

Capítulo 2

Vulnerabilidad y daño sísmicos: concepto y evaluación

2.1 Introducción

La vulnerabilidad sísmica de una estructura, grupo de estructuras o de una zona urbana completa, se define como su predisposición intrínseca a sufrir daño ante la ocurrencia de un movimiento sísmico y está asociada directamente con sus características físicas y estructurales de diseño (Barbat, 1998).

El concepto de vulnerabilidad sísmica es indispensable en estudios sobre riesgo sísmico y para la mitigación de desastres por terremotos. Se entiende por riesgo sísmico, el grado de pérdidas esperadas que sufren las estructuras durante el lapso de tiempo que permanecen expuestas a la acción sísmica. A dicho lapso de tiempo se le denomina período de exposición o período de vida útil de la estructura. Por otra parte, la mitigación de los desastres, en el ámbito de la ingeniería, corresponde a la totalidad de las acciones que tienen como objetivo la mejora del comportamiento sísmico de los edificios de una zona, a fin de reducir los costes de los daños esperados durante el terremoto (Barbat, 1998). Así, es evidente que para mitigar el riesgo sísmico de una zona, es necesario disminuir la amenaza, la vulnerabilidad y el costo de reparación de las estructuras afectadas. El conocimiento adecuado de la amenaza sísmica existente, permite definir tanto la acción que debe considerarse en el diseño de nuevas estructuras como el sitio donde pueden ser construidas, de tal forma que las condiciones de los emplazamientos sean óptimas, esto es: alejados de las fallas, evitando los rellenos, los lugares con posibles asentamientos o deslizamientos y los de alto potencial de licuefacción. Sin embargo, poco puede hacerse para reducir la amenaza a la que están expuestas las estructuras existentes, por lo tanto, si se desea disminuir el riesgo, se requiere una intervención directa sobre la vulnerabilidad. El conocimiento del comportamiento sísmico de las estructuras, permite definir los mecanismos y acciones de refuerzo requeridos para la reducción de los efectos provocados por los movimientos del terreno. Para el caso de construcciones nuevas,

pueden plantearse nuevos sistemas constructivos y/o nuevas filosofías de diseño que garanticen el buen desempeño de cada uno de los elementos expuestos.

En la actualidad, los análisis de la vulnerabilidad sísmica de las diferentes estructuras existentes en nuestro medio, esto es: edificios, componentes de líneas vitales, estructuras esenciales y centrales nucleares entre otras, se encuentran en un nivel avanzado debido al trabajo realizado por investigadores y técnicos en los últimos 20 años (Dolce et al., 1994). De igual forma, se ha desarrollado un gran número de propuestas para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica a diferentes niveles de detalle, y se han hecho numerosas aplicaciones en varias regiones del mundo, tales como las realizadas por Gunturi (1992), Kawamura et al. (1992), Petrovski et al. (1992), Kappos et al. (1992), Hwang y Huo (1994), Singhal y Kiremidjian (1995), Hurtado (1999) y Dumova (2000), entre otros. No obstante, en países en vías de desarrollo y en países con un bajo control en el diseño sismorresistente, poco se ha hecho para reducir la vulnerabilidad sísmica de las estructuras existentes, con lo cual, ante movimientos de intensidad moderada y alta, el número de pérdidas de vidas humanas y la magnitud de los daños físicos, sociales y económicos, han originado verdaderas catástrofes sísmicas, como las ocurridas recientemente en Turquía (1 de Mayo de 2003) y en Argelia (21 de Mayo de 2003).

La aplicación de los estudios de vulnerabilidad en entornos urbanos, debe considerar tanto los aspectos estructurales como los funcionales, operativos y urbanos, para que puedan proporcionar información útil para la prevención de desastres, la planificación y la ordenación del territorio. En este sentido, constituyen un importante punto de partida para la toma de decisiones relacionadas con la rehabilitación o demolición de edificios peligrosos, la ubicación de hospitales y puestos de socorro en una determinada zona o por ejemplo, el diseño de las vías alternativas de evacuación y rápido acceso de las ayudas hacia las zonas más vulnerables.

El primer paso de un estudio de vulnerabilidad consiste en definir su naturaleza y alcance, lo cual está condicionado por varios factores, tales como: el tipo de daño que se pretende evaluar, el nivel de amenaza existente en la zona, la información disponible sobre las estructuras y los datos relacionados con los daños observados durante sismos que han afectado la zona de interés. Una vez definidos estos factores, es posible evaluar la vulnerabilidad mediante una definición adecuada de la acción sísmica y la capacidad de la estructura.

En éste capítulo se presentan las metodologías más importantes para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica y se describen los principales aspectos relacionados con el daño sísmico y los correspondientes índices de daño que permiten cuantificar de manera local y/o global, el daño en estructuras de hormigón armado.

2.2 Metodologías para el análisis de vulnerabilidad sísmica

Para clasificar las diferentes metodologías de evaluación de la vulnerabilidad sísmica, varios criterios han sido utilizados en el pasado. En este trabajo se presentan dos de las propuestas más importantes que se han hecho hasta el momento. La primera de ellas corresponde a clasificación propuesta por Corsanego y Petrini (1990), donde los diferentes tipos de estudios se dividen en clases, de acuerdo al tipo de resultado que producen. Estas clases son definidas de acuerdo a las características de las aproximaciones adoptadas con más frecuencia. De esta forma, pueden derivarse otras reglas de clasificación considerando otros aspectos, por lo cual, este tipo de clasificaciones no son generales ni exhaustivas. Para superar esta limitación, Dolce et al. (1995) proponen una clasificación que permite examinar, de forma independiente, los tres elementos básicos (los datos de entrada, la metodología y los resultados) involucrados en un análisis de vulnerabilidad. Por lo tanto, es posible que cada investigador o grupo de trabajo evalúe separadamente cada uno de estos elementos, considerando su consistencia y/o haciendo énfasis en alguno de ellos.

2.2.1 Clasificación de acuerdo al tipo de resultado

Esta clasificación fue propuesta por Corsanego y Petrini (1990) y es una de las más reconocidas y completas que se han hecho hasta el momento. Las técnicas para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica se agrupan en 4 grandes grupos: técnicas directas, indirectas, convencionales e híbridas. A continuación se explican cada una de ellas.

Técnicas directas

Estas técnicas predicen, con un solo paso, el daño causado por un sismo a una estructura, a partir de dos tipos de métodos: los tipológicos y los mecánicos.

Métodos tipológicos: Consideran las estructuras como elementos de clases, las cuales están definidas por los materiales, las técnicas y otros factores que pueden afectar la respuesta sísmica. La vulnerabilidad se define como la probabilidad que una estructura de un cierto tipo, sufra un nivel de daño para una intensidad sísmica dada. La evaluación de la probabilidad de daño se basa en los daños observados en sismos pasados.

Estas técnicas requieren una investigación de campo bastante simple, no obstante, los resultados sólo son válidos en un sentido estadístico. Claramente, la definición de las relaciones entre daño e intensidad sísmica utilizando esta metodología, requieren de una cantidad substancial de datos y es válida tan sólo para la región o ciudad analizada o para poblaciones con construcciones similares. Su

principal limitación es que no permite tener en cuenta las modificaciones que han sufrido las estructuras a lo largo de su vida útil, como por ejemplo reparaciones.

Estado daño	Daño estructural	Daño no estructural	Relación de daño	Intensidad del sismo				
				V	VI	VII	VIII	IX
0	Ninguno	Ninguno	0 - 0.05	...	...	...	...	...
1	Ninguno	Menor	0.05 - 0.3	...	...	...	...	...
2	Ninguno	Puntuales	0.3 - 1.25	...	...	...	...	...
3	No apreciable	Distribuidos	1.25 - 3.5	...	...	...	...	...
4	Menor	Substanciales	3.5 - 4.5	...	...	...	...	...
5	Substancial	Severo	7.5 - 20	...	...	...	...	...
6	Mayor	Casi total	20 - 65	...	...	...	...	...
7	Construcción en ruinas		100	...	...	...	...	...
8	Colapso		100	...	...	...	...	...

Tabla 2.1. Formato de la matriz de probabilidad de daño para una tipología dada.

Una de las primeras aplicaciones de este tipo de métodos fue el trabajo realizado por Whitman et al. (1974). A partir de un levantamiento de daños causados por el sismo de San Fernando, el 9 de Febrero de 1971, cubriendo aproximadamente 1600 construcciones de 5 o más niveles, se generaron matrices de probabilidad de daño para cada tipo de construcción. La forma general de estas matrices se muestra en la Tabla 2.1 (Whitman et al., 1974). Cada número en la matriz (indicado por ...) expresa la probabilidad que una construcción de una determinada clase, experimente un nivel de daño por causa de una intensidad sísmica dada. La relación de daño se define como la relación entre el costo de reparación y el costo de reposición. Este formato ha llegado a ser el más utilizado para definir la distribución probable del daño. No obstante, el número de estados de daño considerados generalmente varía entre cuatro y seis, con una tendencia a no utilizar demasiados estados ya que es difícil distinguirlos.

Métodos mecánicos: Hacen la predicción de un efecto sísmico por medio de modelos mecánicos adecuados de las construcciones. Dentro de estos métodos pueden distinguirse dos grupos que están relacionados con el tipo de modelo utilizado para representar la estructura.

1. **Métodos analíticos basados en modelos simples:** estos métodos deben tener la capacidad de analizar un gran número de construcciones en un período de tiempo corto. Esto conduce a métodos analíticos que involucran modelos simples, que sólo requieren unos pocos parámetros de entrada, mediante los cuales es posible evaluar el comportamiento sísmico de las construcciones. Se trata por tanto de encontrar un método simple, que consuma poco tiempo de análisis y que sea adecuado para la elaboración eficiente de escenarios sísmicos.

Un método con estas características fue desarrollado para la estimación de pérdidas debidas a sismos en los centros históricos de las ciudades de Europa para estructuras de mampostería y aplicado a un caso de estudio en el distrito de la Alfama en Lisboa (D'Ayala et al., 1997). La metodología se basa en la identificación de mecanismos de colapso que permiten determinar la capacidad de cortante equivalente, expresada como la aceleración crítica causada por el correspondiente mecanismo de colapso. Para calcular la aceleración crítica sólo se requiere la geometría y las condiciones de frontera obtenidas a partir de estimaciones visuales. La mampostería se modela como un material perfectamente plástico y rígido. Se supone además, que el plano más vulnerable del edificio corresponde a la fachada. El método considera los mecanismos de colapso fuera y dentro del plano. Cada uno de estos mecanismos se asocia con un grado de daño de acuerdo a la Escala Macrosísmica Europea (EMS 98). Así, calculando el cortante equivalente del edificio, es decir, la aceleración crítica que inicia el mecanismo de colapso, se obtiene, inmediatamente, el grado de daño esperado.

Otro método analítico que utiliza modelos simples fue desarrollado por Calvi (1999) y aplicado a la ciudad de Catania (Calvi, 1999). El método se guía por los conceptos para análisis detallado de construcciones existentes basado en la asignación de la capacidad de desplazamiento de un edificio correspondiente a varios estados límite y en la demanda de desplazamiento resultante de un espectro de desplazamiento. El modelo utiliza muy pocos parámetros: el período de la construcción, el número de niveles y el tipo de material. Se consideran cuatro estados de daño: LS1 o no daño, LS2 o con daños estructurales leves y daños no estructurales moderados, LS3 corresponde a daños estructurales significativos y daños no estructurales severos y, finalmente, LS4 indica el colapso. Para cada tipo de estructura y cada estado de daño se define un modelo estructural, en términos de una rigidez secante en el punto de desplazamiento máximo y un factor de reducción de demanda de desplazamiento, que depende de la energía disipada por la estructura. La fiabilidad de estos dos parámetros, derivados a partir de un número muy reducido de datos es pequeña y, por lo tanto, se proporcionan intervalos, en vez de utilizar valores continuos. Los dos intervalos definen un rectángulo en el plano del espectro de desplazamiento y la probabilidad de ocurrencia de un cierto estado límite se obtiene integrando una función de densidad de probabilidad en el área bajo la línea del espectro de respuesta de desplazamiento (Calvi, 1999).

2. **Métodos de análisis detallados:** estos métodos sólo son aplicables a las construcciones que puedan ser representadas por modelos mecánicos y, generalmente, son utilizados para la evaluación de estructuras individuales, debido a que involucran análisis detallados y modelos más refinados que no son adecuados para proyectos de escenarios sísmicos, donde es necesario evaluar la

vulnerabilidad de un gran número de estructuras. Los dos procedimientos de análisis más utilizados en este tipo de métodos son: 1) el análisis lineal (estático y dinámico) y 2) el análisis no lineal (estático y dinámico).

- **Análisis estático lineal:** la estructura se modela como un sistema de 1 Grado De Libertad (1 GDL) con una rigidez elástica lineal y un amortiguamiento viscoso equivalente. La acción sísmica se modela mediante una distribución de fuerzas laterales equivalentes. A partir de la estimación de la primera frecuencia fundamental de la estructura usando relaciones empíricas o el método de Rayleigh, se determina, a partir del espectro de respuesta apropiado, la aceleración espectral S_a , la cual multiplicada por la masa m de la estructura, corresponde a la fuerza lateral equivalente o cortante basal V . Esta fuerza se distribuye a lo largo de toda la altura y se determinan, mediante un análisis estático lineal, las fuerzas y los desplazamientos internos de la estructura. Este tipo de procedimientos se utilizan principalmente para propósitos de diseño y se encuentran incorporados en la mayoría de los códigos. Su uso se limita a estructuras regulares donde el primer modo de vibración es el predominante.
- **Análisis estático no lineal:** en este tipo de análisis el modelo de la estructura incorpora directamente las características no lineales de la relación fuerza - deformación de los elementos y componentes individuales debidas a la respuesta inelástica del material, lo cual representa una ventaja sobre los métodos de análisis estático lineal. La representación más común para este análisis es la curva de capacidad o curva "pushover", la cual corresponde a la relación entre el cortante basal y el desplazamiento en el nivel superior de la estructura. Este tipo de análisis se describe con detalle en el capítulo 3.
- **Análisis dinámico lineal:** la estructura se modela como un sistema de Múltiples Grados De Libertad (MGDL) con una matriz de rigidez elástica lineal y una matriz de amortiguamiento viscoso equivalente. La acción sísmica se modela utilizando un análisis espectral modal o un análisis temporal. El análisis espectral modal supone que la respuesta dinámica de una estructura se puede determinar considerando de forma independiente, la respuesta de cada modo natural de vibración utilizando un espectro de respuesta elástico. Sólo se consideran los modos que contribuyen considerablemente a la respuesta de la estructura. Las respuestas modales se combinan usando métodos tales como "la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados". El análisis temporal involucra una evaluación paso a paso de la respuesta de la estructura, usando registros de sismos reales o acelerogramas sintéticos. En ambos casos, las fuerzas y los desplazamientos internos de la estructura se determinan mediante un análisis dinámico lineal.

- **Análisis dinámico no lineal:** en este tipo de análisis la estructura se modela de forma similar a la utilizada para el análisis estático no lineal. La principal diferencia es que la acción sísmica se modela con historias temporales de movimiento (acelerogramas reales o simulados). Éste es el procedimiento más sofisticado para predecir las fuerzas y los desplazamientos internos de una estructura cuando se ve sometida a una acción sísmica. Sin embargo, la respuesta calculada de la estructura puede ser muy sensible a las características propias de la acción, por lo que se recomienda utilizar varios registros de historias temporales de aceleración.

Técnicas indirectas

Estas técnicas, determinan en primer lugar, un índice de vulnerabilidad y luego establecen una relación entre el daño y la intensidad sísmica, mediante estudios post-terremoto y estudios estadísticos. En su concepción original, estos métodos son útiles únicamente para evaluaciones sísmicas de edificios a gran escala. Un ejemplo claro de esta técnica es el método del índice de vulnerabilidad, que comenzó a desarrollarse en Italia a partir de 1976, con motivo de los estudios post-terremoto realizados en ese país. El método consiste en hacer una clasificación de los edificios mediante la observación de sus características físicas, apoyándose en cálculos estructurales simplificados, intentando identificar los parámetros más relevantes que controlan el daño estructural. La clasificación se realiza mediante un coeficiente denominado **índice de vulnerabilidad**. Este índice se relaciona directamente con el grado de daño de la estructura mediante funciones de vulnerabilidad. El método utiliza bancos de datos de daños observados en edificios después de un sismo. Las funciones de vulnerabilidad permiten formular el índice para cada grado de intensidad macrosísmica de un terremoto (o de aceleración máxima) y evaluar de manera rápida y sencilla la vulnerabilidad sísmica de edificios, lo cual resulta muy útil para el desarrollo de estudios urbanos a gran escala (Yépez, 1996).

Recientemente, en la universidad de Génova se ha desarrollado, a partir del modelo implícitamente contenido en la escala EMS-98, una metodología para la evaluación global de la vulnerabilidad sísmica en grandes áreas urbanas, la cual utiliza la teoría de conjuntos difusos para superar la ambigüedad y ausencia de una información de daño específica. Este método define un índice de vulnerabilidad convencional V_I , el cual representa la pertenencia de una estructura a una clase de vulnerabilidad determinada. Los valores numéricos de V_I son arbitrarios, debido a que sólo se utilizan como indicadores para cuantificar de una forma convencional el comportamiento de una estructura. Por motivos de simplicidad y con el fin de normalizar los valores obtenidos de éste índice, se elige un rango de variación entre 0 para las estructuras diseñadas a partir de altos estándares sismorresistentes y 1 para las estructuras más vulnerables. Este índice tiene en cuenta factores tales como: la edad de la construcción, el número de niveles, las irregularidades en elevación,

etc. La función de distribución de probabilidad correspondiente a las curvas de fragilidad, se obtienen a partir de la distribución beta, caracterizada por el grado de daño medio μ_D . Este parámetro se calcula como función de la intensidad del movimiento I (EMS-98) y del índice de vulnerabilidad V_I . Esta metodología ha sido propuesta en el proyecto Europeo RISK-UE para evaluar la vulnerabilidad sísmica de 7 ciudades de Europa, caracterizadas por diferentes niveles de sismicidad, estas son: Barcelona (España), Bucarest (Rumania), Catania (Italia), Sofia (Bulgaria), Bitola (Yugoslavia), Thessaloniki (Grecia) y Niza (Francia). Los resultados obtenidos han sido implementados en sistemas de información geográfica para la generación de escenarios de riesgo sísmico.

Técnicas convencionales

Son esencialmente heurísticas e introducen un índice de vulnerabilidad independiente de la predicción del daño. Se utilizan para comparar las diferentes construcciones de una misma tipología en una determinada zona, de acuerdo con algunos factores cuya contribución a la resistencia sísmica es calibrada por expertos. Los índices dan una medida relativa de la vulnerabilidad, pero los resultados obtenidos son difíciles de comparar para diferentes tipos de construcciones, debido a las diferencias existentes entre los factores considerados. Existen básicamente dos grupos de métodos ; los primeros se basan en calificar empíricamente las diferentes características físicas de las estructuras; los segundos se basan en los mismos criterios utilizados en las normativas de diseño sismorresistente, evaluando la relación capacidad/demanda de los edificios de manera simplificada, como por ejemplo utilizando los cortantes basales distribuidos como fuerzas horizontales equivalentes o mediante un análisis modal.

El ATC-13 (ATC, 1985) es uno de los primeros trabajos que se han realizado utilizando esta técnica. En este informe, se derivan, a partir del juicio de expertos, las matrices de probabilidad de daño para 78 clases de estructuras diferentes, 40 de las cuales se refieren a edificios. La estimación del porcentaje esperado de daño que podría sufrir una determinada estructura ante una intensidad sísmica dada, se determinó mediante el análisis de las respuestas contenidas en los cuestionarios que fueron repartidos a los expertos. Los resultados obtenidos con esta técnica, pueden ser subjetivos, por lo cual, 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. Las matrices de probabilidad de daño obtenidas a partir del juicio de expertos son también difíciles de calibrar o modificar para incorporar nuevos datos o tecnologías. Adicionalmente, es difícil extender el ATC-13 a otros tipos de edificios y a otras regiones. Sin embargo, ésta fue la primera referencia para muchos estudios de vulnerabilidad sísmica hasta mediados de 1990.

Actualmente una de las metodologías más conocidas para el análisis de vul-

nerabilidad sísmica es la metodología HAZUS. Ésta utiliza los desplazamientos y aceleraciones espectrales como medida de la acción sísmica, en vez de la intensidad sísmica que se utiliza en el ATC-13. Al igual que este último, el daño de 36 modelos estructurales se estima a partir de la opinión de expertos. Para cada modelo, se describen los cuatro estados de daño estructural considerados: leve, moderado, severo y colapso. Los daños no estructurales se analizan a parte. La metodología considera cuatro niveles de diseño: alto, moderado, bajo y sin diseño sísmico. Para cada tipo de construcción y nivel de diseño, se dan los parámetros que permiten definir la capacidad de la estructura, las derivas máximas entre piso y finalmente los desplazamientos espectrales en los umbrales de los diferentes estados de daño considerados.

Otra clase de función de vulnerabilidad basada tanto en observaciones como en opiniones de expertos es el uso de la vulnerabilidad de las construcciones contemplada en las escalas macrosísmicas. Estas escalas utilizan el daño en la construcción y otros fenómenos para evaluar el desempeño de las estructuras de una región ante la ocurrencia de un movimiento sísmico. A partir de la descripción de los daños en la estructura para diferentes intensidades, es posible deducir funciones de vulnerabilidad. En Europa la escala más utilizada es la EMS-98.

2.2.2 Clasificación de acuerdo a los datos, método y resultados

Sobre la base de la clasificación propuesta por Corsanego y Petrini (1990), Dolce et al. (1995) sugieren un nuevo criterio de clasificación, en el cual se examinan separadamente los tres elementos fundamentales involucrados en un análisis de vulnerabilidad: los datos, el método empleado y los resultados obtenidos. Hasta el momento los autores de esta clasificación han reportado 5 clases de datos de entrada, 3 clases de métodos y 2 clases de resultados. A continuación se definen cada uno de los elementos involucrados.

Datos de entrada

Se consideran 5 tipos de datos de entrada:

1. Daños registrados después de un sismo u obtenidos a través de ensayos de laboratorio en elementos simples o compuestos (información empírica).
2. Características geométricas y cualitativas: para estructuras, suelen utilizarse la altura, la configuración en planta y elevación, la edad, el tipo de sistema resistente de cargas horizontales y verticales, el tipo de fundación y cubierta, etc. En sistemas de líneas vitales se consideran la longitud de las líneas, el gráfico de la red, los materiales adoptados para las líneas y las estaciones, entre otros.

3. Características mecánicas tales como; la masa, la rigidez, la resistencia comparada con los esfuerzos sísmicos, la ductilidad intrínseca, el estado de esfuerzos, los desplazamientos sísmicos y los parámetros del comportamiento no lineal.
4. Caracterización sísmica de la zona, como por ejemplo, la intensidad sísmica, la aceleración o la velocidad máxima del terreno , el desplazamiento espectral, entre otros.
5. Datos geológicos y geotécnicos de la zona, tales como el tipo y las características mecánicas del suelo de fundación, el comportamiento sísmico del perfil geológico, etc.

Métodos

Ésta clasificación considera tres tipos de métodos:

- (a) **Métodos estadísticos:** consisten en realizar un análisis estadístico de las estructuras cuyas características corresponden a los datos de entrada tipo 1 y 2 (eventualmente consideran los datos tipo 4 y 5). La vulnerabilidad se define como la probabilidad condicional que una estructura de cierto tipo sufra un nivel de daño para una intensidad sísmica dada. La evaluación de la distribución del daño se obtiene de la observación y cuantificación estadística de los daños ocasionados por sismos pasados. En la literatura, suelen referirse a estos métodos como **vulnerabilidad observada**. Las técnicas de investigación de campo requeridas por este método son bastante simples, no obstante, los resultados obtenidos sólo son aplicables a una muestra de la población, y no a una estructura en particular. Para recopilar la información de campo, suelen utilizarse distintos formularios que pueden variar dependiendo del personal a cargo.
- (b) **Métodos mecánicos o analíticos:** utilizan modelos mecánicos para predecir el daño de la estructura por medio de algún parámetro que represente el comportamiento de la construcción frente a un sismo, como puede ser la deriva máxima entre piso, la ductilidad, o un índice de daño. Estos métodos sólo se utilizan para estructuras que puedan ser representadas por modelos mecánicos.
- (c) **Métodos de juicio de expertos:** los expertos realizan una evaluación cualitativa y/o cuantitativa de los factores que gobiernan el comportamiento sísmico de las construcciones, de tal forma que puedan determinar el grado de exposición al que se encuentra sometido un grupo de estructuras.

Resultados

Hay dos clases de resultados:

1. **Vulnerabilidad absoluta:** funciones de vulnerabilidad, las cuales representan el daño medio como función de la intensidad sísmica, o alternativamente la distribución condicional de daño para una intensidad sísmica dada.
2. **Vulnerabilidad relativa:** índices de vulnerabilidad obtenidos empírica o experimentalmente para los cuales, no hay ni correlación con el daño, ni está definida la intensidad sísmica.

Clasificando de ésta forma las metodologías existentes, pueden realizarse diferentes tipos de análisis de vulnerabilidad combinando adecuadamente los tres elementos expuestos (los datos, el método y los resultados).

2.3 Daño sísmico

2.3.1 Introducción

El daño es el grado de degradación o destrucción causado por un fenómeno peligroso sobre las personas, los bienes, los sistemas de prestación de servicios y los sistemas naturales o sociales. Desde el punto de vista estructural, generalmente se relaciona con deformaciones irrecuperables (inelásticas), por lo tanto, cualquier variable de daño debe ser preferiblemente referida a una cierta cantidad de deformación.

La evaluación y la interpretación del daño causado por los sismos surge de la necesidad de cuantificar y explicar los efectos de este fenómeno sobre los diferentes tipos de estructuras existentes. Varias crónicas escritas en los siglos pasados, describen catástrofes sísmicas, incluyendo comentarios acerca de la influencia de la calidad de la construcción sobre el daño. Se puede encontrar información cualitativa bastante interesante en los archivos históricos que aún se conservan, en donde pueden apreciarse informes de daños pos-terremoto. Varias consideraciones sobre los patrones de daño recurrentes están contenidos en estos reportes editados por famosos sismólogos tales como Mercalli (Corsanego, 1995).

En las últimas décadas, se ha empezado a incluir la no linealidad de los materiales en el análisis y diseño sísmico, para lo cual, se dispone de información detallada sobre los fenómenos que se producen cuando se sobrepasa el límite elástico de los materiales. Así, mediante procedimientos de análisis y/o estudios experimentales, es posible evaluar, paso a paso, el comportamiento de un material. Estos resultados deben extrapolarse para representar el comportamiento global de la estructura. Para ello, existe en la actualidad, un amplio espectro de indicadores o índices de daño, que permiten cuantificar el daño local y global de la estructura. Sin embargo, a pesar del avance en el desarrollo de estos modelos de daño, hay que anotar que el problema

de evaluar cuantitativamente el daño es complejo y que aún no existe un criterio unificado, tanto para la definición de los modelos analíticos, como para la descripción del daño en sí, principalmente debido a la gran variedad de tipos estructurales y a sus propiedades, así como a las características de las acciones aplicadas.

2.3.2 Elementos propensos al daño

Para cuantificar el daño es importante identificar previamente los sistemas que se encuentran expuestos dentro de una estructura, estos se pueden agrupar en 4 grandes clases de elementos:

- Elementos estructurales: son los elementos que componen los sistemas resistentes de cargas verticales (gravitatorias) y cargas laterales.
- Elementos arquitectónicos: son otros elementos, tales como: muros divisorios, ventanales, revestimientos, etc. Generalmente son utilizados para la división, el aprovechamiento de espacios en las construcciones y aspectos relacionados con la estética de la estructura. En realidad, aunque su diseño, distribución y construcción no está intencionalmente relacionado con el sistema resistente de la estructura o edificio, como veremos más adelante, su interacción con el mismo es importante y no puede ser ignorada.
- Instalaciones: se trata de elementos que suministran servicios como por ejemplo; tuberías de agua, redes de electricidad y alcantarillado y conducciones de gas.
- Contenidos: son los elementos que están dentro del edificio pero no hacen parte de la estructura, tales como: maquinarias, equipos, mobiliario, artículos de decoración, etc.

Los últimos tres tipos corresponden a los llamados elementos no estructurales, cuya importancia ha cobrado especial interés como consecuencia de las pérdidas económicas registradas durante algunos eventos importantes, tales como el sismo de Loma Prieta (1989) y el sismo Northridge (1994). Para estos dos casos en particular, gran parte de las estructuras localizadas en las zonas afectadas diseñadas de acuerdo a normativas sismorresistentes modernas, se comportaron satisfactoriamente desde el punto de vista estructural, sin embargo, las cifras de pérdidas económicas causadas por estos terremotos fueron de 10 y 30 millones de dólares respectivamente (Benuska, 1990; Hall, 1994). Los informes sobre estas evaluaciones, reconocen que uno de los factores que incrementaron enormemente las pérdidas fue el daño en elementos no estructurales.

El estudio de la respuesta de los diferentes elementos de una estructura (estructurales o no estructurales) expuestos a la acción sísmica, ha permitido establecer

las principales variables o parámetros que condicionan el daño. De esta forma se ha identificado que los componentes estructurales son sensibles a la deriva entre piso, mientras que los componentes no estructurales pueden dividirse en dos grupos: 1) elementos sensibles a la deriva entre piso y 2) elementos sensibles a la aceleración. En la Tabla 2.2 puede verse la sensibilidad de algunos tipos de elementos no estructurales. Sin embargo, en este trabajo, sólo se analizan los daños en los elementos estructurales.

Tipo	Item	Sensible a la deriva	Sensible a la aceleración
Arquitectónico	Particiones	●	○
	Parapetos		●
	Paneles exteriores	●	○
	Ornamentos		●
Mecánico y Electrico	Mecanismos generales		●
	Sistemas de tuberías	○	●
	Elevadores	○	●
	Electricidad en general	○	●
Contenido	Archivadores		●
	Equipo de oficina		●
	Equipos informáticos		●
	Equipo no permanente		●
	Objetos de arte y de valor		●
Los puntos sólidos indican la primera causa de daño, mientras que los vacíos corresponden a la causa secundaria.			

Tabla 2.2. Ejemplos de componentes no estructurales y contenidos de estructuras.

2.3.3 Clasificación de los indicadores de daño

Diferentes esquemas para clasificar varios índices de daño propuestos en la literatura son discutidos por Kappos (1992). Al parecer, un esquema efectivo desde el punto de vista del análisis de vulnerabilidad, está relacionado con la parte de la estructura para la cual se describe el daño. De esta forma, se pueden distinguir tres clases: local, intermedio y global, dependiendo si ellos se refieren al daño en un elemento, en una parte de la estructura (tal como un nivel de la construcción) o en toda la estructura, respectivamente.

La determinación del daño intermedio y global supone una condensación de los daños locales por medio de "factores de ponderación o coeficientes de pesos promedios", los cuales están relacionados, como se verá más adelante en la sección 2.3.6, con aspectos estructurales y determinados criterios de importancia, respectivamente.

2.3.4 Representación del daño

En la literatura técnica es común encontrar diferentes tipos de representación del daño que dependen tanto del modelo utilizado como de la clase de estudio que se desea realizar. A continuación se describen las cuatro representaciones del daño más utilizadas:

- Representaciones mecánicas: implican la definición de un modelo teórico que permita describir el comportamiento del mecanismo estructural a través de los "índices de daño". Usualmente estos índices se expresan como función de ciertos parámetros Q_i , esto es:

$$I_D = I_D(Q_i) \quad (2.1)$$

Los parámetros de daño pueden dividirse en dos clases principales: (a) parámetros basados en el nivel alcanzado por la demanda de un cierto recurso (deformación, resistencia, disipación de energía, etc.) y (b) parámetros basados en la degradación experimentada por ciertas variables (rigidez, frecuencia fundamental, etc.).

Una de las funciones más empleadas de este tipo de representación del daño, en estructuras de hormigón armado, corresponde al índice propuesto por Park y Ang (1985). Este índice expresa el daño en función de la ductilidad de deformación y de la energía inelástica disipada.

- Representaciones físicas: son representaciones directas que no requieren de un modelo analítico pre-establecido. Se basan en los "estados discretos de daño", esto es, descripciones cualitativas del daño por medio de palabras de diagnóstico (menor, sustancial, moderado, entre otras). Su inconveniente, desde el punto de vista de la interpretación del daño, radica en la ambigüedad en la definición de los estados, conduciendo de esta forma a incertidumbres en las operaciones de campo a la hora de valorar los daños en una estructura mediante una simple palabra.
- Representaciones orientadas a pérdidas: requieren la definición de modelos de pérdidas que expresen el daño por medio de "relaciones de daño", las cuales cuantifican el valor relativo de una pérdida como la relación entre el costo de reparación y el costo de reposición. Igualmente, existen también relaciones de daño funcional, que expresan la degradación de alguna función en el sistema dañado. Estas representaciones son las que se utilizan con más frecuencia, debido a su relación con una especie de contexto socio-económico.
- Representaciones orientadas a reglas de deducción: se apoyan en la teoría de la inteligencia artificial para expresar el daño a través de un "estado de daño", definido en términos lingüísticos. Es una representación muy versátil,

pero por otro lado, es bastante compleja y su implementación requiere de chequeos sustanciales ante casos ensayados. Hasta el momento este tipo de representación ha sido restringida a análisis especializados o dirigidos hacia sistemas expertos.

2.3.5 Estados discretos de daño

Los estados discretos de daño representan una condición límite o tolerable establecida en función de tres aspectos fundamentales: 1) los daños físicos sobre los elementos estructurales y no estructurales, 2) el riesgo al que se encuentran expuestos los ocupantes de la edificación y 3) la funcionalidad de la edificación posterior al terremoto (SEAOC Vision 2000 Committee, 1995). Para definir estos estados, es necesario correlacionar un calificativo con una descripción detallada de los tres aspectos mencionados. Por lo tanto, puede decirse que los estados discretos de daño corresponden a una descripción cualitativa de los efectos producidos por un sismo sobre los elementos, los ocupantes y el funcionamiento de una estructura. El uso de una descripción cualitativa de estas señales hace que la definición de los estados discretos de daño sea una tarea bastante difícil y con un carácter algo subjetivo.

Las primeras clasificaciones de los estados de daño se basaban en el daño físico observado, no obstante, a partir de las lecciones aprendidas durante los últimos sismos, se han ido incluyendo los otros aspectos mencionados (el riesgo de los ocupantes y funcionalidad de la estructura). A continuación se presentan algunas de las clasificaciones que se han hecho hasta el momento.

Clasificación de acuerdo a los daños observados

Park, Ang y Wen (1987) proponen, a partir de los daños observados después de la ocurrencia de un sismo y mediante ensayos de laboratorio, considerar cinco estados de daño:

- Sin daño: en el peor de los casos se producen pequeñas fisuras en el hormigón.
- Ligero: se producen grietas en varios elementos estructurales.
- Moderado: agrietamiento severo y se producen algunos desprendimientos de hormigón.
- Severo: aplastamiento del hormigón y pérdida del recubrimiento de las barras de acero de refuerzo.
- Colapso

Petrovski y Bouwkamp (1989) sugieren una clasificación del daño basada en daños observados y en la disponibilidad de la estructura para ser utilizada después

del sismo. Para ello, definen tres categorías, las cuales son aplicables a estructuras de hormigón armado y mampostería estructural:

- Utilizable: los daños estructurales son leves, lo cual permite que la estructura puede ser utilizada inmediatamente después de ocurrido el sismo.
- Temporalmente utilizable: los daños estructurales varían entre moderados y severos, por lo tanto, la estructura puede estar temporalmente inutilizable.
- Completamente inutilizable: los daños estructurales son severos. Se puede producir el colapso parcial o total del edificio. La estructura no puede ser utilizada después del sismo.

Clasificación de acuerdo a la reparación de la estructura

Bracci et al. (1989) y Stone y Taylor (1993) describen cuatro estados de daño en función de la reparación de la estructura, para ello utilizan la siguiente categorización:

- Sin daño o daños leves
- Reparable
- Irreparable
- Colapso

A pesar que esta propuesta puede ser más difícil de aplicar desde el punto de vista práctico, es mucho más útil como una herramienta para la toma de decisiones de reforzamiento o para la planificación y la valoración económica de las actividades de reconstrucción después de ocurrido un sismo.

Clasificaciones combinadas

EERI (1994) adopta una escala de 5 estados discretos que incluyen los daños no estructurales, el tiempo que permanece fuera de funcionamiento la estructura y el riesgo al que se encuentran expuestos los ocupantes, esto es:

- Sin daño
- Leve: daños menores en elementos no estructurales. La estructura continua funcionando con normalidad en menos de una semana.
- Moderado: daños no estructurales considerables, se producen pequeños daños estructurales. La estructura puede estar cerrada hasta por 3 meses. El riesgo que se produzcan pérdida de vidas humanas es mínimo.

- Severo: los daños estructurales aumentan y es posible que la estructura deba estar cerrada por un período largo de tiempo. En el peor de los casos puede ser necesario demoler la estructura. Hay un alto riesgo que se produzcan pérdidas de vidas humanas.
- Total - Colapso o muy severo: los daños son irreparables y hay una probabilidad muy alta que se produzcan pérdidas de vidas humanas.

Estudios recientes como el ATC-40 y el Comité VISION 2000 establecen estados discretos de daño (niveles de desempeño) similares a los anteriores, pero con una descripción mucho más detallada, que involucra los daños en los elementos estructurales, no estructurales, y en los contenidos. Adicionalmente consideran aspectos tales como: la funcionalidad, los costos de reparación y el riesgo al que se encuentran expuestos los ocupantes, entre otros (ver también sección 3.3).

2.3.6 Indicadores e índices de daño

Un punto crucial en el análisis de vulnerabilidad es la selección de un funcional apropiado que permita cuantificar la respuesta calculada a partir del análisis del modelo mecánico para un grupo de movimientos sísmicos, el cual representa el grado de daño sufrido por un miembro y/o de toda la estructura. Estos funcionales usualmente se denominan "índices o indicadores de daño" y pueden involucrar una o más variables (Dolce et al., 1995), tales como: deformaciones unitarias, curvatura, rotaciones, desplazamientos, deriva entre piso, fuerzas, energía absorbida y energía disipada, entre otras. La elección de las variables a utilizar está relacionada con el tipo de daño que se desea analizar (local, intermedio o global).

Para definir los índices de daño, generalmente es necesario desarrollar un modelo que represente las características de la tipología estructural, las propiedades de los materiales involucrados, las características de las acciones aplicadas y el tipo de fallo que presenta la estructura. Por lo tanto, la definición de un índice de daño es un problema complejo y para el cual aún no existe un criterio unificado.

Durante los últimos 25 años se han propuesto diferentes índices de daño tanto a nivel local como global, a partir de ensayos realizados en laboratorio y/o utilizando las observaciones de los daños después de ocurrido un sismo. A continuación se presenta una descripción de los índices más relevantes que han sido utilizados por la comunidad científica internacional.

Índices de daño local

Estos índices determinan, como su nombre indica, el daño en un elemento y pueden ser, o no, acumulativos. Para cuantificar el daño se aplican cargas monotónicas crecientes que permiten encontrar las relaciones fuerza - deformación, momento - curvatura o momento - rotación de los extremos del elemento (vigas, columnas y

muros). Estos índices pueden ser acumulativos o no acumulativos, dependiendo si consideran las cargas cíclicas o no.

Índices no acumulativos Los índices de daño no acumulativos corresponden a los primeros modelos de daño desarrollados a partir del concepto de ductilidad. Su principal limitación es que no son capaces de representar el daño acumulado en los elementos sujetos a cargas cíclicas. A continuación se describen algunos de estos índices.

Relaciones demanda - capacidad de deformación Las dos formas más antiguas y simples de cuantificar el daño corresponden a la ductilidad y la deriva entre piso. La ductilidad representa la capacidad de una estructura o componente estructural de deformarse inelásticamente sin llegar al fallo y, preferiblemente, sin pérdida substancial de resistencia. La relación de ductilidad, μ , se puede definir en términos de rotación, θ , curvatura, Φ , o desplazamiento, d , mediante las siguientes relaciones:

$$\mu_{\theta} = \frac{\theta_m}{\theta_y} \quad (2.2)$$

$$\mu_{\Phi} = \frac{\Phi_m}{\Phi_y} \quad (2.3)$$

$$\mu_{\delta} = \frac{d_m}{d_y} \quad (2.4)$$

los subíndices m e y corresponden respectivamente al valor máximo alcanzado por la sección del elemento debido al sismo (demanda) y al instante de cedencia del elemento. La ecuación (2.4) corresponde al modelo propuesto por Newmark y Rosenblueth en 1974 para calcular el daño I_D , mediante la relación de la demanda con la capacidad de deformación, esto es:

$$I_D = \mu_{\delta} = \frac{d_m}{d_y} \quad (2.5)$$

Posteriormente, Banon et al. (1981) proponen utilizar la ecuación (2.3) como un índice de daño en función de la curvatura:

$$I_D = \mu_{\Phi} = \frac{\Phi_m}{\Phi_y} \quad (2.6)$$

La ecuación (2.6) se puede reescribir en función de la rigidez elástica inicial $(EI)_0$ y de la rigidez de la rama post-fluencia $(EI)_1$ (ver Figura 2.1), como:

$$I_D = 1 + \frac{(EI)_0 (M_m - M_y)}{(EI)_1 M_y} \quad (2.7)$$

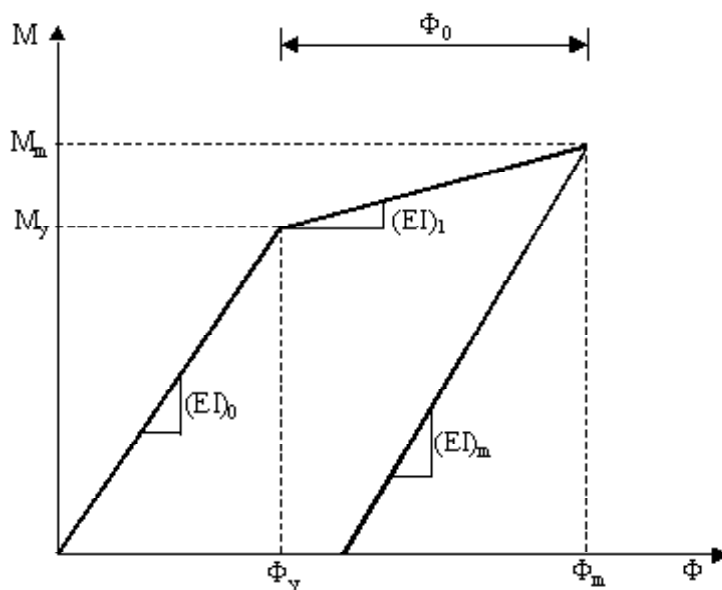


Figura 2.1. Parámetros que intervienen en el modelo propuesto por Banon et al. (1981) para evaluar el daño.

donde M_m y M_y son el momento máximo y de cedencia, respectivamente.

Por otra parte, el modelo de Bracci et al. (1989) relaciona la curvatura residual máxima Φ_m con la curvatura residual última Φ_u , mediante la siguiente ecuación:

$$I_D = \frac{\Phi_m - \frac{M_m}{(EI)_m}}{\Phi_u - \frac{M_u}{(EI)_u}} \quad (2.8)$$

$(EI)_m$ y $(EI)_u$ son la rigideces en la descarga correspondientes a la curvatura residual máxima, Φ_m , y a la curvatura residual última, Φ_u , respectivamente. La Figura 2.2 muestra un diagrama momento curvatura con los términos involucrados en este modelo.

El inconveniente de este tipo de modelos es que las relaciones de ductilidad no tienen en cuenta los efectos de los ciclos repetitivos ocasionados por las cargas sísmicas; sin embargo, debido a su simplicidad y fácil interpretación, continúan siendo utilizados como parámetros críticos de diseño y evaluación estructural (Park, 1986; Penzien, 1993).

En cuanto a la deriva entre piso, es importante considerar que este indicador ha sido el más utilizado por las normativas de diseño sismorresistente para controlar el daño en las estructuras. No obstante, presenta la misma limitación que la ductilidad, debido a que no tiene en cuenta los efectos de cargas cíclicas que ocurren durante un sismo.

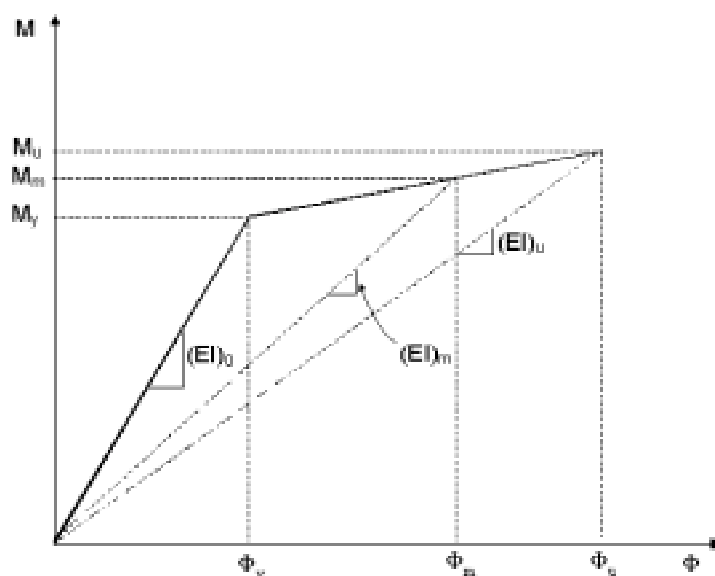


Figura 2.2. Parámetros del modelo de daño propuesto por Bracci et al. (1989).

Relaciones demanda - capacidad de resistencia Hasselman et al. (1980) proponen utilizar un índice que relaciona la demanda con la capacidad de resistencia. Para ello, utilizan los diafragmas bilineales de Momento - Curvatura (M vs ϕ) (ver Figura 2.2) o Cortante - Desplazamiento (V vs D), obtenidos mediante la aplicación de cargas monotónicas crecientes. El modelo se define como:

$$I_D = \frac{M_m - M_y}{M_u - M_y} \quad (2.9)$$

$$I_D = \frac{V_m - V_y}{V_u - V_y} \quad (2.10)$$

los subíndices y , u y m corresponden respectivamente a los niveles de cedencia, capacidad última y capacidad máxima del elemento debido al sismo. Las ecuaciones (2.9) y (2.10) están normalizadas, es decir, que un valor de I_D igual a cero corresponde a no daño y un valor igual a uno representa el colapso de la estructura.

Degradación estructural Cuando una estructura se ve sometida a un sismo y sobrepasa su límite elástico, su rigidez se degrada debido al agrietamiento que sufren los elementos. Así, mientras mayor es el daño, mayor es la pérdida de rigidez. Considerando este fenómeno, se han propuesto algunos índices de daño.

Lybas y Sozen (1977) propusieron uno de los primeros índices de este tipo, el cual relaciona la rigidez a flexión del elemento ante cargas monotónicas $(EI)_y$ con la

rigidez a flexión correspondiente a la máxima deformación que alcanza el elemento durante la respuesta dinámica $(EI)_m$, esto es:

$$I_D = \frac{(EI)_y}{(EI)_m} \quad (2.11)$$

Definiendo las rigideces de la ecuación (2.11) en función del momento y curvatura de la sección, se obtiene:

$$I_D = \frac{M_y \Phi_m}{\Phi_y M_m} \quad (2.12)$$

donde M_m y M_y son el momento máximo y de cedencia y Φ_m , Φ_y son la curvatura máxima y de cedencia.

Cuando un elemento se encuentra en el rango elástico, el valor de este índice de daño es uno y a partir de éste valor crece indefinidamente conforme se degrada su rigidez.

Banon et al. (1981) modificaron ligeramente el modelo de Lybas y Sozen, mediante lo que denominaron, factor de daño a flexión o FDR ("Flexural Damage Ratio"), que relaciona la rigidez a flexión en el punto de rotura y la rigidez a flexión máxima alcanzada en la respuesta sísmica. De esta forma, los valores obtenidos son menores que uno. La expresión para este índice de daño I_D en función del momento y la curvatura es:

$$I_D = FDR = \frac{M_u \Phi_m}{\Phi_u M_m} \quad (2.13)$$

En la Figura 2.2 se muestran los parámetros utilizados en los modelos de daño propuestos por Lybas y Sozen (1977) y Banon et al. (1981).

Posteriormente, Roufaiel y Meyer (1987) sugieren una forma modificada del FDR, definiendo el factor de daño a flexión modificado MFDR (modified flexural damage ratio), el cual relaciona las flexibilidades de la sección de la siguiente forma:

$$I_D = MFDR = \text{máximo de } [I_D^+, I_D^-] \quad (2.14)$$

$$I_D^+ = \frac{\frac{\Phi_m^+}{M_m^+} - \frac{\Phi_y^+}{M_y^+}}{\frac{\Phi_u^+}{M_u^+} - \frac{\Phi_y^+}{M_y^+}} \quad (2.15)$$

$$I_D^- = \frac{\frac{\Phi_m^-}{M_m^-} - \frac{\Phi_y^-}{M_y^-}}{\frac{\Phi_u^-}{M_u^-} - \frac{\Phi_y^-}{M_y^-}} \quad (2.16)$$

el signo + y - tiene que ver con la forma como trabaja a flexión el elemento, en el sentido de si es cóncava o convexa. Este índice está normalizado, es decir que, un valor nulo representa no daño y un valor igual a la unidad corresponde al colapso.

Índices acumulativos Para modelar la acumulación del daño que ocurre cuando una estructura se ve afectada por una carga cíclica, generalmente se utiliza una formulación de fatiga de ciclos bajos, en la cual el daño se considera como una función de la deformación plástica acumulada o incorporando un término relacionado con la energía histerética absorbida durante el sismo. Se analizan a continuación 3 tipos de índices acumulativos: los basados en la deformación, los basados en la energía y los mixtos.

Basados en la deformación Los primeros índices acumulativos conservaron los conceptos de ductilidad y simplemente incluyeron el efecto de carga cíclica. Para ello, Banon et al. (1981) propone una rotación acumulada normalizada (NCR), muy similar a la ecuación (2.2), esto es:

$$I_D = NCR = \frac{\sum_{i=1}^n |\theta_{im} - \theta_y|}{\theta_y} \quad (2.17)$$

n es el número de ciclos histeréticos y θ_{im} es la rotación máxima que alcanza la sección en el ciclo histerético i . Este indicador fue evaluado para un amplio rango de ensayos de carga cíclica, principalmente dominados por la flexión y, en algunos casos, considerando la carga axial. Los valores obtenidos del índice I_D cerca al fallo, mostraron una dispersión considerable.

Posteriormente, Stephens y Yao (1987) desarrollaron un índice de daño acumulado basado en la ductilidad de desplazamiento. Con incrementos de desplazamiento negativo Δd^- y positivo Δd^+ (ver Figura 2.3) definen el siguiente índice de daño:

$$I_D = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta d^+}{\Delta d_f} \right)^{1-b_1 r} \quad (2.18)$$

$r = \frac{\Delta d^+}{\Delta d^-}$, Δd_f es el valor de Δd^+ en un ensayo cíclico hasta alcanzar el fallo, b_1 es una constante y n es el número de ciclos a que está sujeto el elemento. Stephens y Yao recomiendan tomar Δd_f igual al 10 % de la altura de piso y b_1 igual a 0.77. Los resultados obtenidos con este índice para evaluar dos estructuras ensayadas bajo carga cíclica, mostraron una buena correlación con el daño observado, no obstante la dispersión aumentó para grados de daño mayores.

Por otro lado, Wang y Shah (1987) proponen un modelo de daño acumulativo bastante simple, suponiendo que el desarrollo del daño depende de la deformación máxima ocurrida durante un ciclo $d_{m,i}$, y que la variación de acumulación de daño es proporcional al daño ya ocurrido, resultando la siguiente expresión:

$$I_D = \frac{e^{s_1 b_2} - 1}{e^{s_1} - 1} \quad (2.19)$$

$$b = c_1 \sum \frac{d_{m,i}}{d_f} \quad (2.20)$$

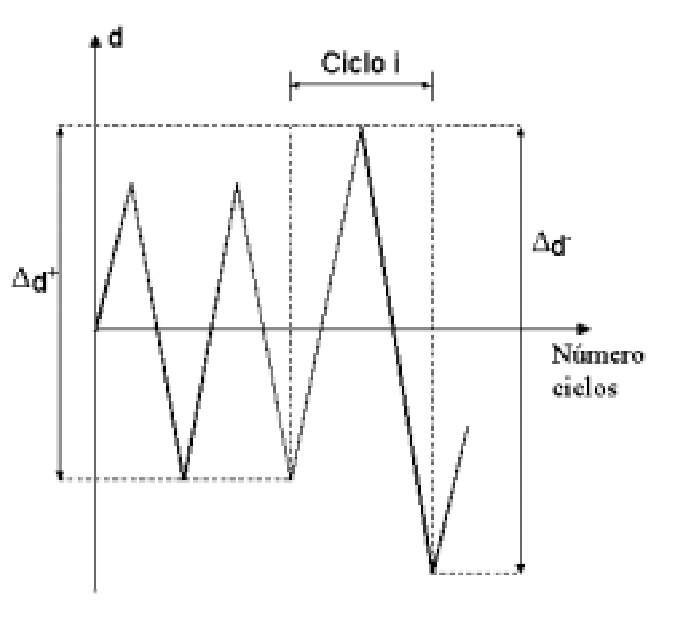


Figura 2.3. Parámetros del modelo de daño sísmico propuesto por Stephens y Yao (1987).

s_1 y c_1 son constantes definidas por el usuario y b_2 es un parámetro de ductilidad de desplazamiento acumulada escalada. Con base en las comparaciones de ensayos de uniones viga - columna, Wang y Shah sugieren tomar $c_1 = 0.1$ y $d_f = 5 d_y$. El valor del parámetro s_1 depende de la relación profundidad-luz y del nivel de refuerzo de cortante. Se recomienda tomar $s_1 = 1.0$ para uniones fuertemente reforzadas y $s_1 = -1.0$ para uniones pobremente reforzadas. Este índice básicamente es una medida de la degradación de resistencia, donde la fuerza de cedencia F_y en un ciclo de deformación se define como la fuerza máxima en el ciclo anterior multiplicada por $(1 - I_D)$ (ver Figura 2.4). El uso de este modelo está condicionado a la necesidad de calibración frente a daños observados durante un sismo.

Jeong e Iwan (1988) proponen una expresión para medir el daño I_D , calibrada a partir de daños observados en columnas de hormigón armado, la cual se obtiene utilizando las reglas de Coffin-Manson y Miner para combinar los efectos de ciclos que varían en amplitud, esto es:

$$I_D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i \mu_i^{s_2}}{c_2} \quad (2.21)$$

n es el número de ciclos, μ_i es la ductilidad en el ciclo i , c_2 y s_2 son constantes (usualmente $c_2 = 416$ y $s_2 = 6$).

Chung et al. (1987, 1988) utilizan una definición más sofisticada del daño que incluye la degradación de rigidez, la pérdida de resistencia y el efecto de cierre de grietas. El modelo se basa en: 1) el número de ciclos n_i correspondiente a la incursión

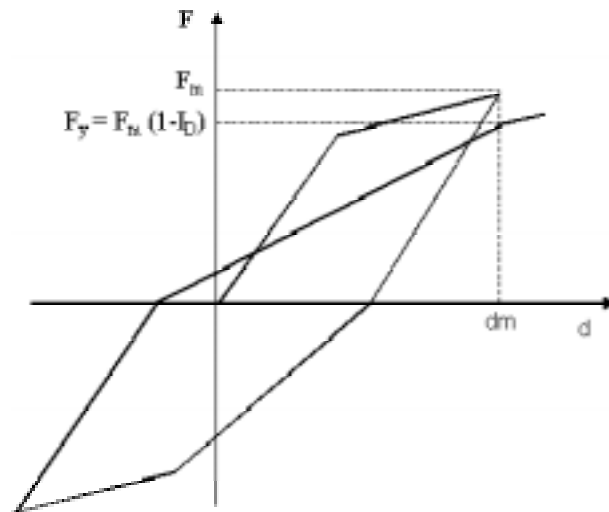


Figura 2.4. Modelo de daño propuesto por Wang y Shah (1987).

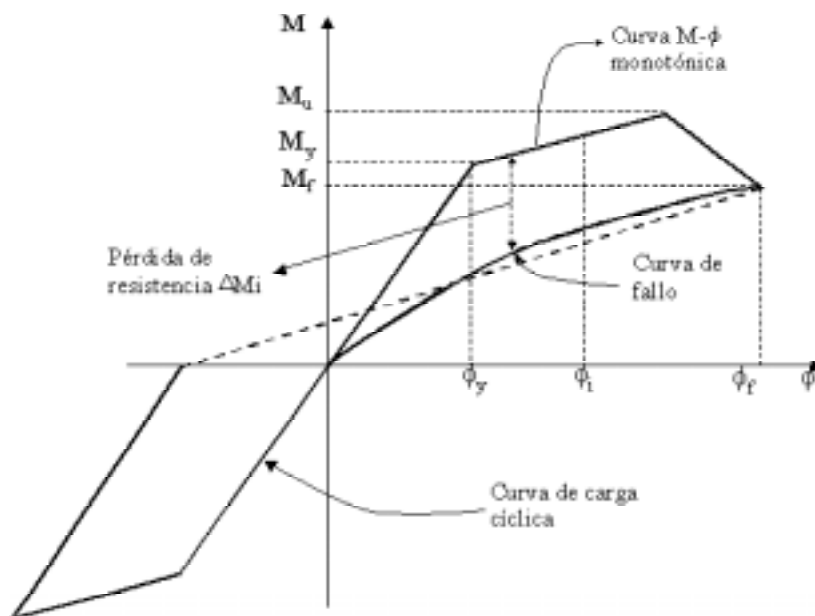


Figura 2.5. Parámetros del modelo de daño sísmico propuesto por Chung et al. (1987): M_u , M_y y M_f son los momentos último, de cedencia y de fallo, respectivamente, ϕ_y y ϕ_f son las curvaturas de cedencia y de fallo y ΔM_i es la pérdida de resistencia debida a un ciclo de carga.

de la estructura en el rango no lineal y 2) la curvatura del momento de fallo Φ_f (ver Figura 2.5). El índice de daño I_D se calcula usando la regla de Miner, esto es:

$$I_D = \sum_i \left(w_i^+ \frac{n_i^+}{n_{f,i}^+} + w_i^- \frac{n_i^-}{n_{f,i}^-} \right) \quad (2.22)$$

donde i es el indicador del nivel de desplazamiento o curvatura, $n_{f,i}$ es el número total de ciclos que causan el fallo en el nivel de curvatura i , definido en la ecuación (2.24), n_i es el número actual de ciclos en el nivel de curvatura i y, los superíndices $+$ y $-$ se refieren a los ciclos de carga positivos y negativos respectivamente, los cuales se consideran por separado en este modelo de daño. Los factores de peso w_i consideran la energía disipada inelásticamente como:

$$w_i = \sum_{j=1}^{n_i} \frac{k_{ij}}{n_i k_{i,ave}} \frac{\Phi_i + \Phi_{i-1}}{2\Phi_i} \quad (2.23)$$

$k_{i,ave}$ es la rigidez promedio para un amplitud i y j es un subíndice que se refiere a un ciclo con un nivel de amplitud i . El fallo se produce cuando el diagrama momento - curvatura degradado interseca la envolvente de fallo. El número de ciclos $n_{f,i}$ para que se produzca el fallo en el nivel de curvatura i se define como:

$$n_{f,i} = \frac{(M_i - M_{f,i})}{\Delta M_i} \quad (2.24)$$

$M_{f,i}$ es la envolvente de fallo (ecuación 2.25), ΔM_i es la pérdida de resistencia debida a un ciclo de carga (ecuación 2.26) y M_f es el momento de fallo.

$$M_{f,i} = M_f \frac{2\Phi_i}{\Phi_i + 1} \quad (2.25)$$

$$\Delta M_i = \Delta M_f \left(\frac{\Phi_i - \Phi_y}{\Phi_f - \Phi_y} \right)^{1.5} \quad (2.26)$$

Φ_y y Φ_f son las curvaturas de cedencia y de fallo y ΔM_f es la pérdida de resistencia en el instante donde se produce el fallo.

Basados en la energía El primer índice de daño basado en la energía I_W fue propuesto por Gosain et al. (1977), mediante una relación simple de energía acumulada:

$$I_D = I_W = \sum_{i=1}^n \frac{F_i d_i}{F_y d_y} \quad (2.27)$$

F_y y d_y son la fuerza y el desplazamiento de cedencia respectivamente y n es el número de ciclos histeréticos. En la evaluación sólo se consideran aquellos ciclos en

los cuales $F_i \geq 0.75F_y$. Varios autores han propuesto expresiones similares a ésta para definir el daño en elementos de hormigón armado, sin embargo, las dispersiones encontradas en los ensayos y pruebas realizadas, fueron bastante altas.

Para considerar la geometría del elemento, la carga axial y la armadura del elemento analizado, Gosain et al. (1977) proponen utilizar la siguiente ecuación:

$$I_D = I_W \left(1 - \frac{h_{efec}}{a} \right) \left(1 + \frac{0.0005N}{A_{core}} \right) \quad (2.28)$$

$$A_{core} = b_c h_{efec} \quad (2.29)$$

siendo I_W es el índice de daño obtenido de la ecuación (2.27), h_{efec} es la altura efectiva de la sección menos el recubrimiento, a es el ancho de la sección, N es la carga axial, A_{core} es el área del hormigón confinado y b_c es la distancia desde el borde de los estribos medidos en la base.

Una formulación más compleja fue desarrollada por Kratzig et al. (1989). El método se basa en las energías asociadas a las áreas de las zonas de los ciclos de carga y descarga, las cuales se muestran en la Figura 2.6. Para las partes con deformación positiva, el parámetro de daño acumulado se define como:

$$I_D^+ = \frac{\sum E_{p,i}^+ + \sum E_i^+}{E_f^+ + \sum E_i^+} \quad (2.30)$$

$E_{p,i}$ es la energía asociada al ciclo primario PHC , E_i es la energía en un ciclo FHC (por ejemplo $FHC = E_1^+$) y E_f es la energía absorbida en un ensayo monotónico hasta el fallo. Después de calcular el parámetro similar para las deformaciones negativas, el daño total en elemento se obtiene como:

$$I_D = I_D^+ + I_D^- - I_D^+ I_D^-$$

Este índice fue calibrado mediante ensayos dominados por la flexión, y se obtuvo un valor cercano a la unidad para el fallo del elemento, no obstante no se realizaron pruebas para niveles intermedios de daño.

Hwand y Scribner (1984) propone un índice de daño I_D en función de la energía disipada, de la siguiente forma:

$$I_D = \sum_i^n E_i \frac{K_i d_i^2}{K_e d_y^2} \quad (2.31)$$

n es el número de ciclos, E_i , K_i y d_i son la energía disipada, la rigidez secante a flexión y la máxima deformación alcanzada en el ciclo i , respectivamente y K_e es la rigidez a flexión en el rango elástico. Los ciclos histeréticos que intervienen en la evaluación de la ecuación (2.31) son aquellos cuya resistencia no disminuye del 75 % de la resistencia de cedencia.

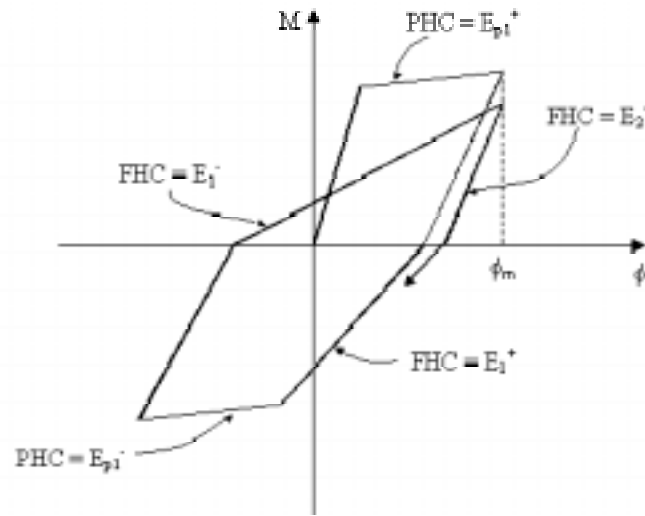


Figura 2.6. Parámetros del modelo de daño sismico propuesto por Kratzig et al. (1989).

Índices combinados La mayor parte de los modelos que calculan el daño a nivel local de elementos, corresponden a índices combinados, los cuales toman en cuenta tanto los efectos de la relación demanda - capacidad como los efectos de la acumulación del daño. Banon y Veneziano (1982) proponen uno de los primeros modelos de daño combinado mediante la siguiente ecuación:

$$I_D = \sqrt{\left(\frac{d_m}{d_y} - 1\right)^2 + \left(1.1 \left(2 \frac{E_h}{F_y d_y}\right)^{0.38}\right)^2} \quad (2.32)$$

d_m y d_y son los desplazamientos máximo y de cedencia respectivamente, E_h es la energía inelástica disipada y F_y es la fuerza máxima que soporta la estructura en el rango elástico. Este índice tiene un valor nulo para el rango elástico y no tiene cota superior.

Krawinkler y Zohrei (1983) proponen un índice en función del número de ciclos de carga n y de las deformaciones plásticas durante cada ciclo Δd_{pi} , esto es:

$$I_D = C \sum_{i=1}^n (\Delta d_{pi})^{\alpha_i} \quad (2.33)$$

C y α_i son parámetros del comportamiento estructural. Aunque originalmente este modelo fue propuesto para estructuras de acero, ciertos autores lo aplican, con algunas modificaciones, a estructuras de hormigón armado (Chung et al., 1987; Krawinkler y Nassar, 1992). Posteriormente, Hwang y Scribner (1984) sugirieron un índice energético normalizado, evaluado como:

$$I_D = \sum_{i=1}^n E_i \frac{K_i}{K_e} \left(\frac{d_i}{d_y} \right)^2 \quad (2.34)$$

E_i es la energía disipada durante el ciclo i , K_e y d_y son la rigidez elástica y la deformación de cedencia, mientras que K_i y d_i son la rigidez a flexión y la máxima deformación alcanzada en el ciclo i ; n es el número de ciclos para el cual la resistencia no disminuye en más del 75 % de su valor máximo.

El índice combinado más utilizado para la definición del daño acumulado, es el propuesto por Park y Ang (1985). Éste consiste en una combinación de la deformación normalizada y la energía de absorción, esto es:

$$I_D = \frac{d_m}{d_u} + \beta_e \frac{\int dE}{F_y d_u} \quad (2.35)$$

d_u y d_m son respectivamente las deformaciones últimas y la correspondiente al punto de capacidad máxima, β_e es un parámetro que representa la pérdida de resistencia, E es la energía disipada y F_y es la fuerza de cedencia. El primer término de la ecuación (2.35) es una simple medida del desplazamiento pseudo-estático. El segundo término tiene en cuenta la acumulación del daño. La ventaja de este modelo es su simplicidad y que ha sido calibrado con una cantidad considerable de daños observados durante varios sismos. Park et al. (1985) sugieren un valor de I_D igual a 0.4 como límite entre un daño reparable e irreparable. Varias expresiones han sido desarrolladas a partir del índice de Park y Ang, entre las cuales, está la propuesta de Kunnath et al. (1991):

$$I_D = \frac{\Phi_m - \Phi_y}{\Phi_u - \Phi_y} + \beta_e \frac{\int dE}{M_y \Phi_u} \quad (2.36)$$

Φ_u , Φ_y y Φ_m son las curvaturas última, de cedencia y la correspondiente al momento máximo y M_y es el momento de cedencia.

Bracci et al. (1989) proponen otro índice de daño combinado. Este índice se define como la combinación del daño asociado a la pérdida de resistencia D_S , el daño correspondiente a una deformación irre recuperable D_d y la potencia de daño D_p , la cual se define como el área entre el diagrama Momento - Curvatura ($M - \Phi$) y la envolvente de fallo (ver Figura 2.7). El índice de daño I_D se calcula como:

$$I_D = \frac{D_S + D_d}{D_p} \quad (2.37)$$

Para obtener de manera simplificada los valores de D_S , D_d y D_p , Bracci et al. (1989) utilizan una relación bilineal para el diagrama momento - curvatura (ver Figura 2.8), a partir de la cual proponen las siguientes relaciones:

$$D_S = \Delta M (\Phi_f - \Phi_y) \quad (2.38)$$

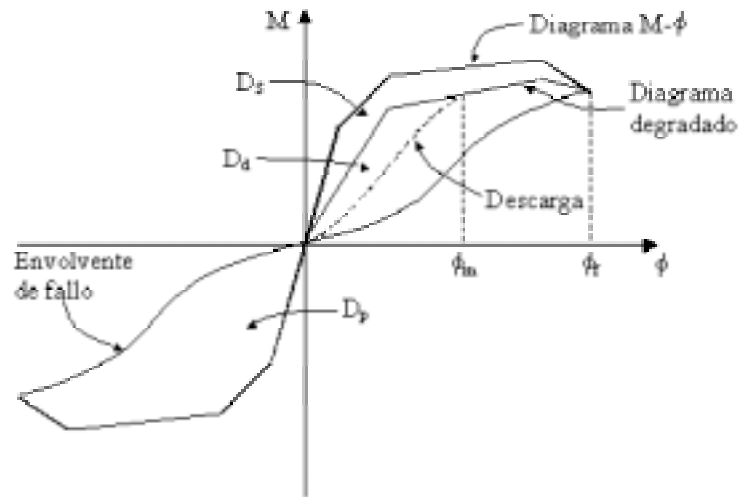


Figura 2.7. Parámetros del modelo de daño de Bracci et al. (1989).

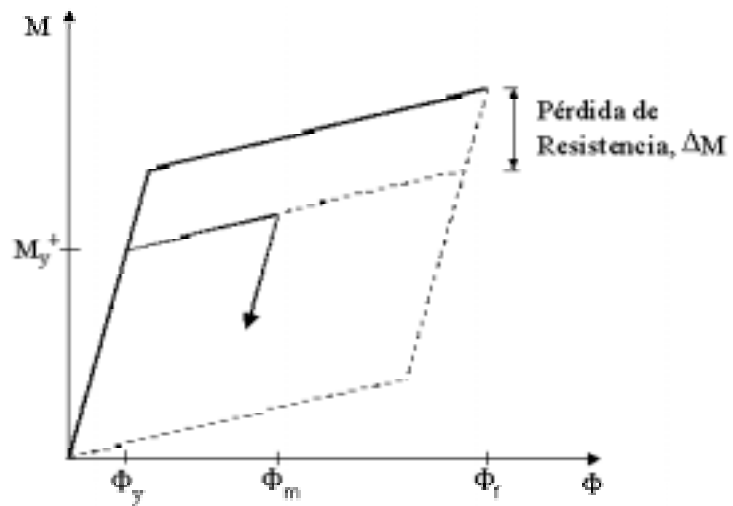


Figura 2.8. Modelo simplificado de daño propuesto por Bracci et al. (1989).

$$D_d = (M_y - \Delta M) (\Phi_m - \Phi_y) \quad (2.39)$$

$$D_p = M_y (\Phi_f - \Phi_y) \quad (2.40)$$

Reemplazando las ecuaciones (2.38), (2.39) y (2.40) en la ecuación (2.37), se obtiene:

$$I_D = \frac{\Delta M (\Phi_f - \Phi_y) + (M_y - \Delta M) (\Phi_m - \Phi_y)}{M_y (\Phi_f - \Phi_y)} \quad (2.41)$$

Los autores proponen reescribir la ecuación (2.41) en función de los siguientes términos:

$$D_M = \frac{\Delta M}{M_y} \quad (2.42)$$

$$D_\Phi = \frac{\Phi_m - \Phi_y}{\Phi_f - \Phi_y} \quad (2.43)$$

ΔM es la degradación de la resistencia definida como:

$$\Delta M = \frac{c \int dE}{\Phi_y}$$

De esta forma utilizando las ecuaciones (2.42) y (2.43), la ecuación (2.41) puede redefinirse como:

$$I_D = D_M + D_\Phi - D_M D_\Phi$$

Reinhorn y Valles han propuesto para ciclos bajos de fatiga, el siguiente modelo de daño:

$$I_D = \frac{d_{\max} - d_y}{d_u - d_y} \frac{1}{\left[1 - \frac{E_h}{4(d_u - d_y) F_y} \right]} \quad (2.44)$$

El modelo da la posibilidad de trabajar con deformación, rotación o curvatura en la ecuación (2.44). Las variables utilizadas ya han sido definidas anteriormente. Cuando la relación $\frac{d_{\max} - d_y}{d_u - d_y}$ tiende a uno, la ecuación (2.44) se transforma en:

$$I_D = \frac{d_{\max} - d_y}{d_u - d_y} + \frac{E_h}{4(d_u - d_y) F_y} \quad (2.45)$$

La ecuación (2.45) corresponde al índice de daño de Park y Ang para $\beta_e = 0.25$. Por lo tanto, este modelo se correlaciona con el modelo de fatiga de Reinhorn y Valles para valores grandes de deformación, rotación o curvatura que experimenta el elemento en la respuesta sísmica.

Índices de daño global

En general, existen tres formas de evaluar el índice de daño global en las estructuras de hormigón armado: la primera, corresponde al cálculo de los índices de daño local y, mediante factores de ponderación, o coeficientes de importancia, se obtiene el índice de daño intermedio y/o global. En la segunda forma, el índice de daño global se obtiene directamente en base a características estructurales globales (usualmente los parámetros modales). Finalmente, la tercera alternativa define el índice de daño global a partir de la información contenida en la curva de capacidad de una estructura, es decir, a partir de un análisis estático no lineal. A continuación se describen los principales índices globales desarrollados para cada uno de estos casos.

Índices globales con factores de ponderación El índice de daño global se obtiene como un promedio ponderado de los índices de daño local. Para ello es necesario definir previamente los puntos donde se evaluará el índice de daño local y, después, utilizar unos factores de ponderación apropiados que permitan asignar mayores pesos a las zonas más dañadas o cuya influencia en el daño global de la estructura sea mayor. Existen básicamente dos tipos de factores: 1) los relacionados con las cuantías de energía de absorción a nivel local y 2) los relacionados con criterios de importancia.

El índice global más común, utiliza los factores tipo 1, es decir, los factores de ponderación iguales a la energía local absorbida (Park et al., 1985; Chung et al., 1989, 1990; Kunnath et al., 1990; Kunnath et al., 1992). Así, el índice de daño de un piso de una estructura se obtiene como:

$$I_{D_{piso}} = \frac{\sum I_{D_i} E_i}{\sum E_i} \quad (2.46)$$

I_{D_i} y E_i son el daño y la energía absorbida por el elemento i , respectivamente. Para obtener el índice global $I_{D_{global}}$ de la estructura se procede de la misma forma, esto es:

$$I_{D_{global}} = \sum_{j=1}^N \frac{E_j}{\sum E_j} I_{D_j} \quad (2.47)$$

N es el número de pisos e I_{D_j} es el índice de daño del piso j obtenido a partir de la ecuación (2.46). E_j es la energía absorbida por el piso j y $\sum E_j$ es la energía absorbida por todos los pisos, es decir, la correspondiente a toda la estructura.

Bracci et al. (1989) utilizan los factores tipo 2, es decir, coeficientes de peso w_i relacionados con criterios de importancia. En este caso, w_i se define como la carga gravitatoria soportada por el elemento i , dividida por el peso total de la estructura. Así, el daño que se produce en un piso se obtiene como:

$$I_{D_{piso}} = \frac{\sum w_i I_{D_i}^{b+1}}{\sum w_i I_{D_i}^b} \quad (2.48)$$

donde un valor alto de la constante b resalta los elementos más severamente dañados del piso. Utilizando esta definición se consigue que el daño ocurrido en la base de la estructura tenga mayor incidencia en la estimación del índice de daño global, disminuyendo dicha incidencia en los pisos superiores.

Índices globales basados en los parámetros modales Una forma rápida de evaluar el daño global estructural es a partir de los cambios en los parámetros modales durante un sismo. Estos índices evitan el promediado de índices locales, realizando una estimación directa del daño global de la estructura. Generalmente se basan en el período de vibración de los edificios (índices de ablandamiento) o en la utilización de las formas modales, para localizar el daño.

Índices de ablandamiento Los daños ocasionados por un sismo producen cambios en las características dinámicas de una estructura. Usualmente el período natural se incrementa, como consecuencia de la degradación de la rigidez de los elementos y también del incremento en el amortiguamiento (energía de disipación). Considerando que este último parámetro varía demasiado debido a diferentes factores, las investigaciones se han centrado en definir índices globales en función del período o frecuencia natural de las estructuras. El objetivo inicial de estos índices fue el permitir la evaluación del daño estructural de una manera rápida, después de ocurrido un terremoto, utilizando un registro sísmico obtenido, por ejemplo, en la parte superior de una estructura. Sin embargo, el método puede ser utilizado únicamente en conjunto con análisis no lineales en el tiempo o utilizando medidas de vibraciones *in situ*. Una primera propuesta en esta dirección fue realizada por Roufaiel y Meyer (1987), correlacionando un índice de daño global sencillo, expresado en términos de la deflexión en el último nivel de la estructura, δ , y el correspondiente cambio en la frecuencia fundamental de vibración, mediante la siguiente expresión:

$$I_{D_{global}} = \frac{14.2\delta_y \left(\sqrt{f_a/f_d} - 1 \right)}{d_u - d_y}$$

f_a y f_d son las frecuencias naturales antes y después del sismo respectivamente y los subíndices u y y corresponden a los estados último y de fluencia de la estructura. Posteriormente se han realizado otras propuestas importantes, tales como los tres índices de ablandamiento de DiPasquale y Cakmak (1987,1988), los cuales se basan en la evolución del período natural de vibración, esto es:

$$I_{D_m} = 1 - \frac{T_a}{T_m} \quad (2.49)$$

$$I_{D_{pl}} = 1 - \left(\frac{T_d}{T_m} \right)^2 \quad (2.50)$$

$$I_{D_F} = 1 - \left(\frac{T_a}{T_d} \right)^2 \quad (2.51)$$

T_a y T_d son los períodos antes y después del sismo y T_m es el período máximo obtenido de la respuesta temporal de la estructura (ver Figura 2.9).

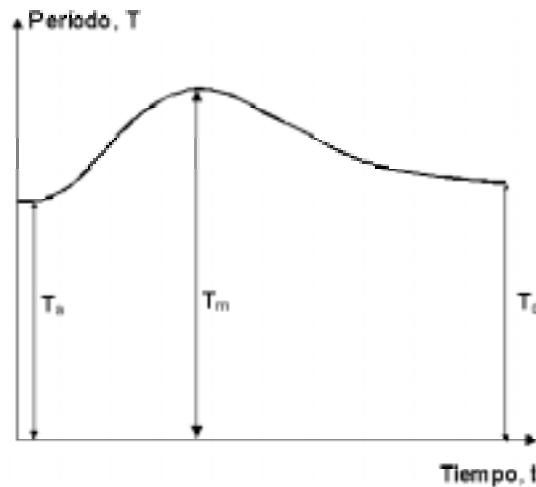


Figura 2.9. Variación del período fundamental de la estructura durante un sismo.

Este método se basa en la suposición que el daño afecta el período fundamental pero los cambios producidos en las formas modales son despreciables. Por lo tanto, es posible dividir la respuesta temporal en una serie de ventanas y definir sistemas lineales equivalentes para ajustar el comportamiento dentro de cada una de ellas. Las interpretaciones de los índices de las ecuaciones (2.49) a (2.51) fueron discutidas por DiPascuale et al. (1990), concluyendo que I_{D_F} es aproximadamente igual a la reducción promedio de la rigidez de la estructura, $I_{D_{pl}}$ es una medida de la deformación plástica de la interacción que ocurre durante un sismo entre el suelo y la estructura e I_{D_m} es la combinación de la medida de la degradación de rigidez y los efectos de plasticidad. De estos indicadores el que mejor representa el daño global en una estructura es el índice de ablandamiento máximo I_{D_m} . Sin embargo, los otros dos indicadores pueden proporcionar una descripción más detallada acerca de la respuesta de la estructura. Para calcular el valor de I_{D_m} es necesario conocer la historia temporal de la respuesta en la estructura durante un sismo, para determinar el período lineal equivalente máximo T_m . Éste puede obtenerse mediante un análisis no lineal o midiéndolo directamente de la respuesta de un edificio durante un sismo.

Una limitación grande de los índices de ablandamiento, consiste en que éstos proporcionan muy poca información sobre la distribución del daño dentro de la estructura (daño local). Para mejorar este aspecto, Mork (1992) extendió el índice de ablandamiento máximo para incluir el segundo modo, mediante la definición de dos parámetros:

$$D_1 = 1 - \sqrt{\frac{K_{1,m}}{K_{1,a}}}$$

$$D_2 = 1 - \sqrt{\frac{K_{2,m}}{K_{2,a}}}$$

los valores de K son la rigidez de un sistema de dos grados de libertad, que tiene las masas y los dos primeros períodos iguales a los de la estructura original. Así, K_1 y D_1 representan la parte baja de la estructura y K_2 y D_2 la parte más alta. Estas dos expresiones permiten establecer la distribución probable del daño. Los subíndices "m" y "a" se refieren respectivamente al valor máximo durante el sismo y al valor inicial de la rigidez del sistema de dos grados de libertad.

Localización del daño usando formas modales Los índices de ablandamiento proporcionan una información confiable cuando los niveles de daño son severos y están distribuidos a lo largo de toda la estructura. Sin embargo, cuando los daños son menores y están localizados en determinados puntos de la estructura, es probable que esto influya tan solo en los modos más altos de vibración y que puedan producirse cambios en algunos modos de la estructura. Bajo estas circunstancias, es necesario utilizar métodos que permitan identificar estos aspectos (Raghavendrachar y Aktan, 1992). En la actualidad, se ha avanzado considerablemente en la identificación de daño usando las formas modales (IMAC, 1994), sin embargo estos índices no son muy utilizados, debido a que requieren de alta precisión en la estimación de los datos modales.

Índice global en base a la capacidad resistente Para encontrar directamente el daño sísmico de una estructura, sin utilizar una combinación del daño local, es necesario construir mediante un análisis pushover la curva de capacidad resistente que relaciona el cortante basal, V , con el desplazamiento lateral máximo, d , en el tope del edificio. Para calcular el índice de daño, es necesario obtener la representación bilineal de esta curva, definida por los puntos de cedencia (d_y, V_y) y de capacidad última (d_u, V_u).

Roufaiel y Meyer (1987) proponen calcular el índice global de daño GDP (global damage parameter) de la estructura como:

$$I_{Dglobal} = GDP = \frac{d_m - d_y}{d_u - d_y} \quad (2.52)$$

d_m es el desplazamiento lateral máximo en el tope de la estructura. El desplazamiento de cedencia, d_y , se determina a partir del análisis no lineal, y corresponde al instante en que un primer elemento ingresa en rango inelástico. Para determinar el valor del desplazamiento último, d_u , es necesario establecer algún criterio de fallo. Roufaiel y Meyer (1987) proponen tomar $d_u = 0.06 \cdot H$, donde H es la altura del edificio.

Hasselman et al. (1980) proponen un índice similar al de Roufaiel y Meyer pero utilizando la capacidad de cortante basal de la estructura, esto es:

$$I_{Dglobal} = \frac{V_m - V_y}{V_u - V_y} \quad (2.53)$$

V_m es el cortante basal máximo en la respuesta dinámica.

El daño global de la estructura calculado mediante estos dos índices está normalizado, es decir, que varía entre cero, para el caso de no daño y uno para cuando se presenta el colapso de la estructura.

2.3.7 Relaciones entre los estados discretos y los índices de daño

En las secciones anteriores se han descrito los principales índices de daño existentes para estructuras de hormigón armado, al igual que las diferentes propuestas para clasificar el daño de acuerdo a estados discretos que describen de forma cualitativa el daño. Para evaluar la vulnerabilidad sísmica de una determinada zona o de una estructura en particular, es necesario establecer una relación entre estos dos conceptos. Sin embargo, no son muchas las propuestas que existen en la actualidad al respecto, debido a dos aspectos fundamentales: 1) el carácter subjetivo de los estados de daño y 2) la dificultad para establecer límites para los indicadores de daño.

Park et al. (1987) propusieron una de las primeras correlaciones entre el índice de daño local propuesto por Park y Ang y los cinco estados de daño considerados (ver Tabla 2.3). Para ello, utilizaron las calibraciones del modelo con los daños estructurales observados en varias edificaciones de hormigón armado evaluadas post-terremoto y con numerosos ensayos de laboratorio.

Intervalo de variación de I_D	Estado discreto de daño
$I_D < 0.1$	Sin daño
$0.1 \leq I_D < 0.25$	Ligero
$0.25 \leq I_D < 0.40$	Moderado
$0.40 \leq I_D < 1.0$	Severo
$I_D \geq 1.0$	Colapso

Tabla 2.3. Correlación entre el índice de daño total de Park y Ang y cinco estados discretos de daño.

Intervalo de variación de I_D	Estado discreto de daño
$I_D < 0.11$	Sin daño
$0.11 \leq I_D < 0.40$	Reparable
$0.40 \leq I_D < 0.77$	Irreparable
$I_D \geq 0.77$	Colapso

Tabla 2.4. Correlación entre el índice de daño global de Park y Ang y cuatro estados discretos de daño.

Posteriormente, Ang et al. (1993) sugieren usar un valor de $I_D = 0.8$ para representar el colapso. El mismo índice de Park y Ang ha sido utilizado por otros investigadores para obtener sus propias correlaciones. Stone y Taylor (1993) aplicaron este índice a 82 ensayos de columnas circulares de puentes y obtuvieron la correlación que se muestra en la Tabla 2.4.

Bracci et al. (1989) propone una correlación entre el índice de daño de la ecuación (2.41) y los estados de daño propuestos por los mismos autores, utilizando los ensayos realizados sobre columnas y ensayos de modelos a escala de pórticos de 3 y 6 niveles (ver Tabla 2.5).

Intervalo de variación de I_D	Estado discreto de daño
$I_D < 0.33$	Sin daño
$0.33 \leq I_D < 0.66$	Reparable
$0.66 \leq I_D < 1.0$	Irreparable
$I_D \geq 1.0$	Colapso

Tabla 2.5. Correlación entre el índice de daño global de Bracci et al. (1989) y cuatro estados discretos de daño.

2.4 Resumen y discusión

En este capítulo, se presentan las dos clasificaciones más generales de las metodologías existentes para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica. La primera de ellas corresponde a la propuesta de Petrini y Corsanego, los cuales proponen tres tipos de técnicas a partir del tipo de resultado, esto es: técnicas directas, técnicas indirectas y técnicas convencionales. A partir de esta clasificación, Dolce et al. (1995) proponen un segundo criterio, que se basa en los tres principales elementos involucrados en un estudio de vulnerabilidad: los datos, el método y los resultados. Definiendo de esta forma las metodologías existentes, pueden realizarse diferentes tipos de análisis de vulnerabilidad, combinando adecuadamente estos tres elementos, por lo cual se considera que esta clasificación es mucho más general.

El objetivo principal de un estudio de vulnerabilidad consiste en determinar el grado de daño que experimenta una estructura cuando se ve sometida a un sismo de determinada intensidad. Para calcular el daño se requieren los siguientes pasos: 1) identificar los elementos que se encuentran expuestos, 2) determinar el tipo de daño que se desea evaluar, 3) elegir un modelo de daño que represente adecuadamente la respuesta de la estructura. Los elementos de una estructura que se encuentran expuestos a una acción sísmica son: elementos estructurales, elementos no estructurales y contenidos. Cada uno de ellos es sensible a diferentes parámetros que caracterizan la respuesta estructural. Así, mientras los elementos estructurales son sensibles a las derivas entre piso, los elementos no estructurales y los contenidos son sensibles tanto a las aceleraciones como a las derivas entre pisos. En este trabajo sólo se consideran los daños en elementos estructurales, por consiguiente, los índices que se presentan en este capítulo están relacionados con este tipo de daño físico y, en particular, con las estructuras de hormigón armado.

Existen básicamente dos tipos de índices de daño: índices locales e índices globales. Los primeros determinan el daño en elementos, mientras que los segundos proporcionan una medida del daño en toda la estructura o, en algunos casos, en una parte de ésta (por ejemplo el daño en todo un piso). En este trabajo se han dividido los índices de daño local en dos grandes grupos: 1) índices no acumulativos, los cuales no consideran el efecto de los ciclos de carga y por lo tanto sólo pueden proporcionar una medida aproximada del daño y 2) índices acumulativos que logran reflejar el efecto de las cargas cíclicas a partir de factores de ponderación. Debido a la sencillez en cuanto al cálculo y a su significado físico, los índices no acumulativos continúan siendo ampliamente utilizados para propósitos de diseño y análisis de estructuras regulares. En cuanto a los índices acumulativos, los más fiables son los que utilizan una combinación de conceptos de daño, debido a que, además de considerar el efecto de las cargas cíclicas, también incluyen la relación demanda - capacidad. De estos índices el propuesto por Park y Ang (1987) y sus respectivas modificaciones, tienen la gran ventaja del respaldo de la información acerca de datos reales, obtenida tanto de pruebas experimentales como de la observación directa de

los daños producidos por los terremotos a las estructuras. En cuanto a los índices de daño global, estos básicamente se obtienen a partir de tres formas: 1) utilizando los índices de daño local y factores de ponderación o coeficientes de importancia, 2) a partir de los parámetros modales y 3) mediante los parámetros de la representación bilineal de la curva de capacidad.

El valor de un índice de daño por sí solo, no representa ningún tipo de evaluación de la vulnerabilidad sísmica. Para que estos índices puedan ser interpretados, es necesario establecer una relación entre su rango de variación y los estados discretos de daño, los cuales describen de forma cualitativa, los daños físicos que se producen en los elementos de una estructura, el riesgo al que se encuentran expuestos los ocupantes y la forma como afectan los daños a la funcionalidad de una estructura. No son muchas las propuestas de las cuales se dispone para establecer esta relación, sin embargo en este capítulo se presentan las más utilizadas y conocidas dentro de la comunidad internacional. Es importante anotar, que estas relaciones a pesar que utilizan observaciones de los daños ocurridos después de un sismo y resultados de ensayos de laboratorio, tienen un carácter con un remanente de subjetividad.