

CAPÍTULO I

CURVAS DE FRAGILIDAD

RESUMEN

Se inicia definiendo las curvas de fragilidad mediante los términos más sencillos posibles, se continua indicando los niveles de daño de una estructura y su importancia para la realización del presente estudio, los mismos que se definen de acuerdo al valor que tome la distorsión de piso (drift).

Se incluye también una descripción de cada una de las metodologías para poder obtener o determinar las curvas de fragilidad, de acuerdo a la manera de obtener la información para la generación de las mismas.

1.1.DEFINICIÓN DE LAS CURVAS DE FRAGILIDAD

La vulnerabilidad es un factor que se encarga de medir el riesgo de un sujeto o un sistema ante la presencia de una amenaza determinada de acuerdo a la predisposición de ser afectada o de sufrir daño. Si se toma en cuenta esto ante un fenómeno de origen natural la diferencia radica en que este determina el carácter selectivo de la severidad de los efectos de dicho fenómeno. Así una curva de fragilidad o sísmica es una función que relaciona la intensidad sísmica con el daño o pérdida esperada en un elemento expuesto específico.

Por otra parte se sabe también que el funcionamiento de una estructura de hormigón armado depende de algunos parámetros importantes tales como: su resistencia, rigidez, ductilidad, etc. Además, su diseño toma en cuenta varios niveles de desempeño, pero se necesita una conexión que relacione los estados límites de la estructura con su probabilidad de ocurrencia. Aquí intervienen las curvas de fragilidad, las mismas que 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 suelo. En otras palabras, es una medida de vulnerabilidad sísmica de una estructura en términos probabilistas. (Bonett Díaz, Ricardo León 2003)

Para la generación de estas curvas de fragilidad es importante tener un entendimiento sobre los mecanismos de respuesta de una estructura para diferentes estados de 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 mas elevado.

Estas curvas son de gran utilidad para los ingenieros de diseño, investigadores, expertos de fiabilidad, expertos de compañías de seguros y administradores de sistemas críticos, tales como hospitales y autopistas, entre otros, debido a que son parte esencial para los siguientes tipos de estudios:

- 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, los 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.

Para la elaboración de estas curvas existen varios métodos, que difieren entre ellos de acuerdo al tipo de información y 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 de las estructuras. Las curvas de fragilidad se construyen a partir del ajuste de funciones de distribución (generalmente la distribución lognormal) a los resultados obtenidos. (Bonett Díaz, Ricardo León 2003)

Los métodos más utilizados son los siguientes:

- Métodos basados en observaciones de campo.
- Métodos experimentales.
- Métodos basados en la opinión de expertos.
- Métodos analíticos.

1.2. NIVELES DE DAÑO

Tradicionalmente, los códigos de edificios hacen énfasis en la seguridad de las vidas humanas, puesto que este es el objetivo principal en un diseño, pero el criterio de seguridad no es suficiente para asegurar el funcionamiento después de un sismo. Por lo tanto un mejor control de daños debe guiar los impactos sociales y económicos causados por la pérdida de edificaciones. Ha sido generalmente aceptado que la

distorsión de piso (drift) puede ser usada para normar el daño esperado. Así que para limitar y estimar el daño se debe entender mejor la relación entre distorsión de piso y el nivel de daños correspondiente.

Hoy en día los objetivos de diseño son expresados en términos de límites que están sujetos a ciertos niveles de riesgo sísmicos. Lo más importante es la definición de los diversos niveles y sus límites. La figura 1.1 indica un ejemplo donde se presenta 5 niveles de daño en términos de una curva de capacidad para estructuras de hormigón armado. La estructura está diseñada para no sufrir daños ante fisuras del concreto. Entre las fisuras de concreto y las primeras cedencias del acero: las fisuras deberían ser menores a dos milímetros para que el daño sea considerado reparable; la reparación no es práctica y además es costosa en casos de cedencia en el acero mayor a dos milímetros. Cabe destacar que esto se aplica para sistemas dúctiles. Los sistemas no dúctiles pueden experimentar fallas quebradizas en cualquier punto durante la curva de capacidad. (Raymond Foltz, Texas A&M, Agosto 2004)

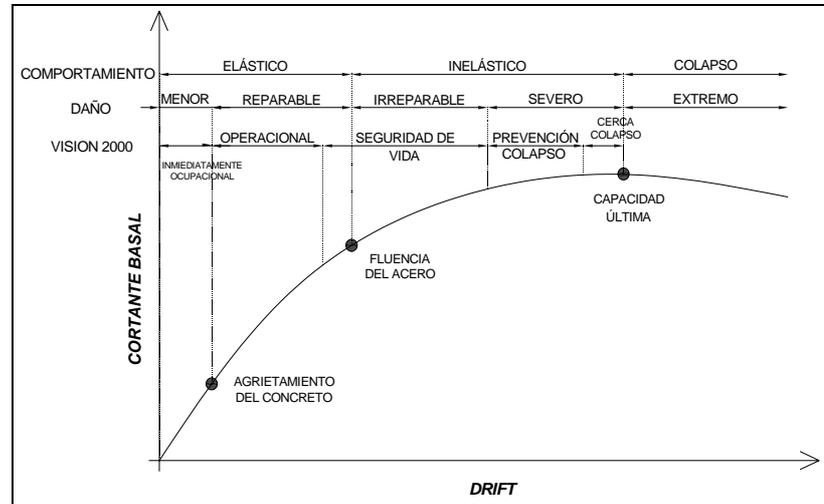


Figura 1.1 Niveles de daño en función del Drift

Para poder determinar los límites de daño se debe tomar en cuenta algunos factores como el sistema estructural, el modo de fallo de los elementos y las características específicas de los sismos, por lo que al determinar los límites de daño utilizando el parámetro de la distorsión de piso (drift), pero hay que tomar en cuenta que debe ser realizado especialmente para cada sistema estructural específico. Ghobrah

(2004) define los diferentes estados de daño como: sin daño, daño reparable, irreparable y daño severo, nótese que son diferentes a los presentados en el ATC 40. El define al estado “sin daño” como un daño estructural no observado; el daño “reparable” es un daño ligero como líneas de fisura; y el daño “moderado” como fisuras debidas a cortantes y momentos en vigas y columnas. El daño “irreparable” se refiere a las cedencias del acero de refuerzo con fisuras superiores a dos milímetros; el daño “extremo” como colapso parcial de elementos sujetos a carga lateral y vertical, como las fallas de corte de columnas y fallas en paredes.

Es importante conocer que son tres las características estructurales que definen al comportamiento dominante de una estructura: rigidez, resistencia y capacidad de deformación. Pero es dificultoso determinar qué característica es la dominante, porque se pueden imponer demandas conflictivas en cada una. La ductilidad es la habilidad para deformarse de los edificios, porque los límites del drift variarán significativamente por la ductilidad y no ductilidad de los sistemas, es necesario para asignar diferentes niveles de drift, el asociar con los distintos estados de daño tomando en cuenta los diferentes tipos de sistemas de edificaciones. Para este propósito, Ghoborah define cinco sistemas estructurales. Pórticos resistentes a momentos de hormigón armado que se dividen en tres categorías: dúctiles, no dúctiles y pórticos resistentes a momentos con mampostería. Las paredes estructurales están divididas en dos categorías: paredes estructurales flexibles con un % de drift mayor a 1.5 y paredes huecas con un % de drift menor a 1.5. A veces el desplazamiento en el último piso es relacionado al daño, pero eso no considera la distribución del drift entre la altura de la estructura o los elementos débiles identificados como pisos blandos. Así, la Tabla 1.1 define los límites de distorsión de pisos para los sistemas estructurales definidos y el estado de daños. El límite del drift se basa en datos experimentales y análisis teóricos, pero pueden ser afinados con pruebas adicionales posteriores.

Tabla 1.1. Drift (%) Para estructuras de concreto reforzado (Ghoborah et al 2004)

State of Damage	Ductile MRF	Nonductile MRF	MRF with Infills	Ductile Walls	Squat Walls
No Damage	< 0.2	< 0.1	< 0.1	< 0.2	< 0.1
Repairable Damage a) Light b) Moderate	0.4 < 1.0	0.2 < 0.5	0.2 < 0.4	0.4 < 0.8	0.2 < 0.4
Irreparable Damage (>yield point)	> 1.0	> 0.5	> 0.4	> 0.8	> 0.4
Severe Damage- Life safe- Partial Collapse	1.8	0.8	0.7	1.5	0.7
Collapse	> 3.0	> 1.0	> 0.8	> 2.5	> 0.8

Tabla 1.2. Criterios para la evaluación del desempeño estructural. Ghoborah et al (1997)

Daño →	Menor	Reparable	Irreparable	Severo	Extremo
Desempeño	Agrietamiento	Fluencia de acero	Inicio de Mecanismo	Mecanismo Global	Degradación notable de resistencia
Descripción de los daños	Grietas ligeramente visibles	Grietas	Grietas abiertas y pérdida de recubrimiento	Grietas muy anchas y mayor pérdida de recubrimiento	Deformaciones permanentes visibles
Índice de daño	0.05	0.14	0.40	0.60	Mayor de 0.60
Cuantificación de desempeño	Grietas menores de 0.3 mm.	Grietas menores de 1 mm.	Grietas entre 1 y 2 mm.	Grietas mayores de 2 mm.	Grietas anchas y profundas. Dilatación de los elementos
Drift de piso	0.005	0.011	0.023	0.046	> 0.060
Drift global	0.003	0.008	0.018	0.040	>0.049

Pero para el presente estudio se utilizo la Tabla 1.2. Propuesta también por Ghobarah en 1997, en la cual incluye los limites de daño en función del drift de piso. Este valor es de mayor utilidad para la clasificación de los casos que se analizan en este estudio para la obtención de curvas de fragilidad.

Mientras muchos han asignado valores de drift para diferentes límites de daño, Mayes (1995) establece que hay poca información existente sobre la relación directa entre drift y daño estructural porque es difícil desarrollar y eso cuenta con la compleja

relación entre drift, ductilidad y rigidez. Mayes también asigna valores de drift para daño y cree que los códigos provisionales son adecuados para un sismo de 475 años o un 2% o 6% de drift. Asimismo, estos límites son buenos más allá de los límites de daño no estructurales, los cuales deberían estar entre 0.5% y 2% (drift).

FEMA 356 (ASCE 2000) también prescribe valores de drift considerados como típicos para ilustrar la respuesta estructural de un conjunto relacionada a varios niveles de actuación definidos. De una manera más sencilla en la Tabla 1.3 se resumen los niveles de comportamiento estructural y el daño para elementos verticales encontrados en FEMA 356.

Tabla 1.3 Límites del drift

	Prevención de colapsos	Seguridad de vidas	Ocupación inmediata
Descripción del daño	Fisuras extensas y formación de rótulas en elementos dúctiles. Daño severo en columnas cortas.	Daño extenso en vigas. Fisuras de corte menores a 1/8" para columnas dúctiles.	Límite menor de fisuras. Posible cedencia limitada en unos pocos lugares.
Drift	4% transitorio o permanente.	2% transitorio; 1% permanente.	1% transitorio; insignificancia permanente.

Los límites del FEMA 256 son guías para un análisis global de una estructura, la relación entre el drift y el daño no es tan sencilla, puesto que el daño no puede ser completamente previsto usando sólo el drift por las relaciones complejas de las diferentes características entre edificaciones. Además, la mayoría de relaciones daño-drift son creadas sobre una base de información limitada, es por este motivo que si se relajaran mayores trabajos de investigación sobre el tema, esto ayudaría a precisar las guías aquí presentadas.

1.3. METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE LAS CURVAS DE FRAGILIDAD

Como se menciona anteriormente existen cuatro métodos que son los más utilizados para obtener curvas de fragilidad, 1) Métodos basados en observaciones de campo, 2) Métodos experimentales, 3) Métodos basados en la opinión de expertos y 4) Métodos analíticos, los métodos presentados en este trabajo fueron obtenidos de la tesis

doctoral de Bonett Díaz, Ricardo León (diciembre-2003), que fue elaborada en la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), bajo el título de “Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada.”

1.3.1. MÉTODOS BASADOS EN OBSERVACIONES DE CAMPO

Estos métodos como su nombre lo indica se generan las curvas a partir de los daños observados, son de gran utilidad para calibrar los resultados obtenidos con los métodos analíticos y los de ensayos en laboratorios. De esta manera, los daños registrados durante los sismos Marmara, Turquía, y Chi-Chi, en Taiwán, 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 pisos, etc.) y en 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 esos métodos.

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

- Sea n el número de los 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:

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

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

- Determinación de 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_i) 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:

$$f_i = \frac{m_i}{N_k} \quad (2)$$

- Ajuste de una función de distribución para el grupo de datos obtenidos (a_i, f_i) correspondientes a cada estado de daño ED_j .

Un ejemplo reciente de la 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 siguiente figura muestra las curvas de fragilidad obtenidas para los edificios aporticados de madera para diferentes periodos 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.

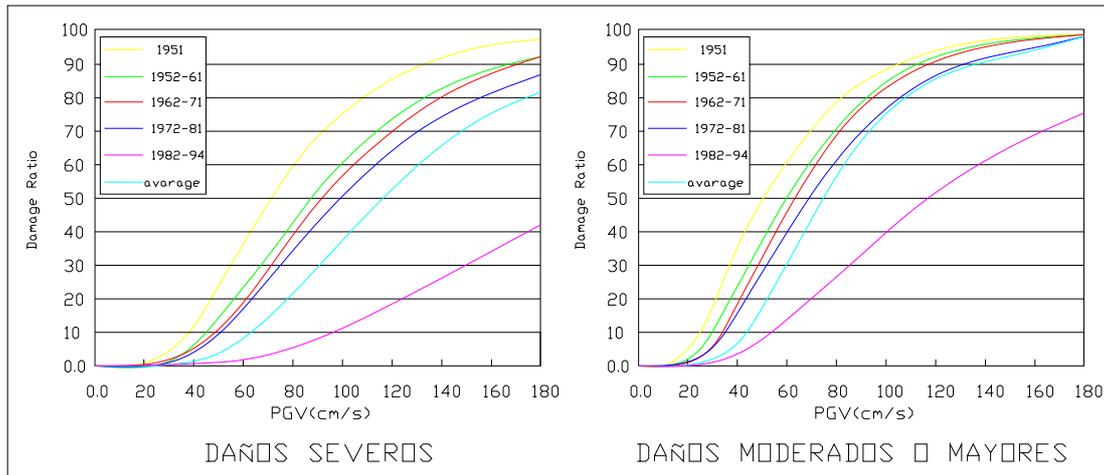


Figura 1.2 Curvas de fragilidad obtenidas por Yamaguchi y Yamazaki (sismo Kobe)

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.

1.3.2. MÉTODOS EXPERIMENTALES

El mismo procedimiento utilizado para generar las curvas de fragilidad a partir de observaciones de daño, pueden ser empleado para los datos obtenidos a partir de un ensayo 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 daño esta 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 aplicadores de carga o desplazamientos y 2) ensayos sobre mesas vibratorias, 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 vibratoria 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 ($\frac{vPGA}{hPGA} = 0, 1/4, 1/3, \text{ y } 1/2$). El primero de estos factores ($\frac{vPGA}{hPGA} = 0$), corresponde al caso en que no se considera la componente de la aceleración máxima vertical. Las mediciones de los valores $hPGA$ y $vPGA$ se hicieron en varios puntos de la mesa. Para medir los desplazamientos (Tempsonic 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. En la figura siguiente se muestra un ejemplo de las curvas obtenidas para un umbral de desplazamiento relativo igual a una 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 una pulgada.

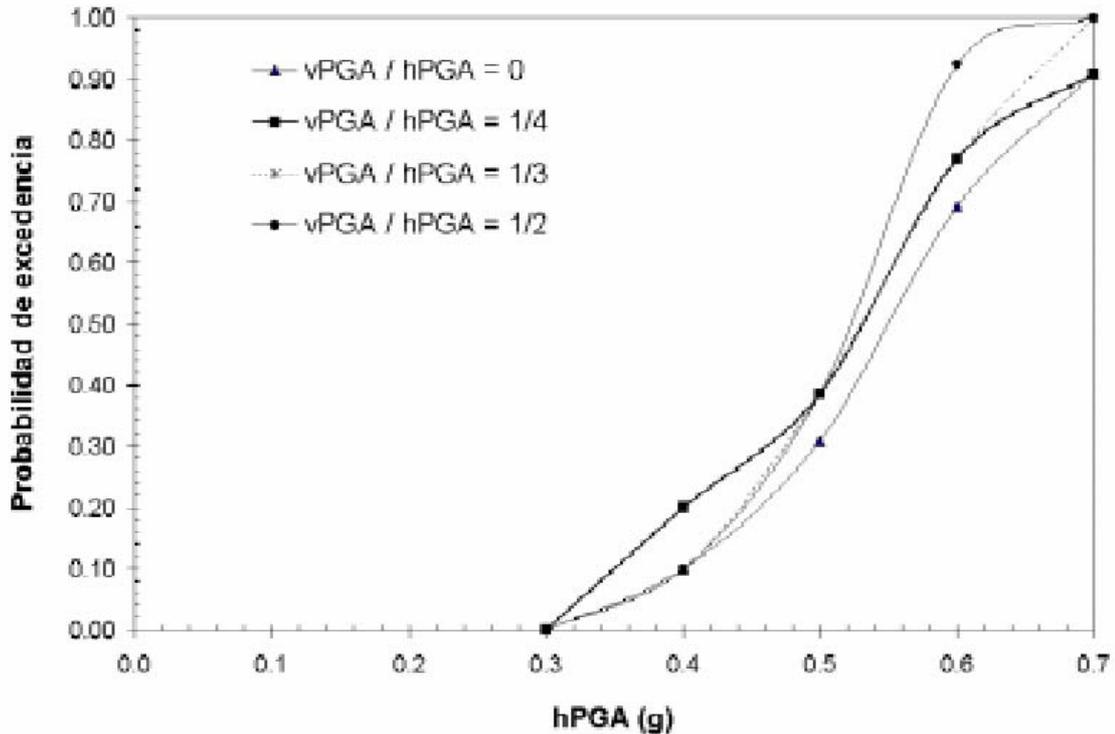


Figura 1.3 Ejemplo de curva de fragilidad experimentales (Chong y Soong, 2000)

1.3.3. MÉTODO A PARTIR DE OPINIÓN DE EXPERTOS

Otra manera de poder determinar curvas de fragilidad es a partir de 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 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 intensidad sísmica.

Anagnost et al., (1995) siguieron este método para transformar 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 considera 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 excedencia, se utilizan los intervalos de variación propuestos en el ATC-13 y la función de distribución beta. Así por ejemplo de acuerdo a la siguiente tabla, 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%. En la siguiente figura se 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.

Tabla 1.4 Estados discretos de daño e intervalos de variación del factor de daño (ATC, 1985)

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

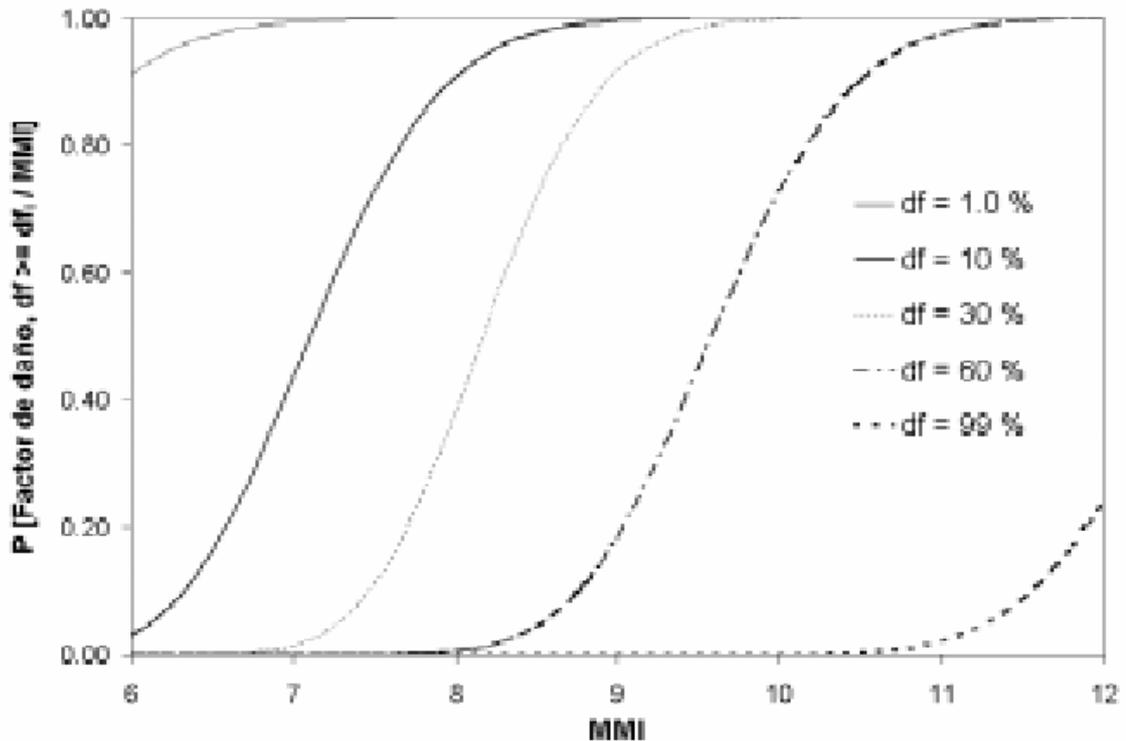


Figura 1.4 Ejemplo de curvas de fragilidad obtenidas a partir de la opinión de expertos para un edificio de mampostería de elevación media (Anagnost et al., 1995) *df* es el factor de daño o “damage factor”

1.3.4. MÉTODOS ANALÍTICOS

Estos métodos utilizan análisis numéricos y pueden ser empleados para zonas donde no se dispone de observaciones de daño debido 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 importantes.

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 manera posible tanto el comportamiento sísmico estructural como las principales características de los movimientos del terreno.

Una de las grandes ventajas de este tipo de método es que constituyen una herramienta fundamental para los estudios de prevención y atención de 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 describirá cada uno de ellos

1.3.4.1.MÉTODOS PROBABILISTAS

Los recientes avances de la ingeniería sísmica indican que los métodos probabilistas deben ser utilizados para proporcionar las bases para la mejora del diseño sismorresistente 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 modelo 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 determinado 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 permitan definir claramente la sismicidad de la zona y los efectos locales. “Desafortunadamente” son muy pocas las zonas que, aún con 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 la intensidad, duración, amplitud y contenido frecuencial, como las condiciones locales del suelo, pero este tema no se abordará para no desviar la atención de este trabajo. 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.

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.

1.3.4.2.MÉTODOS EXPEDITO

Los métodos analíticos para resolver problemas complejos, requieren por lo general, de una cantidad considerable de tiempo de 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 involucran un tiempo computacional grande y el uso de herramientas de cálculo avanzadas.

Esta claro que existen muchos casos en los cuales no se dispone ni de información de las 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 estos 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 Parámetros Indicadores de Daño PID y de 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 curvas de fragilidad a partir de la función de distribución

$$\text{lognormal } (P(PID \geq PID_i / PIS)) = \phi \left[\frac{1}{\beta_{PIS, PID}} \ln \left(\frac{PIS}{PID} \right) \right] \text{ donde el valor}$$

medio de la intensidad sísmica del movimiento \overline{PID} corresponde a los valores límites del PID para cada estado de daño y los valores β_{PIS} se pueden definir a partir del juicio de expertos, considerando los resultados obtenidos de observaciones de daño, ensayos de laboratorio o métodos probabilistas.

A manera de explicación se presenta un ejemplo del método expedito para generar las curvas de fragilidad de los edificios de mampostería no reforzada de la ciudad de Barcelona (España). En la figura siguiente se esquematiza el procedimiento utilizado para obtener las curvas de fragilidad del estado de daño moderado. En ella puede verse como sobre el espectro de capacidad obtenido a partir de un análisis estático no lineal, se puede 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_{sd} se generan mediante la ecuación mostrada anteriormente las curvas de fragilidad para cada estado de daño, esto es:

$$FD = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{s_d}} \ln \left(\frac{Sd}{\bar{Sd}} \right) \right] \tag{3}$$

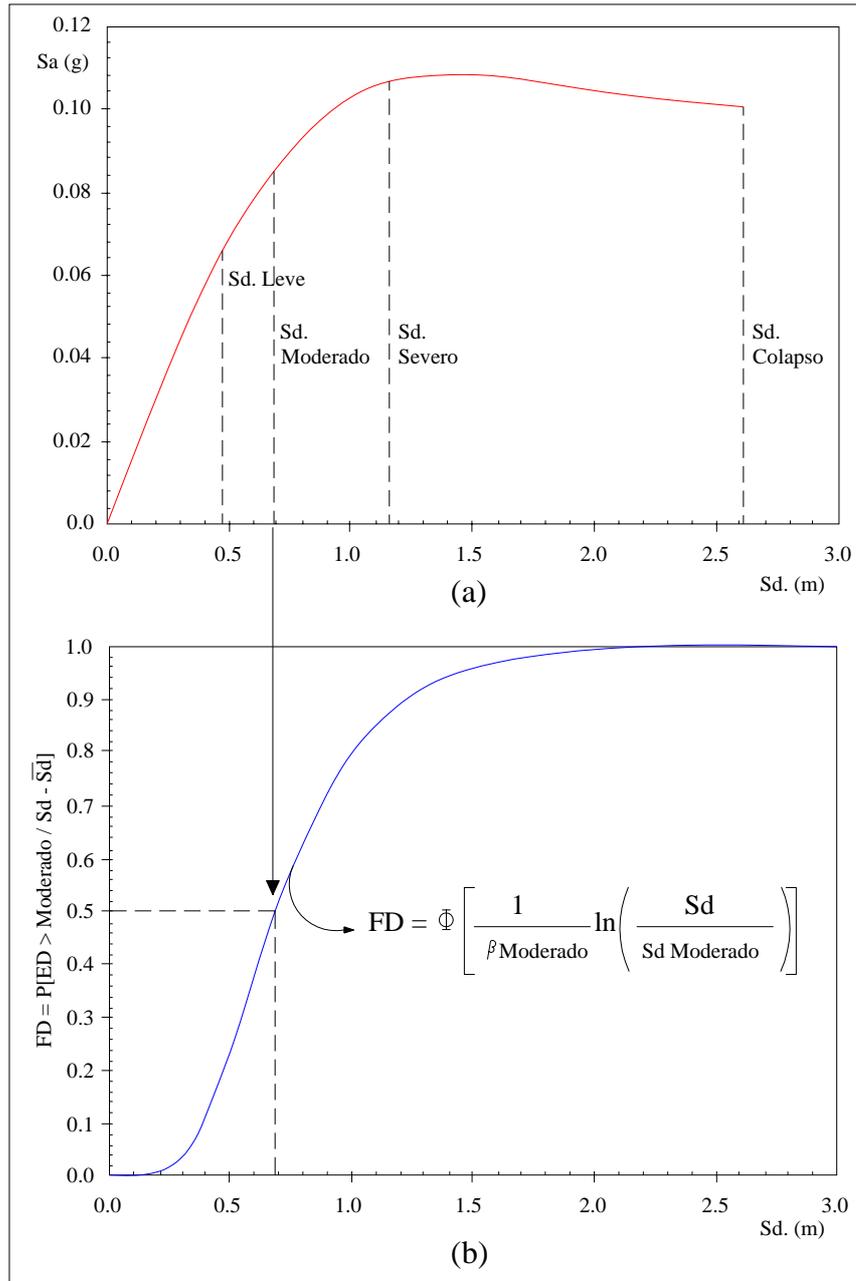


Figura 1.5 Esquema para la generación de curvas de fragilidad de forma expedita.

Este método se basa en un análisis de pushover de la estructura y así se obtiene el espectro de capacidad como se puede observar en la parte a) de la figura, para luego en la parte b) poder obtener la curva de fragilidad para el estado de daño moderado.

En la tabla que se indica a continuación se encuentran los parámetros a partir de los cuales se generan las curvas del ejemplo.

Tabla 1.5 Valores medios y desviación estándar de los desplazamientos espectrales para los estados de daño.

\bar{S}_d (cm)	Leve	Moderado	Severo	Colapso
	0.481	0.688	1.168	2.61
βS_d	0.3	0.45	0.65	0.65

En la figura que se muestra a continuación, se puede apreciar las curvas de fragilidad obtenidas para un edificio de 6 pisos de mampostería no reforzada construido en la zona del ejemplo en Barcelona (España).

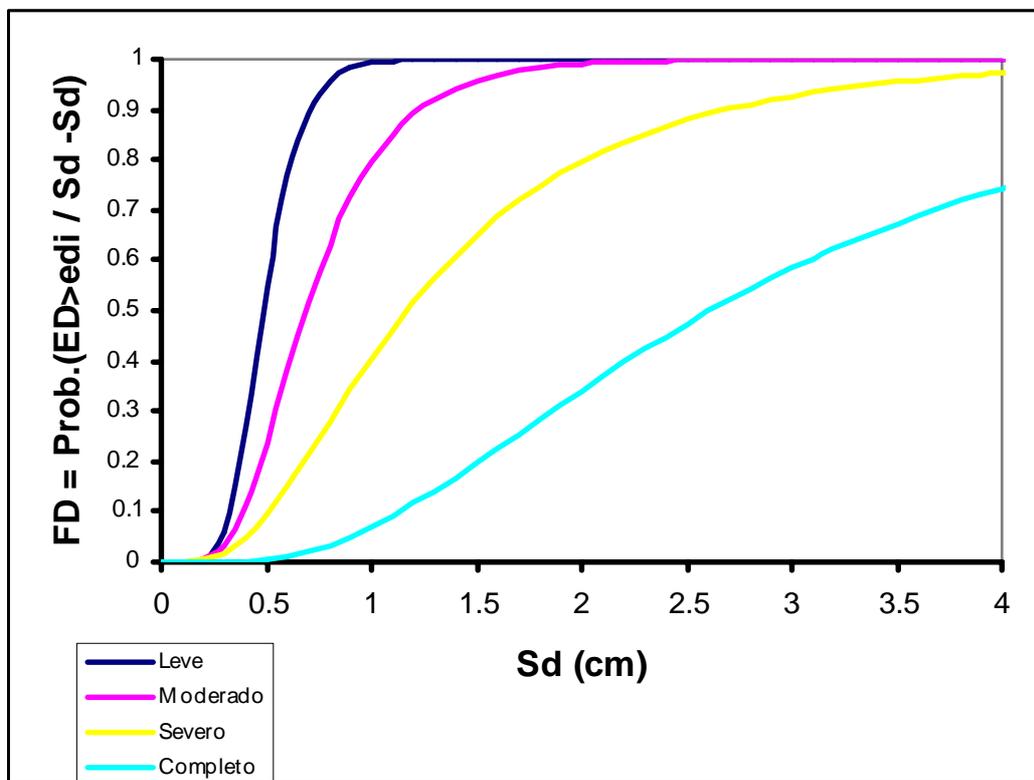


Figura 1.6 Curvas de fragilidad de un edificio de 6 pisos (España)