad sísmica moderada y alta pueden ser de gran ayuda, para la prevención y reducción del riesgo sísmico sin que sea necesaria la ocurrencia de un sismo. Los métodos analíticos se dividen en dos grandes grupos: deterministas y probabilistas. Los primeros no consideran las incertidumbres en los parámetros sísmicos y estructurales, mientras que los segundos lo hacen, por ejemplo, mediante técnicas de simulación, como el método de Monte Carlo. Ambos métodos utilizan técnicas de análisis estático o dinámico no lineal para evaluar la respuesta de la estructura. Los métodos probabilistas tienen la ventaja que proporcionan la función de distribución de probabilidad del *PID*, lo cual con otro tipo de métodos no es posible.

Cada uno de los métodos presentados en este capítulo constituye una fuente de información sumamente valiosa para el entendimiento del comportamiento de las estructuras cuando se ven sometidas a movimientos sísmicos. Los métodos a partir de observaciones son esenciales para calibrar los modelos utilizados en los métodos analíticos, de tal forma, que los resultados obtenidos, sean consistentes con los daños registrados durante sismos pasados. De igual forma, los métodos experimentales son de gran ayuda para ajustar las funciones de distribución de probabilidad de las principales variables que condicionan la respuesta de las estructuras. Finalmente, los métodos basados en la opinión de expertos constituyen una herramienta de evalua-

ción rápida y práctica para un gran número de estructuras, que puede ser de gran ayuda para la identificación de posibles focos de concentración del daño en la zona de interés.