

diferentes (ATC 1999). La tabla 5.1 presenta las recomendaciones del nuevo código unificado IBC 2000 de los Estados Unidos (ICBO 2000).

Tabla 5.1: Objetivos de comportamiento sísmico recomendados en el IBC 2000

Nivel de Diseño Sísmico	Comportamiento Requerido			
	Operación Permanente	Ocupación Inmediata	Protección de la Vida	Prevención del Colapso
Frecuente (50%/30 años)	□	Comportamiento Inaceptable (para edificios nuevos)		
Ocasional (50%/50 años)				
Raro (10%/50 años)	○		□	
Muy raro (10%/100 años)		○		□

○ = Seguridad crítica, como hospitales, departamentos de bomberos

= Instalación esencial o peligrosa, como centrales telefónicas, edificio con químicos tóxicos

□ = Instalación básica o convencional, como edificios de oficinas y de residencias

De acuerdo con lo anterior, la evaluación del estado de una construcción existente puede hacer surgir serias dudas sobre la capacidad de la misma para soportar terremotos futuros. En algunos países se han desarrollado campañas de reforzamiento de edificios existentes para efectos de reducir la vulnerabilidad de los mismos. En principio, puede pensarse que el reforzamiento debería ser obligatorio para edificios esenciales para la atención de emergencias derivadas de desastres, y que resulten inadecuados luego de las evaluaciones de vulnerabilidad estructural.

5.3.1 Edificios esenciales

En muchos países, las normas de construcción sismorresistente no han sido efectivamente aplicadas y, en otros, dichas normas no han considerado especificaciones especiales para las estructuras de edificios esenciales tales como los hospitales. Por esta razón, no es extraño que, cada vez que ocurre un terremoto, los edificios más afectados son precisamente las instalaciones de la salud, que deberían ser los últimos en dañarse. En otras palabras, la vulnerabilidad en general de los hospitales es alta, situación que debe ser corregida total o parcialmente con el fin de evitar enormes pérdidas económicas y sociales, en particular en los países en desarrollo. En América Latina y el Caribe, en los últimos 15 años, un total de 93 hospitales y 538 unidades de salud han sido dañados sensiblemente a consecuencia de desastres, ya sea por haberse colapsado o haber quedado en condiciones de peligro que exigieron su desalojo. Si se considera una media de 200 camas de capacidad instalada por hospital y 10 camas por unidades de salud, resulta que 24 000 camas han quedado inhabilitadas durante dicho lapso. Estimando un costo promedio regional de 130 000 dólares por cama de hospital, las pérdidas directas acumuladas por este concepto en la región habrían ascendido a 3120 millones de dólares. Lo anterior revela la necesidad de revisar la estrategia de diseño y los criterios para la construcción de instalaciones hospitalarias en zonas propensas.

Los hospitales requieren consideraciones especiales en relación con la mitigación de riesgos debido a sus características de ocupación y a su papel durante situaciones de desastre, en relación con la preservación de la vida y la buena salud, especialmente en el

diagnóstico y tratamiento de heridas y enfermedades. Los hospitales pueden tener en cualquier momento una alta población de pacientes residentes, pacientes transitorios, funcionarios, empleados y visitantes. En caso de desastre, un hospital debe continuar con el tratamiento de los pacientes alojados en sus instalaciones y debe atender las personas lesionadas por el mismo. Para realizar esto, el personal debe estar en el sitio y conocer como responder ante la situación. También, el edificio y su dotación deben permanecer en condiciones de servicio.

Un edificio puede quedar en pie después de un desastre pero quedar inhabilitado debido a daños no estructurales. El coste de las partes no estructurales en la mayoría de los edificios es considerablemente mayor que el de las estructurales. Esto se cumple especialmente en hospitales donde el 85 a 90% del valor de la instalación no está en los pilares, pisos y vigas, sino en los acabados arquitectónicos, sistemas mecánicos y eléctricos y en el equipo allí contenido. Un movimiento sísmico de menor intensidad causará daños no estructurales mayores que los de los componentes estructurales. Por lo tanto, los aspectos más vitales de un hospital, aquellos que se relacionan directamente con su propósito y función, son los que más fácilmente se ven afectados o destruidos por los terremotos. La función que cumple un hospital debe mantenerse después de la ocurrencia de un sismo intenso, con el fin de que sea posible satisfacer las necesidades de atención médica que impone la emergencia. Si el hospital sufre graves daños no podrá cumplir su función cuando más se necesita y se convertirá así en objeto de la atención del desastre (Cardona 1999b).

En el diseño de toda estructura sometida a movimientos sísmicos debe considerarse que los elementos no estructurales de la construcción, tales como falsos techos, paneles, ventanas, puertas, etc., así como equipos, instalaciones mecánicas y sanitarias, etc., deben soportar los movimientos de la estructura. Por otra parte, debe tenerse presente que la excitación de los elementos no estructurales inducida por los propios movimientos de la estructura es, en general, mayor que la excitación en la base, por lo que puede decirse que la seguridad de los elementos no estructurales se encuentra más comprometida en muchos casos que la de la estructura misma. A pesar de esto, en el diseño sísmico de estructuras se concede generalmente poca importancia a estos elementos, al punto de que muchas normativas sísmicas no han incluido hasta ahora requisitos de diseño al respecto. Quizás debido a ello, en muchos casos, la experiencia ha demostrado un excelente comportamiento de la estructura, debido a que ha sido diseñada de acuerdo con criterios sismorresistentes, pero por desgracia acompañado de una deficiente respuesta de los elementos no estructurales. Si se tiene en cuenta la seguridad de los ocupantes de un edificio y de los transeúntes expuestos al riesgo de colapso de tales elementos, así como el coste de reposición de los mismos y las pérdidas involucradas en la suspensión de funciones del edificio mismo, puede comprenderse la importancia de considerar adecuadamente el diseño sísmico de los elementos no estructurales dentro del proyecto general del edificio.

Un análisis de vulnerabilidad podría comenzar con una inspección visual de las instalaciones y con la preparación de un reporte preliminar de evaluación. Esta inspección permite identificar áreas que requieran atención. El reporte puede ser discutido con los consultores y las autoridades de la instalación con miras a definir las prioridades y los cronogramas para llevar a cabo el trabajo. Una vez que el programa de reforzamiento ha sido diseñado, otras revisiones y análisis deben desarrollarse en áreas específicas identificadas para ser intervenidas.

La mitigación de los efectos producidos por desastres mediante la adopción de medidas preventivas es una actividad altamente rentable en zonas donde se experimentan eventos recurrentemente. Por cada peso que se gaste adecuadamente en mitigación antes que ocurra un desastre, se ahorrarán enormes costos representados en pérdidas que no se sucedieron. La mitigación no tiene costo. A largo plazo, se paga en dinero real, y en vidas salvadas.

En todos los casos se ha demostrado la alta rentabilidad económica y social de mejorar el comportamiento no-estructural y estructural de las edificaciones hospitalarias vulnerables. El costo de una reestructuración, aunque puede considerarse alto en algunas ocasiones, siempre será un valor poco significativo en relación con el presupuesto del servicio o en relación con el costo de su reparación o reposición física. Unas buenas preguntas figurativas que podrían formularse en cada caso podrían ser, por ejemplo: el costo de llevar a cabo la reestructuración sería equivalente a ¿cuántos escanógrafos? y ¿cuántos escanógrafos tiene el hospital? Las respuestas podrían dar resultados sorprendentes, sin tener en cuenta todos los demás elementos, equipos y bienes que en general aloja la edificación; esto por supuesto sin tener en cuenta las vidas humanas involucradas directa o indirectamente y en general el costo social que significa la pérdida del servicio (Cardona y Hurtado 1996).

El diseño hospitalario teniendo en cuenta el riesgo es una responsabilidad compartida de la arquitectura y la ingeniería. Muy particularmente, es necesario enfatizar lo que se comparte en cuanto a las relaciones físicas entre las formas arquitectónicas y los sistemas estructurales resistentes, y sería ideal que la comprensión de estas relaciones estuviera presente en cada diseñador que trabaja en zonas de riesgo. Infortunadamente, a nivel internacional, los métodos educativos y de la práctica han tendido a reducir la oportunidad de fomentar este entendimiento en la manera de pensar del diseñador, ya que se separa la instrucción de los nuevos arquitectos de la de los nuevos ingenieros y, también en muchos casos, quedan separados en la práctica. De hecho, algunos arquitectos, por intuición o por un patrón conceptual tienen un excelente sentido de la estructura, pero son muy pocos, y esta comprensión afortunada tiende a ocurrir a pesar de su educación y práctica, y no a causa de éstas.

La pérdida de vidas y de propiedades causadas por sismos se puede evitar con la aplicación de tecnologías existentes y sin realizar enormes esfuerzos financieros. Lo único que se requiere es la voluntad de hacerlo. Debido a que se necesitan no menos de dos generaciones para reemplazar el actual inventario de edificaciones en la mayoría de comunidades, se debe prestar bastante atención a la intervención estructural de las edificaciones existentes tanto como la atención que se le otorga al diseño y construcción de nuevas edificaciones.

5.3.2. Índices de daño

Para estimar el daño estructural también se ha hecho uso de índices, que se han propuesto a nivel global y local (Williams *et al.* 1995; Aguiar y Barbat 1997). Los modelos de daño local son usados para precisar el nivel de daño en elementos estructurales individuales. Ha sido común, en estos casos, utilizar criterios tales como la capacidad estructural en términos de deformación y resistencia, la degradación, el daño acumulado en deformación, el daño acumulado en energía, como también indicadores tales como la ductilidad, la deformación, la energía inelástica, la curvatura y el daño basado en la fatiga. Algunos métodos hacen una aproximación del daño global a partir

del daño local utilizando criterios como la energía, la carga axial, y la ubicación del piso. Dentro de los parámetros utilizados para el cálculo directo del daño global es posible considerar la capacidad resistente en términos de deformación y corte basal, y parámetros vibracionales como la frecuencia y el período.

Existen metodologías que utilizan índices de daño local no acumulativos como la ductilidad, o índices en los que se correlaciona la degradación de la rigidez con el daño en la estructura. Otras utilizan la modelación de histéresis en la que se asocia el índice de daño con el ciclo histérico del elemento que se estudia. También se utilizan índices de deformación acumulada en la base o de energía, así como también índices combinados de deformación y energía absorbida (Bertero *et al.* 1991; Akiyama y Kitamura 1992; Faifar y Gasparic 1992; Bertero y Bertero 1993; Cardona y Hurtado 1995). Existen programas de análisis no lineal capaces de modelar el comportamiento histérico de un elemento de hormigón armado como el SARCF-II, DRAIN-2DX, y el IDARC entre otros. Este último evalúa índices de daño por elemento, piso y en forma global de toda la estructura, como se describe más adelante.

Otros métodos de evaluación utilizan índices de daño global en los que la calificación de daño depende de la distribución, severidad y localización del daño. En algunos casos se utiliza índices promedio, otros usan parámetros modales tales como la frecuencia y período. Los índices basados en el amortiguamiento relacionan los cambios en el período natural de la estructura con el nivel de daño que se presenta. El período se incrementa debido a la degradación de la rigidez y el aumento del amortiguamiento. Utilizando el método con índices de amortiguamiento se han obtenido gráficas como las que ilustra la figura 5.1 en la que se observa cómo se relaciona el daño que ocurre en la estructura con el amortiguamiento máximo de la misma obtenido a partir de la variación del período antes y después de producido el daño.

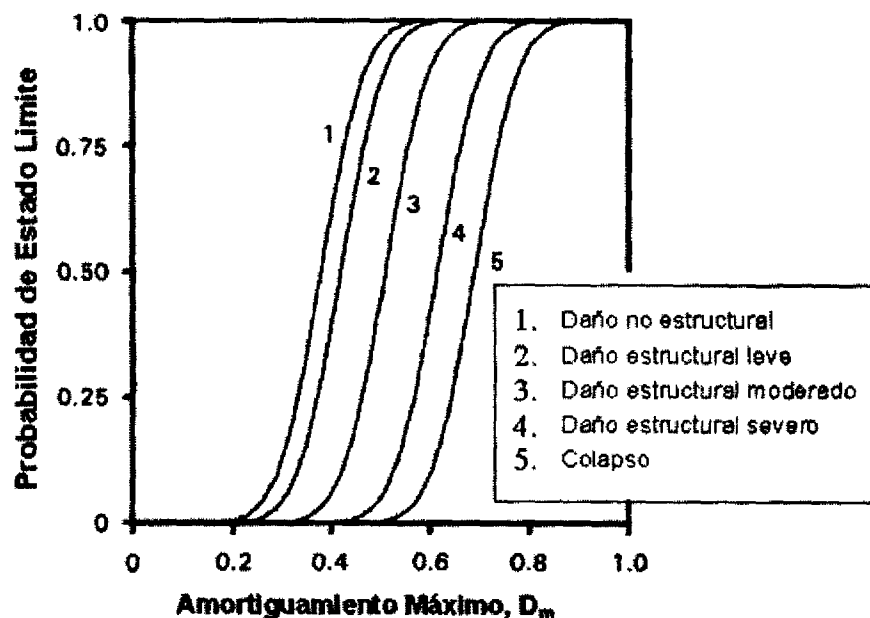


Figura 5.1: Relación entre Índices de Amortiguamiento y Daño Estructural

Uno de los métodos para el cálculo del índice de daño global es el propuesto por Aguiar y Barbat (1997) aplicable a estructuras de hormigón armado, en el cual se construye la curva de capacidad resistente de la estructura a partir de la geometría de la misma y del refuerzo de cada uno de sus miembros. Esta curva relaciona el corte basal V_0 con el desplazamiento en la parte superior del edificio D_i . Se define cuál es el estado de colapso, y el punto en el cual se forma la primera rótula plástica. A partir de este último punto se determina la rigidez equivalente del sistema K , el período fundamental de la estructura T_0 y la masa equivalente del sistema M . Utilizando el valor de T_0 en el espectro de diseño o de respuesta, con que se realiza el análisis, se obtiene el valor de la aceleración espectral elástica A_d asociada al período y a un amortiguamiento ζ . Se halla el valor de la frecuencia W_i con K y M . Finalmente, utilizando W_i y A_d es posible encontrar el desplazamiento en el borde superior del edificio D_i (la forma de hallar D_i varía según el tipo de estructura que se estudie). Con el valor obtenido se entra en la curva de capacidad resistente del pórtico y es posible determinar el estado de la estructura después de ocurrido un sismo de diseño (con A_d). Para el estado límite de colapso se determina el período límite T_u . Con las coordenadas asociadas al estado límite (V_{ou} y D_u) se halla la rigidez asociada al colapso. Finalmente, el índice de daño se puede hallar mediante el método propuesto por Ayala y Xianguo (1995) expresado mediante la siguiente ecuación:

$$I_D = \frac{T_{final} - T_0}{T_u - T_0} \quad [5.1]$$

Uno de los métodos actualmente más aceptados es el propuesto por Park y Ang (1985) que utiliza índices de daño locales. Este método es una combinación lineal del daño causado debido a deformaciones excesivas y el efecto de cargas cíclicas repetidas (Singhal y Kiremidjian, 1997). El índice utilizado se presenta en las ecuaciones 5.2 y 5.3.

$$D = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \frac{\beta}{P_y \delta_u} \int dE \quad [5.2]$$

$$D = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \beta \int \left(\frac{\delta}{\delta_u} \right)^\alpha \frac{dE}{E_c(\delta)} \quad [5.3]$$

donde

δ_m = Deformación máxima bajo un sismo,

δ_u = Capacidad de deformación última bajo cargas monotónicas,

P_y = Esfuerzo de fluencia calculado,

$E_c(\delta)$ = Energía histerética por ciclo a la deformación δ

α, β = Parámetros no negativos

δ = Amplitud de deformación en cada ciclo de oscilación

dE = Energía histerética incremental de disipación

El primer término de las expresiones para el índice de daño representa el daño debido a la deformación máxima experimentada durante la carga sísmica, y el segundo término representa el daño debido a la disipación de energía histerética acumulada. El valor del índice de daño, D , es 0 cuando no hay evidencia de daño, y es 1 para colapso. El modelo de Park y Ang ha sido ampliamente utilizado debido a que es sencillo y ha sido calibrado

usando información de estructuras dañadas durante sismos. Un método equivalente a este es el de Bertero (1991), que se plantea con la localización de rótulas plásticas en los extremos de los miembros. Este índice se expresa mediante la ecuación 5.4.

$$D = \frac{\theta_m}{\theta_u} + \frac{\beta}{M_y \theta_u} \int dE \quad [5.4]$$

donde:

θ_m = Rotación plástica máxima positiva o negativa

θ_u = Capacidad de rotación plástica bajo carga monotónica

β = Parámetro del modelo

M_y = Momento de fluencia calculado

dE = Incremento de energía histerética disipada

En este caso, el índice de daño del elemento estructural se calcula como el promedio ponderado de los índices de daño en los extremos.

Por otra parte, el índice de daño global de Park y Ang está definido como el promedio ponderado de los índices de daño locales de cada uno de los elementos. La función de ponderación para cada elemento es proporcional a la energía disipada en cada uno. La ecuación 5.5 corresponde a la expresión mediante la cual se calcula el índice de daño global

$$D_T = \sum_{i=1}^N \lambda_i D_i \quad [5.5]$$

donde:

$$\lambda_i = \frac{E_i}{\sum_{i=1}^N E_i}$$

N = Número de elementos

E_i = Energía disipada en el elemento i

De la misma manera es posible calcular índices de daño por piso, teniendo en cuenta solamente los elementos que pertenecen a un nivel en la edificación.

El programa Inelastic Damage Analysis of Reinforced Concrete, IDARC, (Park, Reinhorn y Kunnath 1987) fue desarrollado para la evaluación de estructuras de hormigón armado utilizando siguiendo el método para la estimación de índices de daño de Park, Ang y Wen (1985). Mediante este programa se puede realizar un análisis inelástico no-lineal y determinar la capacidad de ductilidad y disipación de energía de las estructuras, teniendo en cuenta el acero de refuerzo y el detallado del diseño original. El programa calcula el índice de daño tal como lo expresa la ecuación 5.6.

$$D = \frac{\mu + \beta(\mu_e - 1)}{\mu_u} \quad [5.6]$$

donde μ es la ductilidad máxima alcanzada por el elemento, μ_e es una medida de la energía disipada por el mismo y μ_u es la capacidad de ductilidad de la sección. El factor β

tiene en cuenta el grado de detallamiento dúctil de la sección y es calculado internamente por el programa, el cual adicionalmente calcula el índice de daño global por piso y de la estructura completa, ponderando con base en la energía disipada.

Este índice fue modificado posteriormente por Park, Ang y Wen (1987), por lo cual el planteamiento original de caracterización del daño sufrió algunos ajustes. Dicha caracterización se describe en la tabla 5.2

Tabla 5.2: Caracterización del daño para el Índice de Daño de Park, Ang y Wen

Estado de Daño	Índice de Park , Ang y Wen	Descripción del estado de daño
MENOR	$D < 0.1$	Agrietamiento localizado en algunos elementos estructurales.
	$0.1 \leq D < 0.25$	Agrietamiento ligero generalizado en toda la estructura.
MODERADO	$0.25 \leq D < 0.4$	Agrietamiento fuerte y pérdida del recubrimiento localizado en varios elementos estructurales.
SEVERO	$0.4 \leq D < 1.0$	Aplastamiento del concreto y exposición del refuerzo.
COLAPSO	$D \geq 1.0$	Colapso parcial o destrucción total del edificio.

Park, Ang y Wen sugirieron $D = 0.4$ como el umbral entre daño reparable e irreparable. Ang en 1993 recomendó usar un valor de $D = 0.8$ para representar el colapso. Este criterio ha sido usado en un amplio número de estudios de vulnerabilidad sísmica y modelos probabilistas. En versiones más recientes de IDARC, se utiliza una versión ligeramente modificada del índice de Park y Ang, similar a la propuesta por Bertero (1993), en la cual la deformación recuperable es removida del primer término y se utiliza el momento y la curvatura en vez de la fuerza y el desplazamiento, tal como lo expresa la ecuación 5.7.

$$D = \frac{\phi_m - \phi_y}{\phi_u - \phi_y} + \beta_e \frac{\int dE}{M_y \delta_u} \quad [5.7]$$

Después de un amplio estudio realizado sobre pilas de puentes, Stone y Taylor (1993), han sugerido para este índice considerar el colapso cuando $D > 0.77$.

Al igual que para los edificios, los índices de daño han sido un tema también ampliamente tratado en el campo de los puentes. Para el efecto se han desarrollado metodologías que involucran evaluaciones tanto cuantitativas como cualitativas, con el fin de priorizar o intervenir este tipo de estructuras que se reconoce como línea vital muy importante (Gómez-Seberón *et al.* 1999; Maldonado *et al.* 1999, 2000)

5.3.3. Funciones de daño o pérdida

Después de ocurrido un terremoto, en varios lugares del mundo, mediante la evaluación y registro del daño en los edificios ha sido posible proponer funciones que relacionan la severidad del sismo en cada lugar y el daño ocurrido en estructuras de un mismo tipo. Estas relaciones conocidas como funciones de vulnerabilidad empírica u observada expresan los daños o las pérdidas específicas para diferentes valores de amenaza sísmica. Uno de los objetivos de llevar a cabo la evaluación de los daños pos-terremoto mediante un procedimiento unificado ha sido -aparte de contribuir a la decisión de la posible ocupación o uso de los edificios afectados y al registro de los daños- aportar información consistente que contribuya a la obtención de las funciones de vulnerabilidad empírica (Petrovski *et al.* 1984; Milutinović y Petrovski 1985a; Coburn y Spence 1992; Spence 1993). La caracterización de los efectos, es decir el daño sísmico, usualmente se ha descrito en términos del costo de reparación, del porcentaje del daño o de un valor que califique el nivel de la pérdida específica. Los tipos de estructuras en general son clases de edificios, por ejemplo edificios de mampostería simple, de mampostería reforzada, pórticos en hormigón armado, etc. con otras posibles subdivisiones tales como: con diafragmas flexibles, con diafragmas rígidos, con muros de cortante, entre otros. También, con el fin de incluir los efectos locales, se han desarrollado funciones de vulnerabilidad para diferentes tipos de suelo, por ejemplo: sobre roca, sobre arcillas volcánicas, sobre suelos aluviales, etc.

Sin embargo, contar con una amplia y confiable base de información estadística no es una tarea fácil, pues se requiere de una cantidad muy notable de datos tanto de la intensidad sísmica y del nivel de daño causado para cada tipo de edificación. Aparte de ello, las tecnologías constructivas no son las mismas en cada país y hacen difícil poder usar información obtenida en terremotos ocurridos en diversos lugares. Por esta razón, también se han desarrollado con diferentes métodos funciones de vulnerabilidad teórica, las cuales han sido obtenidas de la modelación del comportamiento estructural de acuerdo con el estado actual del conocimiento en el tema (Sauter y Shah 1978; Esteve 1982; Steinbrugge 1982; Algermissen 1984; Corsanego 1985; Milutinović *et al.* 1985b; Cardona 1986a; Petrovski *et al.* 1990; Spence 1990; Cardona y Meyer 1991; Ordaz *et al.* 1994). Estas funciones, llamadas curvas de pérdidas o de fragilidad han sido, también, el resultado del desarrollo de matrices de daños (Whitman 1973) que proponen valores de probabilidad para cada nivel de daño en cada intensidad y para cada tipo o clase de edificio. Estas matrices se han desarrollado mediante la opinión de expertos utilizando técnicas como el método Delphi (Listone y Turoff 1975; ATC, 1985). Más recientemente, se han propuesto funciones basadas en índices de daños (Barbat 1998), distorsión de piso o deriva (Miranda 1996), u obtenidas mediante técnicas de simulación estocástica que relacionan el daño con la aceleración o el desplazamiento espectral (Singhal y Kiremidjian 1997; FEMA[HAZUS] 1999; Hurtado 1998; Bonett *et al.* 2001).

En evaluaciones pos-terremoto de edificios se han utilizado recientemente diferentes calificaciones de daño. La caracterización utilizada en algunos métodos se presenta en la tabla 5.3. Algunos métodos proponen una calificación del daño basada en los signos visibles del daño en la estructura, como el propuesto por Park, Ang y Wen (1987). Sin embargo, en algunos casos no es claro a qué se refieren con palabras tales como severo o moderado, situaciones que pueden tener diferentes interpretaciones.

Tabla 5.3: Caracterización de daño para diferentes métodos de calificación.

Método	Calificación del Daño	Descripción
Park, Ang y Wen (1987)	NINGUNO	Fisuras menores localizadas
	MENOR	Fisuras menores generalizadas
	MODERADO	Agrietamientos localizados en el concreto.
	SEVERO	Aplastamiento del concreto y exposición de las barras de refuerzo
	FUERTE	Colapso total o parcial
Stone y Taylor (1993)	SIN DAÑO O DAÑO MENOR	
	REPARABLE	
	IRREPARABLE	
	COLAPSO	
EERI (1994)	NINGUNO	Sin daño
	LEVE	Daño menor no estructural, el edificio puede abrirse en menos de una semana
	MODERADO	En su mayoría daño no estructural y pocos daños estructurales. El edificio puede ser reabierto en tres meses, se presenta riesgo menor de pérdida de vida para los ocupantes.
	FUERTE	Daño estructural generalizado. El edificio puede estar cerrado por largo tiempo, es posible que sea necesaria su demolición, se presenta un alto riesgo de pérdida de vida para los ocupantes.
	TOTAL	Colapso parcial o total, daño irreparable. Se presenta un riesgo muy alto de pérdida de la vida de los ocupantes.
EERI (1996)	NINGUNO	Sin daño
	LEVE	Solamente daño no estructural, el costo de las reparaciones es menor al 5% del valor de venta del edificio.
	MODERADO	Daño no estructural considerable y daño estructural leve. Los costos de reparación son menores al 25% del valor de venta del edificio.
	FUERTE	Daño estructural considerable, daño no estructural fuerte. Los costos de reparación son menores al 50% del valor de venta del edificio.
	SEVERO	Es más económico demoler que reparar.
	TOTAL	Colapso estructural.

Para mejorar la clasificación, algunos consideran que se podría tener en cuenta el origen del tipo de grieta que se presenta (flexión, cortante, adherencia) y el tamaño de la misma, sin embargo esto puede hacer más compleja la evaluación. Otro tipo de caracterización del daño tiene en cuenta el nivel de reparabilidad de las estructuras (Bracci 1989), (Stone y Taylor 1993). En este tipo clasificación se involucran no solamente factores estructurales o de seguridad, sino también factores de orden económico, relacionados con el costo de reparación. Otras clasificaciones tienen en cuenta el daño sufrido por los elementos no estructurales, la pérdida de funcionalidad y el riesgo para los ocupantes.

La caracterización del daño, obtenido mediante técnicas analíticas o como resultado de la observación de los efectos de los terremotos sobre las estructuras ha contribuido a la calibración de funciones de pérdidas o de vulnerabilidad. Sin embargo, en los últimos años se han diferenciado dos tipos de curvas: de fragilidad y de capacidad.

Las primeras se usan para estimar la probabilidad de alcanzar o exceder estados de daño específicos para un determinado nivel de respuesta sísmica. La probabilidad de alcanzar un estado de daño, mediante esta técnica, se calcula con la diferencia entre las curvas de fragilidad (Kircher *et al.* 1997). Para el desarrollo de estas funciones, normalmente, se ha hecho primero una clasificación de los edificios según su sistema estructural, su uso, altura, etc. En algunos casos, estas funciones predicen el daño en forma separada sobre el sistema estructural, los elementos no estructurales sensibles a inclinaciones (como muros divisorios) y sensibles a la aceleración (como techos suspendidos). En general, para estas funciones se definen cuatro niveles de daño: Leve, Moderado, Fuerte y Total. Por lo tanto, las curvas de fragilidad son, en síntesis, funciones que describen la probabilidad de alcanzar o exceder un nivel de daño estructural o no estructural, dado un valor determinístico de respuesta, como de desplazamiento espectral. Un ejemplo de este tipo de curva se ilustra en la figura 5.2.

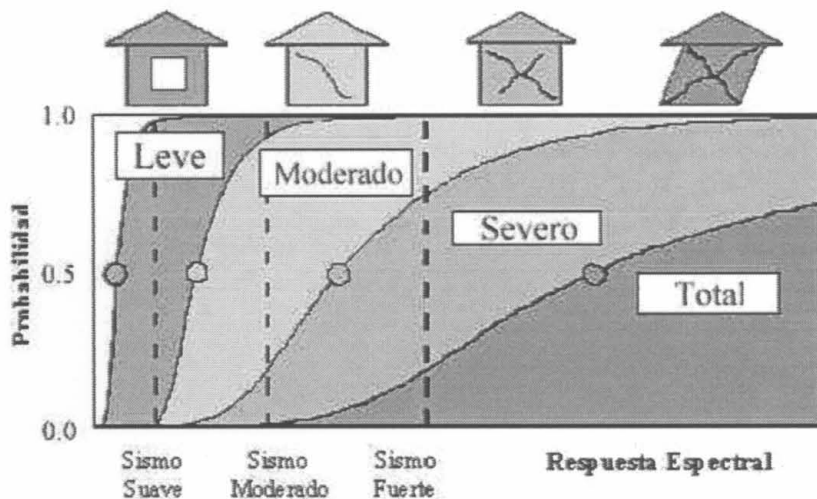


Figura 5.2: Curvas de fragilidad para daño leve, moderado, severo y total (Kircher *et al.*, 1997).

Las segundas se usan para estimar la respuesta de un edificio ante un nivel dado de aceleración espectral o demanda sísmica. Las curvas de capacidad son gráficas de la resistencia a carga lateral del edificio vs. desplazamiento lateral. Mediante este tipo de curvas es posible identificar la capacidad a la fluencia y la capacidad última de una estructura. Existen varias formas de hallar las curvas de capacidad. Una de ellas es el análisis *pushover* o “paso a paso”, en el cual se aplica una carga lateral a la estructura mediante incrementos en forma paulatina. Para cada incremento de carga se determina el desplazamiento, teniendo en cuenta el comportamiento no lineal, obteniéndose así la curva de capacidad o la relación fuerza-deformación para una estructura. Es decir, la gráfica de la fuerza cortante total y del desplazamiento lateral asociado con cada incremento, hasta que la estructura alcanza el estado límite o condición de colapso. La figura 5.3 ilustra el concepto del “pushover”.

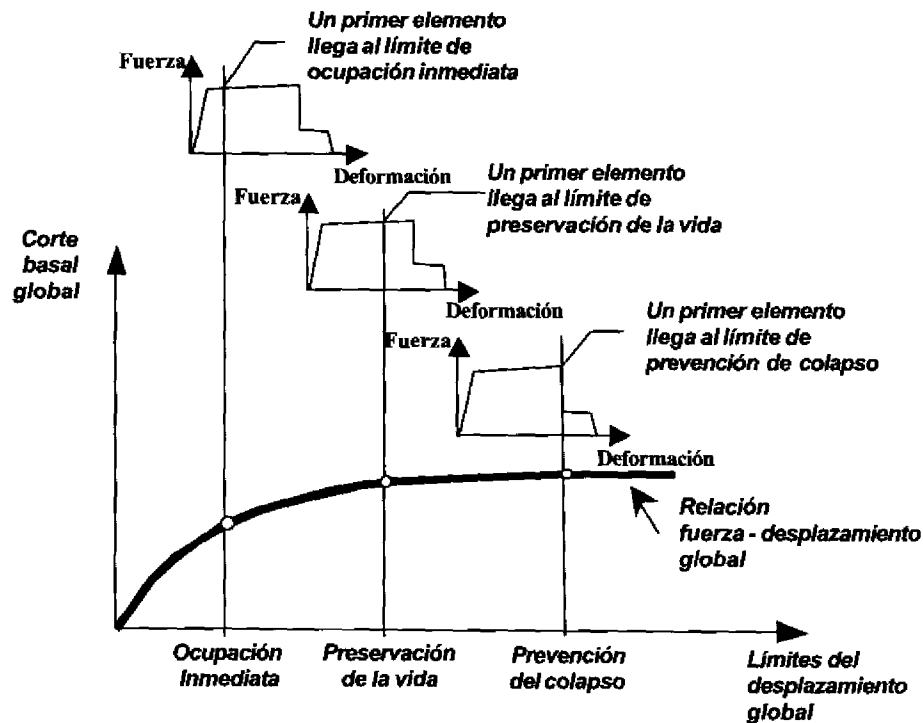


Figura 5.3: Planteamiento conceptual del “pushover” (FEMA, 1997)

De esta manera se pueden identificar las fuerzas o desplazamientos en que se inicia la fluencia e incluso el colapso de la estructura. La respuesta del edificio es determinada por la intersección del espectro de demanda con la curva de capacidad, como se ilustra en la figura 5.4. Un análisis de este tipo permite estimar la respuesta o el daño probable en estructuras existentes o revisar el diseño de edificios nuevos que estarán sometidos a sismos fuertes.

El espectro de demanda se utiliza reducido dado que se espera un aumento del amortiguamiento en la estructura estudiada. En la figura 5.5 se ilustra un ejemplo de los espectros de demanda para diferentes niveles de amortiguamiento de acuerdo con la duración del sismo.