

CAPÍTULO 5

MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA

5.1. INTRODUCCIÓN

La vulnerabilidad sísmica es una propiedad intrínseca de la estructura, una característica de su propio comportamiento ante la acción de un sismo descrito a través de una ley causa-efecto, donde la causa es el sismo y el efecto es el daño (Sandi, 1986). La definición de la naturaleza y alcance de un estudio de vulnerabilidad sísmica debe estar condicionado por el tipo de daño que se pretende evaluar y el nivel de amenaza existente. La afectación o daño depende de la acción sísmica y de la capacidad sismorresistente de la estructura, de manera que la evaluación de la vulnerabilidad sísmica está necesariamente vinculada a la manera como se definen la acción y el daño sísmico.

Este capítulo centra su atención en todos aquellos aspectos relativos a la evaluación de la vulnerabilidad sísmica con énfasis en las diferentes metodologías de evaluación y los parámetros característicos empleados para describir la acción y el daño, profundizando el concepto de daño físico directo y su cuantificación a través de los llamados estados de daño ó índices de daño. Como objetivo principal, este capítulo pretende describir las diferentes estrategias utilizadas para la cuantificación de la vulnerabilidad sísmica, tanto en términos relativos (clases de vulnerabilidad e índices de vulnerabilidad), como en términos absolutos (matrices de probabilidad de daño, funciones de vulnerabilidad y curvas de fragilidad). La diferenciación entre técnicas relativas y absolutas se refieren a que las primeras no permiten de manera directa estimar los daños esperados para un nivel de acción determinada, sino que permiten calificar de manera relativa la mayor o menor predisposición de una estructura a sufrir daño, mientras que las segundas conducen a relaciones explícitas que permiten estimar de manera directa los daños esperados para los diferentes niveles de la acción sísmica.

5.2. METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN

5.2.1. Generalidades

Existen una variedad de metodologías y técnicas propuestas por diferentes autores para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de diferentes tipos de instalaciones (Caicedo et al., 1994). Estas técnicas de evaluación dependen principalmente de los siguientes factores:

- ◇ Naturaleza y objetivo del estudio
- ◇ Información disponible
- ◇ Características del elemento que se pretende estudiar
- ◇ Metodología de evaluación empleada
- ◇ Resultado esperado
- ◇ Destinatario de esta información

La selección de una determinada metodología está íntimamente relacionada con la escala del análisis y las características de los elementos bajo estudio; así por ejemplo, el estudio del riesgo sísmico de elementos particulares o aislados como edificios, puentes, presas, etc., generalmente se basa en evaluaciones deterministas de la vulnerabilidad, mientras que el estudio del riesgo sísmico de sistemas territoriales o categorías de elementos como tipos de edificios, líneas vitales, etc., generalmente se basa en enfoques probabilistas que permiten aplicaciones regionales del modelo a diferentes escalas, con la ventaja adicional, que pueden organizarse y tratarse con sistemas de información geográfica (EC-SERGISAI, 1998).

La medida que se emplee en el estudio depende del modelo adoptado y puede estar orientado a cuantificar los efectos sobre la población, los daños en las edificaciones, la afectación de los sistemas, etc. Estos efectos normalmente se expresan en parámetros monetarios. Entre los principales usuarios de estos estudios destacan por una parte, las autoridades públicas, regionales o locales, interesadas en conocer la relación costo/beneficio asociadas al nivel de riesgo implícito en la adopción de políticas de inversión, impuestos, leyes, ordenación y planificación del territorio, y por la otra, los organismos de protección civil y de seguridad social, a quienes interesa conocer los niveles de riesgo existente en sus instalaciones, las pérdidas posibles debidas a un sismo, definir la necesidad intervención o reforzamiento, gestionar recursos, trazar planes de emergencia, etc. (OPS, 1993).

Todas estas condicionantes, han motivado a algunos investigadores a proponer diversos esquemas de clasificación como un esfuerzo para tratar de canalizar o sistematizar las diferentes metodologías propuestas, que en resumida cuenta tienen como objetivo general, predecir el daño debido a un sismo con la menor incertidumbre posible.

5.2.2. Clasificación de las metodologías

En cuanto a las técnicas de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones, una de las clasificaciones más reconocida y completa se debe a Corsanero y Petrini (1990), quienes las agrupan en función del tipo de resultado que producen como: *Técnicas Directas*; permiten predecir directamente y en una sola etapa, el daño causado para un sismo. Destacan en este grupo los llamados métodos tipológicos y los métodos mecánicos. *Técnicas Indirectas*; determinan un índice de vulnerabilidad como primer paso, para luego relacionar el daño con la intensidad sísmica. *Técnicas Convencionales*; introducen un índice de vulnerabilidad independientemente de la predicción del daño. Se usan básicamente para comparar la vulnerabilidad relativa de diferentes construcciones ubicadas en áreas de igual sismicidad. *Técnicas Híbridas*; combinan elementos de los métodos descritos anteriormente con juicios de los expertos.

Sobre la base de esta clasificación, Dolce, M. (1994) propone un nuevo criterio de clasificación producto de examinar separadamente las etapas fundamentales que comprende un análisis de vulnerabilidad. Considera tres tipos de métodos: *Métodos Estadísticos*; basados en un análisis estadístico de las construcciones, caracterizadas por los datos de entrada. *Métodos Mecánicos*; en los cuales se estudian los principales parámetros que gobiernan el comportamiento dinámico de las estructuras como por ejemplo; deriva de piso, ductilidad, etc. *Métodos basados en Juicios de Expertos*; donde se evalúan cualitativa y cuantitativamente los factores que gobiernan la respuesta sísmica de las edificaciones.

Una clasificación más simplificada se basa en el tipo de medida que se utiliza y las agrupa como: *Técnicas Cuantitativas*; establecen las probabilidades de daño o relaciones determinísticas equivalentes en términos numéricos. *Técnicas cualitativas*; recurren a descripciones cualitativas a través de términos como vulnerabilidad baja, media, alta o similares.

Existen otros esquemas de clasificación de las técnicas o métodos de análisis de la vulnerabilidad sísmica. La clasificación adoptada en el desarrollo del presente estudio se corresponde con la propuesta por el prof. Kappos (Dolce, 1994), quien las agrupa en función de la fuente de información que prevalece, en tres tipos de metodologías;

- *Métodos empíricos*. Se caracterizan por un alto grado de subjetividad. Están basados en la experiencia sobre el comportamiento de tipos de edificaciones durante sismo y la caracterización de deficiencias sísmicas potenciales. Se usan cuando se dispone de limitada información, cuando se admite un resultado menos ambicioso y/o para evaluaciones preliminares. Son enfoques menos exigentes y más económicos de implementar. Los *métodos empíricos*, incluyen tanto los *métodos de categorización* como los *métodos de inspección y puntaje*.
 - . *Métodos de categorización o caracterización*. Clasifican las edificaciones según su tipología en *clases de vulnerabilidad* atendiendo a la experiencia sobre el desempeño sísmico que han tenido estructuras similares ante terremotos relevantes. El resultado suele ser bastante subjetivo por lo que generalmente es limitado a evaluaciones preliminares. Un ejemplo de esta metodología es la clasificación de los tipos de estructuras según su clase de vulnerabilidad propuesta por la EMS-98 (Grünthal, 1998).
 - . *Métodos de inspección y puntaje*. Permiten identificar y caracterizar las deficiencias sísmicas potenciales de una edificación, atribuyendo valores numéricos (tantos o puntos) a cada componente significativo de la misma, que ponderado en función de su importancia relativa, conduce a la determinación de un *índice de vulnerabilidad*. Aunque estos métodos son bastante subjetivos, la aplicación a edificaciones de una misma tipología de regiones de sismicidad importante permite una evaluación preliminar orientativa, suficiente para jerarquizar relativamente el nivel de vulnerabilidad sísmica de cada edificación. En zonas caracterizadas por una moderada sismicidad estas metodologías pueden considerarse representativas y más aún, suficientes para describir el nivel de daño esperado, sobre todo si se cuenta con funciones de vulnerabilidad apropiadas para la región. Sin embargo, para aquellas edificaciones que evidencien una relevante vulnerabilidad y una significativa importancia es recomendable complementar estas metodologías con alguna técnica analítica o experimental. Un ejemplo de esta metodología es el desarrollado por el *Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti* (GNDT, 1990).
- *Métodos analíticos o teóricos*. Evalúan la resistencia estimada de las estructuras a los movimientos del terreno utilizando como base modelos mecánicos de respuesta estructural e involucrando como datos las características mecánicas de las estructuras. Constituyen un enfoque muy completo, exigente y costoso. Generalmente son bastante laboriosos y dependen en cierta medida del grado de

sofisticación de la evaluación, de la calidad de la información y de la representatividad de los modelos empleados.

- *Métodos experimentales.* Recurren a ensayos dinámicos para determinar las propiedades de las estructuras y/o sus componentes. Generalmente constituyen ensayos “in situ” (menos frecuente de laboratorio), orientados a determinar las propiedades dinámicas y otras características esenciales de la estructura, involucrando aspectos tan importantes como la interacción suelo-estructura, la incidencia de los elementos no estructurales, etc. Aunque sus resultados no son determinantes, permiten en algunos casos orientar sobre el estado de la edificación y los posibles efectos que un sismo ha tenido sobre ella.

La aplicación exhaustiva de cada una de estas metodologías sobre una misma edificación puede dar origen a importantes discrepancias en los resultados, difíciles de interpretar y que en algunos casos puede dar origen a conclusiones erradas. En este sentido, para el análisis de la vulnerabilidad sísmica se recomienda combinar los métodos analíticos y empíricos, con algún método o técnica experimental que permita incrementar la confiabilidad del análisis de vulnerabilidad.

5.3. CARACTERIZACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA

La vulnerabilidad sísmica es una propiedad intrínseca de la estructura descrita a través de una ley causa-efecto, donde la causa es el sismo y el efecto es el daño (Sandi, 1986). La naturaleza y alcance de un estudio de vulnerabilidad sísmica debe estar condicionado por el tipo de afectación o daño que se pretende evaluar y el nivel de amenaza existente. En este sentido, la caracterización de la vulnerabilidad sísmica de una estructura está estrechamente vinculada a los probables daños inducidos como consecuencia de un movimiento sísmico que dependen fundamentalmente de tres factores; la severidad del movimiento en el emplazamiento, las características de la estructura y su vulnerabilidad sísmica (Barbat, 1998).

El concepto de vulnerabilidad puede utilizarse no solo para describir aspectos estructurales, sino también para describir aspectos no estructurales, funcionales, operativos, entre otros. En este sentido, se hace necesario clarificar el tipo de afectación o daño que se considera en la evaluación de vulnerabilidad.

Aunque no existe una metodología estándar para estimar la vulnerabilidad sísmica de las estructuras, se han propuesto diferentes métodos (Caicedo et al., 1994), cuyo resultado pretende hacer una descripción global del daño que experimentaría una estructura de una tipología dada, sometida a la acción de un sismo determinado. El resultado de un estudio de vulnerabilidad sísmica está condicionado a la manera concreta como haga la descripción del daño y del movimiento sísmico. La relación entre estos parámetros suele formularse discretamente, mediante matrices o de manera continua, a través de funciones o curvas, que tienen un carácter regional, limitando su transportabilidad, por lo que es necesario propiciar el desarrollo de funciones propias que reflejen los aspectos constructivos y culturales representativos de cada región. Pueden obtenerse analíticamente, simulando la respuesta sísmica de estructuras de una misma tipología definiendo la llamada *vulnerabilidad calculada*, o bien, de la observación de daños causadas sobre edificaciones perteneciente a zonas afectadas por terremotos, cuyo tratamiento estadístico basado en

aspectos empíricos y subjetivos definen la llamada *vulnerabilidad observada* (Barbat, 1998).

Para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones individuales, es necesario un estudio detallado que permita conocer la susceptibilidad de la edificación de sufrir un determinado nivel de daño para un movimiento especificado. Estos estudios, generalmente se basan en la comparación de la capacidad resistente de la edificación con la demanda. La demanda es una representación de la acción sísmica y la capacidad es una representación de la posibilidad que tiene la estructura de resistir la demanda sísmica, manteniendo un desempeño compatible con el nivel de respuesta esperado; es decir, una medida de los daños esperados. De manera que, la *acción sísmica* y el *daño sísmico*, constituyen los elementos fundamentales para la caracterización de la vulnerabilidad sísmica.

5.3.1. La acción sísmica

La acción sísmica, también referida como la demanda sísmica, constituye uno de los elementos fundamentales para la apropiada caracterización de la vulnerabilidad sísmica. De manera que una de las más importantes decisiones en un estudio de vulnerabilidad y riesgo sísmico es la apropiada definición y caracterización de la acción sísmica. El establecimiento fiable de la acción sísmica de diseño debe ser capaz de representar adecuadamente el movimiento esperado en un determinado emplazamiento, de manera que proporcione una respuesta crítica de la estructura con los mayores daños potenciales (Singh, 1995).

La cuantificación de la amenaza o peligro sísmico, es el resultado de un estudio de *peligrosidad sísmica*. A pesar del gran progreso en los últimos años en las técnicas de evaluación de la peligrosidad sísmica que ha llevado a un mejor entendimiento de los peligros sísmicos para su consideración en el diseño sismorresistente, todavía existen incertidumbres importantes debidas principalmente a la complejidad del fenómeno sísmico que en algunos casos pueden sobrestimar o subestimar la intensidad esperada del movimiento. El primer caso, se reflejaría en un incremento excesivo de los costos asociados a un nivel de riesgo esperado, mientras que el segundo caso, daría margen a daños excesivos incrementando la probabilidad de pérdida de vidas y el tamaño de la catástrofe sísmica.

Es importante reconocer que no todos los parámetros convencionalmente empleados para caracterizar la severidad del movimiento sísmico son apropiados para evaluar el daño potencial y que algunos de ellos son especialmente pobres, sin embargo se siguen empleando. Para caracterizar la severidad del movimiento sísmico generalmente se emplean parámetros simples como la intensidad macrosísmica, la aceleración del terreno, entre otros. Estos parámetros proporcionan una limitada información del evento, que conduce a una importante dispersión de los efectos producidos por diferentes sismos caracterizados por el mismo valor del parámetro considerado (Benedetti et al., 1988).

La *intensidad macrosísmica*, expresada mediante los grados de una escala internacional reconocida, tiene como ventaja que comprende una importante información de la sismicidad histórica y de observación de daños en sitios afectados por terremotos apreciables, pero no es directamente utilizable como dato de entrada en las estimaciones efectuadas a través de un análisis estructural y en ocasiones resulta inapropiado para evaluar daños potenciales de una edificación, sin embargo, estos pueden estimarse sobre

bases estadísticas cuando la edificación puede identificarse como perteneciente a una clase de edificios previamente considerada.

Por su parte, la *aceleración del terreno* cuenta con menor soporte de datos limitado a terremotos recientes donde ha sido posible obtener un registro instrumental. Es una entidad con un claro significado físico y mecánico, idóneo para evaluaciones sobre bases analíticas de edificaciones singulares. Entre los parámetros asociados a la aceleración del terreno destacan la aceleración máxima del terreno, la aceleración media cuadrática, los espectros de respuesta, los espectros de energía, entre otros.

La *aceleración máxima del terreno o aceleración pico*, obtenida directamente o con algunos cálculos simples aplicados sobre un registro acelerográfico digitalizado y corregido, constituye quizás el parámetro más frecuentemente asociado con la severidad del movimiento sísmico, sin embargo debe reconocerse que es un pobre parámetro para evaluar el daño potencial. Por ejemplo, un pico de aceleración puede estar asociado con un impulso de corta duración (de alta frecuencia) o con un impulso de larga duración (de baja frecuencia). En el primer caso, la mayor parte del impulso es absorbido por la inercia de la estructura con pequeñas deformaciones; sin embargo, una aceleración moderada en el segundo caso puede conducir a significativas deformaciones de la estructura. En este caso, Anderson y Bertero (1987) sugieren el uso de la máxima velocidad incremental¹ y el máximo desplazamiento incremental². Numerosas investigaciones (Singh, 1995) demuestran que otros parámetros asociados al movimiento como el contenido de frecuencias, la duración, la velocidad, el desplazamiento, la velocidad incremental, el desplazamiento incremental, etc., pueden tener mayores efectos sobre la respuesta estructural que la aceleración pico, particularmente en el rango inelástico.

Los *espectros de respuesta*, obtenidos de la integración paramétrica de la ecuación de movimiento de un sistema elástico o inelástico de un grado de libertad, son en la actualidad el método más popular para los análisis de respuesta dinámica de estructuras. Uno de sus más significativas limitaciones es que no toman en cuenta la duración del movimiento, aspecto que es determinante para la estimación del daño potencial. Los *espectros de energía*, obtenidos de la integración de la ecuación de balance energético de un sistema elástico o inelástico, proporcionan una estimación más confiable del daño potencial y del grado de deformación inelástica.

Otro aspecto fundamental para una adecuada caracterización del movimiento sísmico que permita una apropiada estimación del daño potencial es el efecto de la cercanía a la falla (Singh, 1995). De hecho, los registros obtenidos en los últimos años indican claramente que las características dinámicas del movimiento pueden variar significativamente entre estaciones de registro localizadas en una misma área, sobre todo en las zonas ubicadas en el área epicentral, donde el movimiento es dominado por las características de la fuente, con altas componentes de directividad de la señal. En este sentido, en zonas con fallas cercanas, es importante hacer consideraciones especiales ya que la respuesta dinámica no lineal de una estructura y en particular la respuesta en desplazamientos, es muy sensible a las características dinámicas del movimiento.

¹ La velocidad incremental, representa el área bajo un pulso de aceleración.

² El desplazamiento incremental, representa el área bajo un pulso de velocidad

5.3.2. El daño sísmico

El término *daño* es ampliamente utilizado, sin embargo en su concepción más empleada, pretende representar el deterioro físico de los diferentes elementos o el impacto económico asociado. En este sentido, es común referirse a *daño físico* y *daño económico* (Yépez, 1996). El *daño físico* que puede sufrir una edificación generalmente se califica como:

- a. *Estructural*, depende del comportamiento de los elementos que forman parte del sistema resistente tales como, vigas, pilares, muros, forjados, etc. Se relaciona con las características de los materiales que le componen, su configuración y ensamblaje, el tipo del sistema resistente y las características de la acción. Se cuantifica mediante índices de daño correspondientes a cada uno de los elementos estructurales, cuya ponderación sobre parte o la totalidad de la estructura, permite la definición de los llamados índices de daño globales.
- b. *No estructural*, asociados a los elementos arquitectónicos y los sistemas mecánicos, eléctricos, sanitarios, así como del contenido de la edificación. Se relaciona con los niveles de deformación y distorsión que sufre la estructura y en ocasiones, con las aceleraciones a las que está sometida durante el proceso.

El *daño económico* se define como la relación entre los costes de reparación y los costes de reposición, e incluyen tanto los costes de daño físico directo como los costes de daños indirectos. Intenta representar el daño en términos de pérdidas económicas o costes financieros tomando en cuenta la afectación de los diferentes componentes estructurales y no estructurales y generalmente se hace a través de métodos empíricos, teóricos y subjetivos. Usualmente se correlaciona con el daño estructural, sin embargo, su evaluación es realmente dificultosa y su utilización interesa fundamentalmente a las agencias gubernamentales y compañías de seguros, entre otras.

La mayoría de los estudios de vulnerabilidad y riesgo sísmico centran su atención en la descripción de los *daños físicos* que pueden sufrir las edificaciones como resultado de la acción de un sismo con determinadas características. Su cuantificación depende de la manera concreta como se describan los daños y dan origen a diferentes escalas de medición. Existen diversas escalas de medidas cuantitativas y cualitativas del daño que intentan describir el estado global de la estructura después de la ocurrencia de un terremoto.

5.3.2.1. Estados o grados de daño

Una primera alternativa para describir el nivel de daño consiste en definir diferentes *estados de daño* de la edificación. Para ello, se emplean términos o definiciones cualitativas que sirven como indicadores del grado de daño global de la edificación o del nivel de perturbación que sufre el mantenimiento de sus funciones. Constituyen una medida discreta del nivel de deterioro que puede sufrir la edificación.

Existe una diversidad de escalas de estados de daño utilizados por diferentes autores (Singhal y Kiremidjian, 1995) que intentan describir de la mejor manera posible la naturaleza y extensión del daño sufrido por los componentes estructurales; sin embargo, la mayoría de los trabajos han utilizado cinco estados de daño básicos identificados a través de los siguientes calificadores: ninguno, menor, moderado, severo y colapso.

Una aplicación de esta alternativa sirve de base para la definición de la Escala Macrosísmica Europea EMS (Grünthal, 1993, 1998), donde la escala de efectos se relacionan directamente con los daños identificados en las edificaciones luego de la inspección post-terremoto. Ésta escala define 5 grados de daño global asociados a patrones de daños predefinidos, tanto para edificios de mampostería no reforzada como para edificios de hormigón armado, descritos en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Grados de daño s/escala de intensidades EMS-98 (Grünthal, 1998)

<i>Grado de daño</i>	<i>Descripción cualitativa</i>	<i>Daño estructural</i>	<i>Daño no estructural</i>
Grado 1	Daño leve a despreciable	Sin daño	Ligero
Grado 2	Daño moderado	Ligero	Moderado
Grado 3	Daño sustancial a severo	Moderado	Severo
Grado 4	Daño muy severo	Severo	Muy severo
Grado 5	Destrucción	Muy Severo	----

Un enfoque similar es utilizado por el ATC-20-3 (1989), para la evaluación rápida de la seguridad de edificios en el área epicentral. A través de la inspección de daños en los diferentes elementos estructurales y no estructurales, es posible calificarlos en tres estados elementales; daños menores, moderados y severos, que servirán de base para una estimación subjetiva porcentual del daño global de la edificación, permitiendo decidir al menos en forma preliminar, sobre la seguridad y posibilidad de uso de una edificación posterior a un evento sísmico.

Existe la tendencia a relacionar los grados de daño con un índice o porcentaje de daño global de la estructura. Estas relaciones son esencialmente subjetivas y se utilizan en los estudios post-terremotos. Están estrechamente ligadas a la definición del daño de la escala macrosísmica empleada. La Tabla 5.2., muestra algunas relaciones adoptadas en algunos países (Yépez, 1996).

Tabla 5.2. Relación entre grados de daño e índice de daño global de la estructura

<i>GD</i>	<i>Rumania</i>	<i>Yugoslavia</i>	<i>MSK 64</i>	<i>Bulgaria</i>	<i>China</i>	<i>U.S.A.</i>	<i>MSK 76</i>
1	4%	0%	2%	5%	20%	1%	20%
2	16%	6%	10%	20%	40%	20%	40%
3	36%	25%	30%	40%	60%	40%	60%
4	64%	56%	80%	80%	80%	80%	80%
5	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Para la evaluación del riesgo sísmico en edificios, el “Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti - GNDT” (GNDT, 1990), cuenta con un importante soporte de datos observados sobre daños sísmicos en edificios durante los recientes terremotos ocurridos en Italia. La obtención de datos de daño a través de la inspección post-terremoto está orientada a identificar un grado de daño cuya correlación con algún parámetro característico del evento sísmico permite la definición de funciones de vulnerabilidad observada. Para la evaluación del daño global por sismo, el método define una escala entre A y F, basada en la evaluación del daño en el sistema resistente vertical, en los elementos horizontales y cubiertas, así como en las escaleras. La Tabla 5.3., resume la escala de daño empleada.

Tabla 5.3. Escala de daño global por sismo (GNDT, 1990)

Grado de daño	Descripción cualitativa	Índice de daño global
A	Ningún daño o daño despreciable	0 %
B	Daño leve	10 %
C	Daño medio	25 %
D	Daño grave	50 %
E	Daño muy grave	75 %
F	Destrucción total	100 %

5.3.2.2. Indicadores e índices de daño

Un análisis más detallado del nivel de daño exige la definición de parámetros asociados con el comportamiento dinámico no lineal de las edificaciones sujetas a un sismo que permitan representar los niveles de degradación local o global del sistema.

Entre las diferentes parámetros empleados para describir el daño, destacan los llamados *indicadores e índice de daño* (local o global). Éstos cuantifican la degradación de los elementos estructurales que forman parte de los sistemas resistentes a cargas laterales, verticales e incluso los sistemas de piso (forjados). Se fundamentan en la apropiada definición de un *modelo de daño* representativo de las propiedades de los materiales, la tipología estructural y las características de las acciones aplicadas, compatible con las simplificaciones del modelo estructural.

Los *modelos de daño* deben basarse en parámetros estructurales capaces de describir la evolución del daño en determinados puntos de la estructura y cuya combinación permita cuantificar el daño global, proporcionando una medida efectiva de la proximidad del fallo (Yépez, 1996). La evolución del daño debe ser descrita a través de funciones adimensionales monótonas, no decrecientes, que representen todos los estados de daño desde su ausencia hasta el fallo. Estos modelos generalmente se fundamentan en la relación demanda-capacidad de alguna variable estructural específica, la evolución de la degradación de alguna propiedad estructural e incluso en la definición de parámetros energéticos.

Importantes esfuerzos han sido orientados para desarrollar índices de daño que permitan calificar la respuesta de las estructuras. Reinhorn y Valles (1995) presentan un resumen de varios índices de daños propuestos en la literatura, entre los que destaca el índice de daño de Park & Ang (Park et al., 1984). Este modelo combina linealmente el daño debido a la máxima incursión inelástica y el daño debido a la historia de deformaciones. Para un elemento estructural se define como: (Valles et al., 1996)

$$DI_{P\&A} = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \frac{\beta}{\delta_u P_y} \int dE_h \quad (5.1)$$

δ_m ... Máxima deformación experimentada

δ_u ... Deformación última del elemento

P_y ... Resistencia cedente del elemento

$\int dE_h$... Energía histerética absorbida por el elemento durante la historia de la respuesta.

β ... Parámetro constante del modelo.

Los índices de daños globales generalmente se obtienen como un promedio ponderado de los índices de daño locales. Para la ponderación se emplean relaciones que permitan proporcionar mayor peso a las zonas más dañadas para lo cual se emplean por ejemplo, funciones de peso proporcionales a la energía disipada en el elemento. Esta ponderación puede realizarse para toda la estructura o para cada nivel de entrepiso. En este sentido, para extender la aplicación del modelo de daño de Park & Ang y estimar un índice de daño de piso o un índice de daño total (Valles et al., 1996), generalmente se emplean factores de peso basados en la energía histerética disipada en los componentes de un nivel, según:

$$DI_{piso} = \sum (\lambda_i)_{comp} (DI_i)_{comp} \quad (\lambda_i)_{comp} = \left(\frac{E_i}{\sum E_i} \right)_{comp} \quad (5.2.a)$$

$$DI_{total} = \sum (\lambda_i)_{piso} (DI_i)_{piso} \quad (\lambda_i)_{piso} = \left(\frac{E_i}{\sum E_i} \right)_{piso} \quad (5.2.b)$$

siendo DI_{piso} el índice de daño correspondiente a un nivel o piso, $(DI_i)_{comp}$ el índice de daño correspondiente a un elemento componente i del piso, $(\lambda_i)_{comp}$ es el peso asignado al componente i del piso. E_i , en la expresión 5.2.a, la energía disipada en el elemento componente i y $\sum E_i$, en la expresión 5.2.a, es la suma de las energías disipadas en todos los elementos constituyentes del piso.

Análogamente DI_{total} es el índice de daño correspondiente a la estructura o edificio, $(DI_i)_{piso}$ es el índice de daño correspondiente al nivel o piso i , $(\lambda_i)_{piso}$ es el peso asignado al piso i , E_i , en la expresión 5.2.b, es la energía disipada en el nivel o piso i y $\sum E_i$, en la expresión 5.2.b, es la suma de las energías disipadas en todos pisos o niveles que constituyen la estructura o edificio total.

5.3.2.3. Relación entre los estados de daño y los índices de daño

Para fines interpretativos y comparativos es necesario establecer relaciones confiables entre los indicadores e índices de daño globales con los grados o estados de daño previamente definidos. La Tabla 5.4., reproduce los resultados de la calibración entre el daño estructural observado en varias edificaciones de hormigón armado evaluadas post-terremoto y el conocido índice de daño propuesto por Park & Ang (Park et al., 1986).

Tabla 5.4. Relación entre índice de daño y estados de daño (Park et al., 1986)

DI	<i>Grado de Daño</i>	<i>Descripción de daños</i>
< 0.10	Sin daño	No existe daño o daño ligero por fisuración localizada
0.10 a 0.20	Ligero	Daño ligero por fisuración distribuida
0.20 a 0.50	Moderado	Agrietamiento severo localizado y desprendimiento de recubrimiento
0.50 a 0.85	Severo	Aplastamiento del hormigón y el refuerzo queda expuesto en ciertas zonas.
> 0.85	Colapso	Se produce el colapso estructural

La Tabla 5.5., describe la relación entre el índice de daño propuesto por Park & Ang y diferentes estados de daños asociados a la propia estructura, su condición de prestar servicios y de ser utilizada, así como su estado de apariencia (Reinhorn, 1997).

Tabla 5.5. Relación entre índice de daño y diferentes estados de daño (Reinhorn, 1997)

<i>Índice de Daño (DI)</i>	<i>Grado de daño</i>	<i>Estado de Servicio</i>	<i>Estado de Uso</i>	<i>Descripción de daños</i>
0.00	Ninguno	Sin daño	Operacional	No deformada, no agrietada
0.20-0.30	Ligero	En servicio	Inmediata Ocupación	Agrietamiento de moderado a severo
0.50-0.60	Moderado	Reparable	Seguridad Vital	Desprendimiento de Recubrimiento
< 1.00	Moderado a Severo	No reparable	Prevención de Colapso	Pandeo barras, exposición núcleo
1.00	Colapso	Colapso	No utilizable	Perdida de capacidad Corte/axial.

5.3.2.4. Otros parámetros empleados para cuantificar el nivel de daño

Existe una variedad de propuestas para cuantificar el nivel de daño que sufre una edificación como consecuencia de la acción de un sismo, muchos de los cuales intentan correlacionar los estados de daño, los indicadores de daño y los índices de daño, con parámetros estructurales de interpretación directa como son, la deriva de entrepiso, la ductilidad de piso, etc.

Utilizando como base un estudio estadístico con simulación de Montecarlo, Jaw y Hwang (1988) establecen una correlación entre los valores medios de demanda de ductilidad³ de estructuras y los diferentes estados de daño propuestos por Aktan y Bertero (1985), resumidos en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6. Relación entre los valores medios de demanda de ductilidad y los estados de daño (Jaw y Hwang, 1988)

<i>Estado de daño</i> s/ Aktan y Bertero (1985)	<i>Valores medios de demanda de ductilidad</i>
Daño no estructural	1
Daño estructural ligero	2
Daño estructural moderado	4
Daño estructural severo	6
Colapso	7.5

Recientemente existe la tendencia de emplear como parámetros indicativo del nivel de daño, la *capacidad media de disipación de energía plástica de la estructura*, como una manera de caracterizar la evolución de la respuesta no lineal esperada. En este sentido, el diseño estaría enfocado a establecer las características mecánicas que requiere la estructura de manera que, el daño producido por la disipación de energía plástica sea consistente con los niveles de daño estructural tolerables (Teran, 1997).

Otros índices, basados en parámetros vibracionales, permiten hacer una estimación directa del daño global, sin necesidad de promediar índices locales. Entre ellos destacan los *índices de ablandamiento*, que relacionan los cambios de los primeros modos de vibración

³ Se entiende por Demanda de Ductilidad, el cociente entre el máximo valor del desplazamiento alcanzado por el sistema estructural durante su respuesta sísmica y el desplazamiento cedente.

de la estructura con el nivel de daño ocurrido. En particular, DiPasquale y Cakmak (1988) emplean como medida del daño global el máximo ablandamiento estructural δ_M , definido como:

$$\delta_M = 1 - \frac{T_i}{T_{\max}} \quad (5.3)$$

T_i ... Período fundamental de vibración inicial

T_{\max} ... Máximo valor del período fundamental de vibración alcanzado durante la respuesta sísmica.

A través de una simulación numérica, establecen correlaciones entre el máximo ablandamiento estructural y la máxima demanda de ductilidad de entrepiso o la máxima deriva de entrepiso, que constituyen parámetros de práctica interpretación para propósitos de evaluación y diseño sísmico.

La Fig. 5.1., esquematiza la evolución del período fundamental de una estructura durante su respuesta sísmica. En la misma se observa como la estructura inicialmente caracterizada por un período fundamental T_i experimenta un incremento de su período de vibración como consecuencia de la degradación de sus componentes estructurales que se manifiesta en un ablandamiento del sistema, alcanzando un valor máximo T_{\max} . Una vez finalizada la acción sísmica, la estructura retorna a su posición de equilibrio, sin embargo, los daños permanentes en sus diversos elementos estructurales han degradado la rigidez global del sistema de manera que la estructura luego del evento sísmico permanecerá con propiedades dinámicas alteradas respecto las originales, especialmente el período de vibración final o remanente T_f .

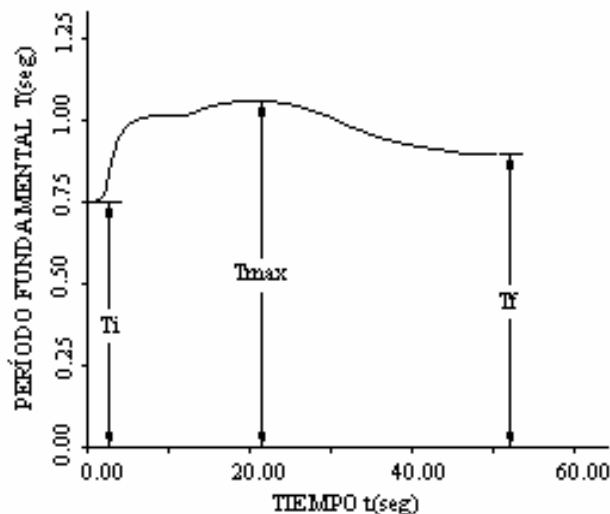


Fig. 5.1. Evolución del período fundamental de vibración

Estas metodologías basadas en parámetros vibratoriales se fundamentan en reconocer el cambio de las propiedades dinámicas de las edificaciones durante y después de la ocurrencia de un sismo, lo cual puede servir de base para estimar el nivel de daño asociado. Aunque existen pocas referencias que correlacionen el nivel de daño con la modificación de estas propiedades dinámicas, la metodología es sumamente atractiva por su facilidad de implementación, donde se exige la identificación a través de mediciones de vibraciones de las propiedades dinámicas antes y después de un sismo. Ello implica el desarrollo de un programa sostenido de mediciones en edificaciones, que permita crear una

base de datos de las condiciones actuales de cada edificación y que servirá entre otras cosas para calibrar los modelos analíticos empleados. Una importante recopilación de resultados reportados en la bibliografía, que correlacionan la variación de los períodos fundamentales de vibración de edificaciones antes, durante y después de un sismo, con el tipo de respuesta experimentado y el estado general de daños es presentada por Miranda (1991).

5.4. CUANTIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA

A continuación se describen algunas estrategias comúnmente utilizadas para la cuantificación de la vulnerabilidad sísmica de estructuras. En particular, se destacan como técnicas relativas para la cuantificación de la vulnerabilidad sísmica las basadas en la definición de *clases de vulnerabilidad* e *índices de vulnerabilidad*. Entre las técnicas absolutas para la cuantificación de la vulnerabilidad sísmica se destacan las basadas en la definición de *matrices de probabilidad de daño*, *funciones de vulnerabilidad* y *curvas de fragilidad*. Los términos relativos y absolutos se refieren a que los primeros no permiten de manera directa estimar los daños esperados para un nivel de acción determinada, sino que permiten calificar de manera relativa la mayor o menor predisposición de una estructura a sufrir daño, mientras que los segundos conducen a relaciones explícitas que permiten estimar de manera directa los daños físicos esperados para los diferentes niveles de la acción sísmica.

5.4.1. Clases de vulnerabilidad

Una práctica muy corriente consiste en clasificar las construcciones en grupos de vulnerabilidad similar o clases de vulnerabilidad. Esta tendencia se fundamenta en la experiencia sobre el desempeño sísmico que han tenido edificaciones con características similares. Se basan en datos empíricos de daños causados por terremotos sobre las construcciones y utilizan la capacidad técnica de profesionales de la construcción o expertos para relacionar las características de la estructura con el comportamiento observado en estructuras similares que se han visto sometidas a acciones sísmicas en terremotos destructivos anteriores (Vidal et al., 1996). Permite calificar de manera relativa la mayor o menor predisposición de una estructura o grupo a sufrir daños debido a la acción sísmica. Existen diversos esquemas de clasificación propuestos por diferentes autores entre los que destacan la clasificaciones propuestas por el ATC-13 (1985) y la escala EMS (Grünthal, 1993, 1998).

La propuesta del ATC (ATC-13, 1985) para la evaluación de las pérdidas por sismos, clasifica en diversos tipos o clases de vulnerabilidad las edificaciones comúnmente empleadas en California, definidos sobre la base de la opinión de expertos y en función de los materiales empleados en la construcción, el sistema estructural o resistente a sismos, la altura de la edificación y el nivel de diseño sísmico que está directamente relacionado con la ductilidad de la estructura.

La propuesta del EMS-92 (Grünthal, 1993) clasifica los tipos de estructuras en seis clases de vulnerabilidad que van desde la A (la de mayor vulnerabilidad) hasta la F (la de menor vulnerabilidad) descritas en la Tabla 5.7., en función de los materiales empleados en la construcción y el nivel de diseño sísmico. Esta clasificación representa una evolución de la primitiva y simple escala de intensidad MSK que clasifica los edificios en tres grandes tipologías A,B y C.

En su última versión, la EMS-98 (Grünthal, 1998) mantiene la definición de las seis clases de vulnerabilidad y modifica la definición de las tipologías estructurales incorporando las estructuras metálicas y discriminando el sistema resistente de las estructuras de hormigón armado entre pórticos y muros. (Tabla 5.8.)

Tabla 5.7. Clasificación de los tipos de estructuras según su clase de vulnerabilidad. EMS-92 (Grünthal, 1993)

	Tipo de estructura	Clase de Vulnerabilidad					
		A	B	C	D	E	F
Mampostería	Piedra cruda, sin tallar	⊕					
	Adobe (ladrillo de tierra)	⊕	⊖				
	Piedra tallada	⊖	⊕				
	Sillería		⊗	⊕	⊖		
	Ladrillo no reforzado / bloque hormigón	⊖	⊕	⊖			
	Ladrillo no reforzado c/ forjado de HA		⊗	⊕			
	Ladrillo reforzado / Mampost. Confinada			⊖	⊕	⊗	⊖
Hormigón Armado (HA)	Sin Diseño AntiSísmico (DAS)	⊖	⊗	⊕	⊗		
	Con mínimo nivel de DAS		⊖	⊗	⊕		
	Con moderado nivel de DAS			⊖	⊗	⊕	
	Con alto nivel de DAS					⊗	⊕
Madera	Estructuras de madera		⊖	⊗	⊕	⊗	⊗

⊕ = la más probable ⊗ = probable ⊖ = poco probable, casos excepcionales

Tabla 5.8. Clasificación de los tipos de estructuras según su clase de vulnerabilidad. EMS-98 (Grünthal, 1998)

	Tipo de estructura	Clase de Vulnerabilidad					
		A	B	C	D	E	F
Mampostería	Piedra cruda, sin tallar	⊕					
	Adobe (ladrillo de tierra)	⊕	⊗				
	Piedra tallada	⊖	⊕				
	Sillería		⊗	⊕	⊖		
	no reforzado c/ bloque hormigón	⊖	⊕	⊖			
	no reforzado c/ forjado de HA		⊗	⊕	⊖		
	Reforzado / confinada			⊖	⊕	⊗	
Hormigón Armado (HA)	Pórtico sin Diseño AntiSísmico (DAS)	⊖	⊗	⊕	⊗		
	Pórtico con moderado nivel de DAS		⊖	⊗	⊕	⊗	
	Pórtico con alto nivel de DAS			⊖	⊗	⊕	⊗
	Muros sin Diseño AntiSísmico (DAS)		⊖	⊕	⊗		
	Muros con moderado nivel de DAS			⊖	⊕	⊗	
	Muros con alto nivel de DAS				⊖	⊕	⊗
Metálica	Estructura Metálica			⊖	⊗	⊕	⊗
Madera	Estructuras de madera		⊖	⊗	⊕	⊗	

⊕ = la más probable ⊗ = probable ⊖ = poco probable, casos excepcionales

5.4.2. Índices de vulnerabilidad

Los *índices de vulnerabilidad* constituyen parámetros relativos que permiten cuantificar la susceptibilidad de una edificación de sufrir daños. Su empleo de manera directa permite comparar diferentes edificaciones de una misma tipología, donde se consideren los mismos factores en la evaluación. A través de las funciones de vulnerabilidad pueden ser correlacionados con los niveles de daño obtenidos o esperados para un sismo dado y empleados indirectamente para describir el daño. Estos índices proporcionan una medida relativa de la vulnerabilidad sísmica de una tipología de edificaciones de una región y son muy limitados para comparar diferentes tipos de edificaciones (p.ej., mampostería vs. hormigón armado) debido a los diferentes factores considerados en la evaluación.

Basados en la inspección de los principales componentes de una edificación, tanto estructurales como no estructurales y basado en la identificación y caracterización de deficiencias sísmicas potenciales, esta metodología pretende calificar las características de diseño sismorresistente y la calidad de la construcción, mediante un coeficiente llamado *índice de vulnerabilidad*, obtenido a través de la valoración de parámetros estructurales preestablecidos por expertos. Puede ser aplicado tanto a edificaciones individuales como a escala urbana. Ha sido desarrollado tanto para el estudio de edificaciones de mampostería no reforzada como de hormigón armado, sin embargo, los mayores esfuerzos han sido dedicados al estudio de los primeros, pues sus principales aporte provienen de Europa donde predomina este tipo de edificaciones. Por sus características, los métodos que conducen a un índice de vulnerabilidad pueden calificarse como subjetivos, ya que la calificación de las edificaciones se hace mediante la observación de sus características físicas y en algunos casos, apoyándose en cálculos estructurales simplificados.

Entre los llamados métodos del índice de vulnerabilidad, destaca el utilizado por el Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (GNDT, 1990) para la evaluación del riesgo sísmico en edificios⁴, que cuenta con un importante soporte de datos observados sobre daños sísmicos en edificios durante los recientes terremotos ocurridos en Italia. El método permite además de la evaluación del índice de vulnerabilidad, evaluar los daños por sismo. Para la evaluación del índice de vulnerabilidad, el método propone un total de 11 parámetros cuya influencia sobre el daño sísmico es determinante. Estos parámetros dependen del tipo de edificación, así por ejemplo, para edificios de mampostería no reforzada, cada parámetro se califica en una escala de A hasta D, mientras que para edificios de hormigón armado, cada parámetro se califica en una escala de A hasta C, organizados en forma decreciente, conforme la calidad del parámetro decrezca. Según la calificación asignada, cada parámetro cuenta con un valor K_i y un coeficiente de ponderación W_i que responde a la importancia del parámetro de acuerdo a la calificación de expertos. El índice de vulnerabilidad obtenido frecuentemente es normalizado a valores entre 0 y 100. Representa una medida del grado de vulnerabilidad de la edificación que puede ser correlacionado con otros indicadores como el índice de daño o el grado de daño obtenidos como consecuencia de un sismo determinado.

⁴ Referido comúnmente como el *método italiano* para la evaluación del índice de vulnerabilidad

5.4.3. Matrices de probabilidad de daño – MPD

Las *matrices de probabilidad de daño* expresan en forma discreta, la probabilidad condicional de obtener un determinado nivel de daño, para cada tipo de estructura sujeta a un sismo con un determinado nivel de severidad (Braga et al., 1986). Para la representación de la severidad del movimiento, generalmente emplean parámetros de práctica interpretación como la intensidad macrosísmica o la aceleración pico del terreno. Para representar el daño, generalmente emplean alguna escala de los estados o grados de daños. Su determinación se hace a través del procesamiento de los resultados de levantamiento de daños después de terremotos o bien, del procesamiento de la opinión de expertos sobre la materia, para cada uno de los grupos de edificaciones clasificados de acuerdo con las clases de vulnerabilidad predefinidas.

Entre los principales aportes destacan las MPD propuestas por el ATC (ATC-13, 1985), fundamentadas en la experiencia y juicio de reconocidos expertos, con un total de 91 tipos de instalaciones, que cubren un amplia variedad de configuraciones estructurales de edificaciones, puentes, presas, túneles, torres, etc. La severidad del movimiento se describe a través de la Intensidad de Mercalli Modificada (MM) para los grados comprendidos entre VI y XII. El daño se discrimina en 7 estados discretos asociados a un factor central de daño que se corresponde con diferentes estados de daño predefinidos. La Tabla 5.9., reproduce a título de ejemplo, la forma general de la MPD para la instalación clasificada como tipo 89, correspondiente a una edificación alta, de hormigón armado, a base de pórticos, sin capacidad dúctil (sin consideraciones especiales sísmicas)

Tabla 5.9. Forma general de las MPD propuesta por ATC-13(1985)

Estado de Daño	Rango Factor Daño (%)	Factor Centra Daño(%)	Probabilidad de daño en porcentaje Para c/IMM y estado de daño							
			VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
1-Sin Daño	0	0.0	0.1							
2-Mínimo	0 – 1	0.5	27.0	2.2						
3-Ligero	1- 10	5.0	72.9	89.3	32.2	3.0				
4-Moderado	10 – 30	20.0		8.5	66.9	68.1	19.9	3.9	0.1	
5-Pesado	30 – 60	45.0			0.9	28.9	74.2	57.8	12.4	
6-Mayor	60 – 100	80.0					5.9	38.3	84.3	
7 Destrucción	100	100.0								3.2

De manera análoga, Braga et al. (1982, 1986) presenta un estimado de la vulnerabilidad estructural a través de MPD obtenidas a partir del procesamiento estadístico de una importante base de datos de edificios dañados durante los sismos de Irpinia y Abruzzo, que constituyen un importante soporte fundamentado en datos observados, aunque limitados a la tipología constructiva de esas regiones. En este caso, se presentan las MPD para tres clases de vulnerabilidad decreciente (A, B, C) representativas de un total de 13 tipologías predefinidas, donde la severidad del movimiento está expresada a través de la escala de intensidad macrosísmica MSK en un rango entre V y XI y el daño se expresa en 6 niveles o estados de daño que van desde 0 (sin daño) hasta 5 (colapso total).

Sobre la base de estos resultados, Chávez (1998) presenta una propuesta de MPD en correspondencia con las definiciones de clases de vulnerabilidad, grados de intensidad macrosísmica y estados de daño propuestos por EMS-92 (Grünthal, 1993). En particular,

las MPD se desarrollan para las clases de vulnerabilidad decreciente (A, B, C, D) representativas de un total de 18 tipologías predefinidas. La severidad del movimiento se representa a través de la escala de intensidad macrosísmica EMS en un rango entre V y X con intervalos de medio grado y la clasificación del daño, según 6 grados que van desde el Grado 0 (sin daño) hasta el Grado 5 (destrucción). La Tabla 5.10., reproduce a título de ejemplo, la MPD propuesta para la clase de vulnerabilidad B (Chávez, 1998; Chávez et al., 1998).

Tabla 5.10. Forma General MPD para estructura con clase de vulnerabilidad B

<i>Intensidad EMS</i>	<i>Grado de Daño (%)</i>					
	GD0	GD1	GD2	GD3	GD4	GD5
V	67,00	27,90	4,70	0,40	0,00	0,00
V-VI	55,55	33,55	9,35	1,45	0,10	0,00
VI	44,10	39,20	14,00	2,50	0,20	0,00
VI-VII	32,50	38,80	21,10	6,40	1,10	0,10
VII	20,90	38,40	28,30	10,40	1,90	0,10
VII-VIII	14,50	32,30	31,40	16,50	4,70	0,60
VIII	8,00	26,30	34,60	22,70	7,40	1,00
VIII-IX	4,50	16,90	28,70	28,60	16,80	4,50
IX	1,00	7,50	22,70	34,60	26,20	8,00
IX-X	0,50	4,00	13,60	26,80	33,60	21,50
X	0,00	0,50	4,40	19,10	40,90	35,10

5.4.4. Funciones de vulnerabilidad

Las *funciones de vulnerabilidad* son relaciones gráficas o matemáticas que expresan en forma continua la relación media entre el daño y la intensidad del movimiento sísmico, por tipo de edificación. Estas relaciones pueden ser derivadas a partir del ajuste numérico de un conjunto de observaciones de daños para diferentes tipologías estructurales (vulnerabilidad observada) o generadas a través de un proceso de simulación numérica (vulnerabilidad calculada).

Una de sus principales variantes constituyen las funciones de vulnerabilidad expresadas en términos del índice de vulnerabilidad. En este formato, la calificación de la vulnerabilidad de la estructura se hace a través del índice de vulnerabilidad, de manera que los niveles de daño esperados para un sismo determinado pueden ser correlacionados a través de las funciones de vulnerabilidad. Destacan en este sentido, las funciones propuestas por Angeletti et al. (1988) y las funciones de vulnerabilidad observadas obtenida a partir del levantamiento de daños en estructuras en la región de Almería, España, correspondiente a la intensidad VII MSK, que ha servido de base para calibrar las funciones de vulnerabilidad calculada deducidas para otras intensidades usando técnicas de simulación (EC-SERGISAI, 1998; Yépez, 1996).

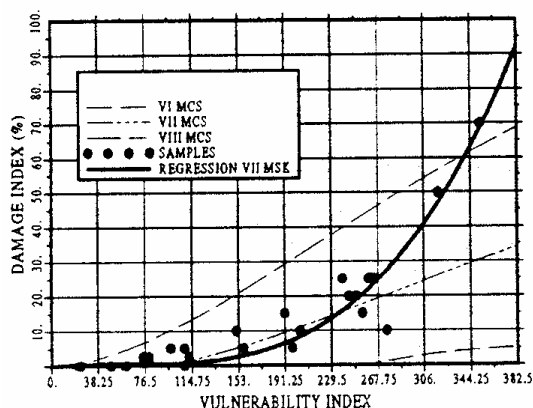


Fig. 5.2.a. Funciones de vulnerabilidad observadas en España para I=VII MSK. Líneas discontinuas representan las funciones de Angeletti et al. (1988)

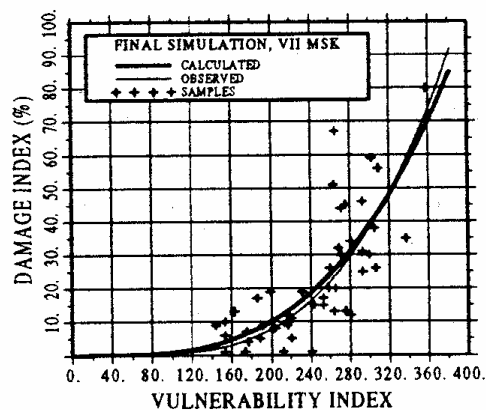


Fig. 5.2.b. Comparación de las funciones de vulnerabilidad observada y calculada para I=VII MSK. (Tomadas de EC-SERGISAI, 1998)

5.4.5. Curvas de fragilidad

Las *curvas de fragilidad* representan la probabilidad de excedencia de un estado límite de daño como una función de un parámetro representativo de la severidad del movimiento o asociado a la respuesta estructural (DiPasquale y Cakmak, 1989).

Al igual que las funciones de vulnerabilidad, las *curvas de fragilidad* representan relaciones movimiento-daño para diferentes tipos de edificaciones. Estas relaciones pueden derivarse a partir de la información discreta asociada a los parámetros que sirven para caracterizar el movimiento y el daño. Generalmente se expresan como la probabilidad acumulada de alcanzar o superar un determinado estado de daño, para una tipología de edificación dada, sujeta a diferentes niveles de severidad del movimiento sísmico. De manera que a diferencia de las funciones de vulnerabilidad, estas curvas describen de manera continua la probabilidad de excedencia de los estados límites de daño convencionalmente adoptados.

Destaca en este sentido el estudio de fragilidad de edificios desarrollado conjuntamente por NCEER-ATC (Anagnos et al., 1995), donde se proponen curvas de fragilidad basadas en la información de las MPD del ATC-13 (1985) para 40 tipologías de edificaciones, cuya descripción fue clarificada y ampliada. En este caso, los resultados de las opiniones de expertos fueron ajustados a través de regresiones numéricas y asociadas a seis estados de daños, designados por un factor de daño central o medio.

Utilizando como base las MPD, es posible construir las curvas de fragilidad asociadas. La Fig. 5.3. representa la curva de fragilidad asociada a los valores reportados en la Tabla 5.10., para una estructura tipificada con la clase de vulnerabilidad B, según la propuesta de Chávez (1998).

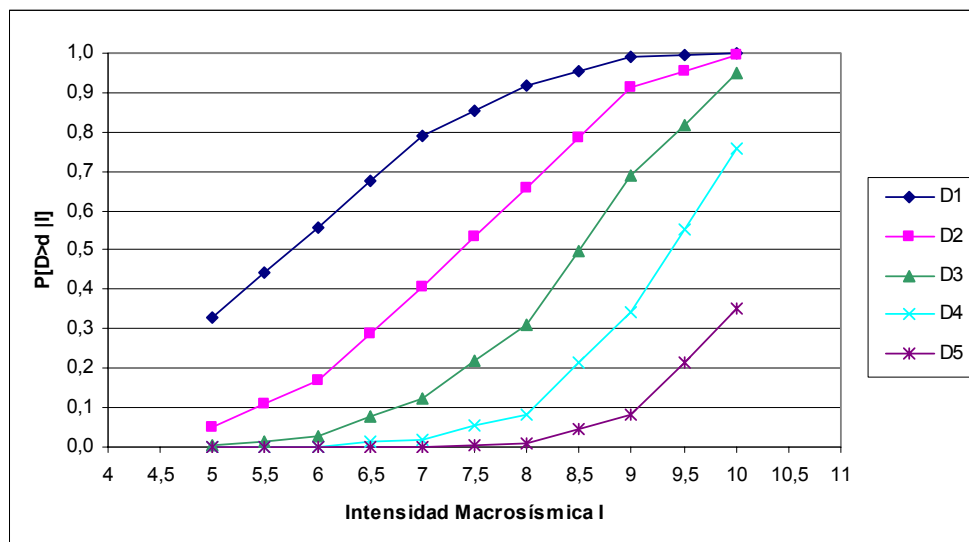


Fig. 5.3. Curva de fragilidad asociada a la MPD para estructura con clase de vulnerabilidad B, según Chávez (1998)

5.5. RESUMEN Y DISCUSION

La evaluación de la vulnerabilidad sísmica de una estructura constituye una de las fases más importantes de un estudio de riesgo sísmico. Es una propiedad intrínseca de la estructura que sintetiza su capacidad de respuesta ante la demanda impuesta por un evento sísmico.

Existen una variedad de metodologías y técnicas propuestas para su evaluación que pretenden establecer una medida de los daños probables inducidos sobre la estructura y sus usuarios por las diferentes intensidades del movimiento sísmico, los cuales dependiendo de la naturaleza y objetivo del estudio, información disponible, características del elemento, resultado esperado y destinatario de la información, hacen énfasis en los daños sísmicos sobre componentes estructurales, no estructurales y funcionales. Estas metodologías han sido clasificadas por varios autores de acuerdo a diferentes criterios, sin embargo la clasificación adoptada en el presente estudio las agrupa en tres tipos; métodos empíricos, métodos analíticos y métodos experimentales, destacando la conveniencia de combinarlas como una manera de incrementar la confiabilidad de un estudio de vulnerabilidad sísmica.

Su caracterización se describe a través de una ley causa-efecto, donde la causa es el sismo y el efecto es el daño, que suele formularse discretamente mediante matrices o de manera continua a través de funciones o curvas, que tienen un validez local, asociada a los aspectos constructivos y culturales de cada región. Implica una comparación entre la capacidad y la demanda donde se reconozca el carácter no lineal de la respuesta sísmica.

El resultado de un estudio de vulnerabilidad está condicionado a la manera concreta como se haga la descripción de la acción sísmica y del daño sísmico, quienes destacan como los elementos fundamentales para la caracterización de la vulnerabilidad sísmica.

Para caracterizar la acción sísmica, generalmente se emplean parámetros simples como la intensidad macrosísmica, la aceleración del terreno y en ocasiones el espectro de respuesta. Debe reconocerse que el conocimiento de la acción sísmica es pobre,

particularmente en zonas de sismicidad moderada o baja y en zonas con grandes sismos pero con grandes períodos de recurrencia, por lo que conviene contar con metodologías que permitan estimar daños a partir de parámetros de la acción sencillos (intensidad, aceleración pico, etc.) y progresivamente desarrollar métodos que tengan en cuenta una estima más realista de la acción, tipo parámetros espectrales, acelerogramas reales o artificiales, que tengan en cuenta el contenido frecuencia y la duración del evento, entre otros.

Para caracterizar el daño sísmico, generalmente se recurre a escalas o grados de daño, indicadores o índices de daño, entre otros. La cuantificación de manera objetiva del grado de degradación de una estructura y específicamente del daño físico directo que sufre como consecuencia de la acción sísmica exige la implementación de métodos simplificados como los indicados, que asimilan un determinado porcentaje de degradación con un estado de daño cualitativo.

Sobre la base de estos elementos fundamentales es posible la cuantificación de la vulnerabilidad sísmica en términos relativos a través la definición de clases o tipos de vulnerabilidad, índices de vulnerabilidad o bien, en términos absolutos a través de las matrices de probabilidad de daño, funciones de vulnerabilidad y curvas de vulnerabilidad. Los primeros permiten calificar de manera relativa la mayor o menor predisposición de una estructura a sufrir daño de acuerdo con la capacidad resistente de la estructura, mientras que los segundos conducen a relaciones que permiten estimar de manera directa los daños físicos esperados para los diferentes niveles de la acción sísmica, estableciendo de manera explícita el nexo entre la acción sísmica y el nivel de daño físico directo, en función de la capacidad resistente del elemento expuesto.

Esta amplia gama de posibilidades pone de manifiesto la complejidad asociada al problema de la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de estructuras, dando cabida a diferentes iniciativas orientadas a definir estas relaciones causa-efecto. Sin embargo, un aspecto grave es la falta de homogeneidad de las variables empleadas por las diferentes metodologías para cuantificar la vulnerabilidad sísmica de una edificación que complica su comparación directa. Esta heterogeneidad pone de manifiesto la necesidad de intentar crear una plataforma homologada que permita comparar, al menos cualitativamente, estos resultados.

La evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones esenciales exige un tratamiento especial, dadas las características intrínsecas a su uso, ocupación, función y equipamiento, orientado a cuantificar los daños probables inducidos por un sismo sobre las instalaciones y su funcionamiento, teniendo presente sobre todo que el resultado de esta evaluación interesa tanto a las autoridades públicas como a los organismos de protección civil y seguridad social.