

Capítulo 2

Estado del arte y aspectos conceptuales

2.1. Introducción

A pesar de los avances realizados en las últimas décadas en la ingeniería sísmica y estructural, las pérdidas debidas a terremotos han ido en aumento. Muchas estructuras han sido construidas sin tener en cuenta ningún diseño antisísmico y a pesar que, hoy en día, los códigos sísmicos son más exigentes, el crecimiento de población en zonas sísmicas contribuye al aumento del riesgo. Existen varios métodos, desarrollados en años recientes, para evaluar la vulnerabilidad y el daño de las estructuras, considerando diferentes criterios.

El objetivo del presente capítulo es presentar los conceptos fundamentales relacionados con la acción sísmica y la respuesta estructural de los edificios. En primer lugar, se incluyen una serie de definiciones involucradas en el contenido global de la tesis. A continuación se describen los principales conceptos y fundamentos asociados con la medida de los terremotos, con la respuesta estructural, así como también con la evaluación de la vulnerabilidad, el riesgo y el daño sísmico. En este sentido, se presentan algunos de los diferen-

tes índices de daño propuestos por diferentes investigadores para evaluar el nivel de degradación que sufren las estructuras, especialmente los edificios, cuando soportan acciones sísmicas. Finalmente, se presentan los métodos de evaluación del diseño sísmico basado en desempeño.

El análisis y diseño basado en el comportamiento esperado o desempeño, conocido en la literatura inglesa como *performance based engineering (PBE)*, se ha convertido en una disciplina de gran importancia en la ingeniería estructural moderna y, sobre todo, en la ingeniería sísmica, sobre la cual se está basando, actualmente el desarrollo de una nueva generación de normativas. Su ámbito de aplicación ha trascendido el diseño de edificios nuevos para también emplear sus conceptos y métodos en la predicción del comportamiento de edificios existentes. Los estudios de vulnerabilidad sísmica son de vital importancia para la predicción y prevención del daño sísmico esperado.

De particular interés es la aplicación de este tipo de técnicas en zonas de sismicidad moderada donde el desarrollo de las ciudades y de los entornos urbanos ha significado un aumento del riesgo sísmico. En regiones de alta concentración de valor pero con una peligrosidad sísmica moderada a baja, es usual el abandono de costumbres constructivas que protejan los edificios de posibles acciones sísmicas, puesto que no existe conciencia popular ni institucional de la amenaza sísmica. Esta baja memoria y conciencia sísmicas llevan a un escaso rigor en la aplicación de las normativas existentes que, en muchos casos, no son de obligado cumplimiento (Moreno et al., 2004 a).

2.2. Conceptos básicos

Siempre es importante definir palabras y conceptos. En esta sección, se presentan algunas definiciones relacionadas con la acción sísmica, a la que nos solemos referir también como terremoto, amenaza o demanda sísmica, con la vulnerabilidad y capacidad estructural de los edificios y con el daño.

Los *terremotos* son movimientos de la Tierra causados por la liberación brusca de energía acumulada durante largos períodos de tiempo. Básicamente se conocen tres tipos de terremotos, los tectónicos, los volcánicos y los artificiales. En este trabajo se hace referencia a los sismos más destructivos, *los tectónicos*.

Distancia epicentral, es la distancia entre un observador y el epicentro de un sismo, medida sobre la superficie de la Tierra.

Epicentro, es el punto en la superficie de la Tierra ubicado directamente sobre el foco o hipocentro. Es, generalmente, el sitio en la superficie terrestre donde la intensidad del terremoto es mayor. Sin embargo, el epicentro puede no coincidir con el punto en el cual la mayoría de los daños ocurren. La ruptura de falla puede tener millas de longitud y las ondas se generan a lo largo de toda la longitud de la falla. Las características de la falla y del medio de propagación así como, la geología local pueden hacer que el punto de mayor intensidad no coincida con el epicentro, figura 2.1. D: distancia epicentral, R: distancia hipocentral y H: profundidad.

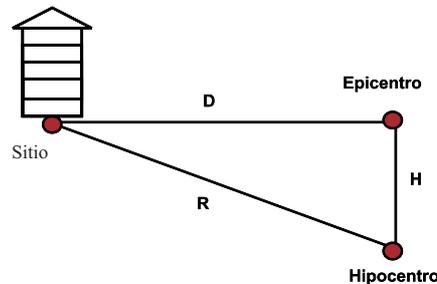


Figura 2.1: Relación geométrica.

Hipocentro o Foco, es el punto, en el interior de la Tierra, donde se libera la energía de un terremoto, es decir, es donde se da inicio a la ruptura de la falla que genera un sismo, figura 2.1. Cuando ocurre en la corteza de la Tierra (hasta 70 km de profundidad) el sismo se denomina superficial. Si ocurre entre los 70 y los 300 km se denomina intermedio y si es de mayor profundidad: profundo.

Hora o tiempo origen, corresponde al instante en que se produce la relajación súbita de los esfuerzos, es decir, el momento en que se inicia la ruptura en el foco. Ésta puede ser referida a la hora local u hora estandarizada universal (UTC: *coordinated universal time*, también conocida como GMT: *Greenwich mean time*).

Precursores, temblores pequeños que suelen ocurrir con anterioridad a un sismo principal.

Réplicas, después que se produce un terremoto grande, suelen ocurrir muchos sismos de menor tamaño en la vecindad del hipocentro del sismo principal.

Intensidad, es una medida cualitativa o cuantitativa de la severidad de un movimiento sísmico en un sitio específico. La medida de intensidad instrumental cuantitativa incluye parámetros ingenieriles, tales como la aceleración pico (*peak ground acceleration*), la velocidad pico (*peak ground velocity*), la intensidad espectral *Housner* y el espectro de respuesta. La intensidad macrosísmica se define en función de los efectos y daños observados. Las escalas en uso hoy en día son EMS-98, MM y JMA. La intensidad depende del lugar de observación.

Magnitud, es una medida cuantitativa del tamaño de un terremoto; está relacionada con la energía liberada en el foco. Es independiente del lugar de observación. La escala conocida es la de Richter, la cual es una escala logarítmica.

Peligrosidad sísmica, es la amenaza impuesta por fenómenos naturales que pueden causar a la humanidad impacto social negativo, pérdidas humanas y económicas severas. Se define como la probabilidad de que una medida escalar de intensidad sísmica seleccionada en un sitio, exceda un valor dado en un intervalo de tiempo determinado (Pinto et al., 2004).

Vulnerabilidad sísmica, cuantifica la sensibilidad o resistencia de una estructura a las acciones sísmicas, se suele calificar mediante un índice que toma valores de 0, muy resistente, a 1, muy vulnerable. La vulnerabilidad o fra-

gilidad sísmica se define como el grado de daño (en una estructura) debido a la ocurrencia de un sismo de intensidad dada (Pinto et al., 2004). En este estudio se evalúa la vulnerabilidad de los edificios en términos de curvas de capacidad y curvas de fragilidad.

Riesgo sísmico, puede definirse en términos técnicos, como la probabilidad de pérdida o daño. El riesgo se define como la probabilidad incondicional de exceder un estado límite dado, durante un tiempo de exposición (Pinto et al., 2004). El riesgo es debido a la contribución de tres factores: peligrosidad, valor expuesto y vulnerabilidad del valor expuesto. La reducción de la vulnerabilidad repercute en una disminución del riesgo.

Preparación, es el conjunto de medidas que deben implementarse antes de que se presente un desastre.

Plan de emergencia, es un conjunto de medidas a aplicar antes, durante y después de la ocurrencia de un desastre.

Plan de mitigación, cualquier acción preventiva que se hace antes de la ocurrencia de un desastre, con el objetivo de reducir sus consecuencias.

Espectro de respuesta, es una curva que da la respuesta máxima de un sistema de un grado de libertad en función de una característica estructural, su forma más usual viene dada por el período o la frecuencia, en el eje de abscisas y en el eje de ordenadas, la aceleración máxima del sistema. El formato ADRS se ha hecho también popular y en él se representa el desplazamiento espectral en abscisas y la aceleración espectral en ordenadas.

Acelerograma, es una representación de las aceleraciones registradas en el terreno en función del tiempo.

Ergodicidad, se puede demostrar que, cuando un proceso estocástico cumple ciertas condiciones, es posible estimar consistentemente sus características a partir de una realización del mismo. Los procesos que cumplen tales condiciones se denominan ergódicos. Por ejemplo, un proceso estocástico estacionario

es ergódico en la media si es posible estimar consistentemente este parámetro haciendo uso de la media muestral temporal. De forma análoga puede hablarse de ergodicidad respecto a la autocovarianza. En general, las condiciones de ergodicidad se cumplen para la clase de procesos que nos interesan.

Estocástico, perteneciente o relativo al azar. Teoría estadística de los procesos, cuya evolución en el tiempo es aleatoria.

Probabilista, relativo a la probabilidad.

Para describir el desplazamiento de un edificio, se utilizan varios términos con diferentes significados. Las siguientes definiciones describen estos términos y su significado, figura 2.2 (FIB, 2003).

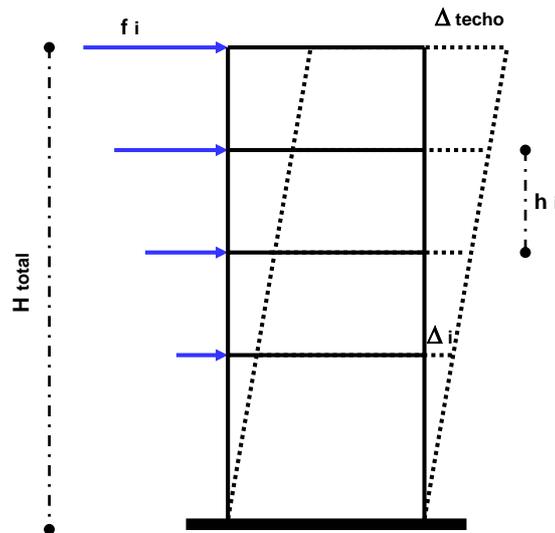


Figura 2.2: Definición de derivas de piso.

Desplazamiento en el techo (Δ_{techo}): es el desplazamiento lateral en el último piso del edificio con respecto a la base, figura 2.2.

Deriva de entrepiso (Δ_i): es el desplazamiento horizontal entre dos pisos adyacentes, figura 2.2.

Deriva (δ_i): corresponde a la deriva de entrepiso dividida por la altura del

piso (h_i), $\delta_i = \frac{\Delta_i}{h_i}$, figura 2.2.

Deriva promedio (δ_{prom}): corresponde al desplazamiento en el techo dividido por la altura total del edificio (H_{total} , $\delta_{prom} = \frac{\Delta_{techo}}{H_{total}}$), figura 2.2.

Los términos de riesgo, peligrosidad y vulnerabilidad están altamente relacionados y antes de su uso, se debe encontrar una definición estándar que permita distinguirlas. Algunos comités y trabajos científicos se han encargado de establecer definiciones, dentro del área de la ingeniería sísmica, que permiten aclarar las diferencias existentes. Entre otros comités se encuentran el Instituto de Investigaciones en Ingeniería Sísmica (*EERI*), la Asociación Europea de Ingeniería Sísmica (*EAAE*), la Comisión de Seguridad Sísmica de California (*CSSC*), el Servicio Geológico de los Estados Unidos (*USGS*) y en los trabajos científicos están Dolce et al. (1994), Yépez (1996) y (Mena, 2002). En este trabajo, estos conceptos deben entenderse tal y como se han definido más arriba.

A continuación se presentan unas definiciones de la terminología empleada en el desarrollo de la tesis:

Hormigón o Concreto, material artificial utilizado en ingeniería que se obtiene mezclando cemento Portland, agua, algunos materiales bastos como la grava y otros refinados, y una pequeña cantidad de aire. Material de construcción formado por una mezcla de piedras menudas y argamasa. En la mayoría de los trabajos de construcción, el hormigón se refuerza con armaduras metálicas, sobre todo de acero; este hormigón reforzado se conoce como *hormigón armado*.

Armado (da), que lleva una armadura metálica en su interior.

Reforzado (da), que tiene refuerzo.

Hormigón armado, es reforzado interiormente por una armadura de barras de hierro o acero para, una vez fraguado, absorber los esfuerzos de tracción

a que pueda ser sometido.

Mampostería, obra hecha con mampuestos colocados y ajustados unos con otros sin sujeción a determinado orden de hiladas o tamaños.

Fábrica, construcción o parte de ella hecha con piedra o ladrillo y argamasa: pared de fábrica.

Pared, obra de fábrica, levantada a plomo, de dimensiones proporcionadas para cerrar un espacio o sostener las techumbres. Tabique, muro.

Ladrillo, masa de arcilla cocida en forma de prisma, usada en albañilería.

Bloque, paralelepípedo de hormigón en forma de sillar que se usa en la construcción. Trozo grande de piedra o de madera sin labrar. En las poblaciones: manzana o cuadra de casas.

En este trabajo, al hablar de edificios de hormigón se está haciendo referencia al término de hormigón armado y en cuanto a los edificios de obra de fábrica de ladrillo se habla de fábrica de ladrillo o mampostería sin reforzar (armar).

2.3. Métodos de análisis sísmicos

La mayoría de los códigos sísmicos actuales y el diseño sismorresistente están basados en el análisis elástico de las estructuras. Estos procedimientos incluyen análisis estático y dinámico, los cuales son utilizados en los análisis de la fuerza lateral equivalente, el análisis del espectro de respuesta, en el análisis modal y en el análisis elástico de historias en el tiempo. Para tener en cuenta la incursión de la estructura en el rango no lineal, los códigos sísmicos incluyen un factor de reducción o de comportamiento para reducir el espectro elástico equivalente, el cual depende del tipo de estructura. Estos métodos están bien documentados en la literatura de la ingeniería sísmica y son extensamente usados. Cuando la respuesta inelástica o no lineal es importante,

el análisis elástico debe usarse con precaución (SEAOC, 1995).

En un análisis lineal, las propiedades estructurales, tales como la rigidez y el amortiguamiento, son constantes, no varían con el tiempo. Todos los desplazamientos, esfuerzos, reacciones, son directamente proporcionales a la magnitud de las cargas aplicadas. En un análisis no lineal las propiedades estructurales pueden variar con el tiempo, la deformación y la carga. La respuesta suele no ser proporcional a las cargas, ya que las propiedades estructurales suelen variar. En el análisis no lineal no es aplicable el principio de superposición, por lo tanto, sólo es posible realizar análisis estático paso a paso o de historias en el tiempo.

2.3.1. Análisis estático lineal

La estructura es modelada como un sistema equivalente de uno o varios grados de libertad (gdl) con una rigidez elástica lineal y un amortiguamiento viscoso equivalente. La acción sísmica de entrada es modelada por una fuerza lateral equivalente, con el objetivo de producir los mismos esfuerzos y deformaciones que el terremoto que ésta representa. Basados en el primer modo de vibración del edificio (modo predominante), la fuerza lateral es distribuida en la altura del edificio y las correspondientes fuerzas y desplazamientos internos son calculados usando el análisis elástico lineal.

2.3.2. Análisis dinámico lineal

La estructura es modelada como un sistema de uno o varios grados de libertad, con una matriz de rigidez elástica lineal y una matriz de amortiguamiento viscoso equivalente. La acción sísmica de entrada es modelada usando un análisis modal o bien un análisis de historias en el tiempo (*time-history*). El análisis modal supone que la respuesta dinámica de un edificio puede ser estimada a partir de la respuesta independiente de cada modo natural de

vibración usando el espectro de respuesta elástico lineal. Solamente se consideran los modos que contribuyen de forma significativa a la respuesta de la estructura. La mayoría de los códigos sísmicos requieren que se incluyan suficientes modos de vibración como para movilizar un 90 % de la masa efectiva. El análisis de historias en el tiempo implica una evaluación paso a paso de la respuesta del edificio, usando registros reales o acelerogramas artificiales como movimiento de entrada. En ambos casos, tanto las correspondientes fuerzas como los desplazamientos internos se calculan usando un análisis lineal elástico.

2.3.3. Análisis estático no lineal

Se basa en el análisis estático considerando la respuesta no lineal de los materiales. Existen muchos métodos para efectuar este tipo de análisis (ver por ejemplo *ATC-40*, *FEMA-273*) pero todos ellos tienen en común que las características no lineales (*fuerza-deformación*) de la estructura, son representadas por una curva de capacidad (*pushover*).

El máximo desplazamiento que, probablemente, puede ser experimentado durante un sismo dado, es determinado usando espectros de respuesta inelásticos. La gran ventaja de este método con respecto al análisis lineal es que directamente tiene en cuenta los efectos de la respuesta no lineal del material (mientras que en el análisis lineal esto se debe tener en cuenta de forma aproximada, mediante el factor de comportamiento o de reducción del espectro) y, por lo tanto, el cálculo de las fuerzas internas y desplazamientos serán más representativos de los esperados durante un sismo.

2.3.4. Análisis dinámico no lineal

Con este método la estructura es modelada de manera similar al análisis dinámico lineal, pero incorporando directamente la respuesta inelástica del

material. La principal diferencia es que el sismo de entrada, sólo puede ser modelado usando una función de historias en el tiempo, el cual implica una evaluación paso a paso de la respuesta del edificio. Es la técnica de análisis más sofisticada disponible. Es posible incluir la participación de los componentes no estructurales y, además, se puede incluir la interacción suelo-estructura.

Esta técnica requiere el uso de programas computacionales sofisticados de análisis no lineal en 2D ó 3D y los resultados deben ser utilizados cuidadosamente, debido a las posibles incertidumbres existentes en el modelo, así como también, en la representación de la acción sísmica.

La respuesta puede ser muy sensible a las características del sismo de entrada, por lo tanto, se requieren varios análisis de historias en el tiempo usando diferentes registros de acelerogramas. Este tipo de análisis para predecir las fuerzas y desplazamientos bajo un movimiento sísmico es muy costoso. El principal valor de un análisis dinámico no lineal es que constituye una potente herramienta de investigación, que permite simular el comportamiento de una estructura en detalle, es decir, para describir los desplazamientos esperados así como la distribución y propagación del daño, la distribución de esfuerzos verticales y de cortante y la forma de la curva histerética.

2.3.5. Curvas y espectros de capacidad

La capacidad de una estructura es representada por una *curva de capacidad*. La curva de capacidad es la relación entre la resistencia de carga lateral de una estructura y su desplazamiento lateral característico (Kircher et al., 1997). La curva de capacidad es obtenida, típicamente, por medio de un análisis estático no lineal, conocido también como *análisis pushover*.

La curva de capacidad (desplazamiento-fuerza) es convertida a aceleración y desplazamiento espectral, dando origen a una nueva curva llamada *espectro de capacidad*. Esta transformación de la curva de capacidad a coordenadas

espectrales es realizada para poder ser comparada con el espectro de demanda. Una forma de transformar la curva de capacidad a espectro de capacidad es la siguiente:

$$S_a = \frac{V/W}{\alpha_1} \quad (2.1)$$

$$S_d = \frac{\Delta_{techo}}{PF_1 * \phi_{1,techo}} \quad (2.2)$$

donde S_a , S_d son la aceleración y el desplazamiento espectral, respectivamente, V es el cortante basal, W es el peso total, α_1 es la masa efectiva del primer modo de vibración, Δ_{techo} es el desplazamiento en el último piso, PF_1 es el factor de participación modal y $\phi_{1,techo}$ es el desplazamiento modal en la última planta del edificio.

La figura 2.3 muestra un ejemplo del espectro de capacidad de un edificio y el espectro de demanda.

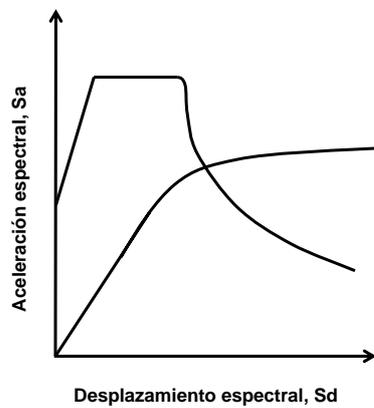


Figura 2.3: Espectro de capacidad y demanda.

El punto de desempeño es obtenido para una tipología de edificio dada, definida por el sistema estructural. Este punto corresponde a la intersección de los espectros de capacidad y demanda.

2.4. Respuesta dinámica de estructuras

La respuesta dinámica se suele caracterizar principalmente por medio de la aceleración y del desplazamiento de respuesta de un sistema estructural sujeto a movimientos sísmicos. Las propiedades de una estructura, tales como la rigidez, la masa, la resistencia y el amortiguamiento, influyen en la respuesta dinámica y en el desempeño esperado.

2.4.1. Sistema de un grado de libertad

El sistema más sencillo y fundamental es el de un oscilador simple, el cual está representado por una masa soportada por un elemento estructural vertical (columna).

Este sistema se utiliza para estudiar la respuesta de un sistema de un grado de libertad (*SDOF: single-degree-of-freedom*). En el sistema idealizado, la masa (m) representa el peso del sistema dividido por la aceleración de la gravedad, y el pilar representa la rigidez (k).

La segunda ley de Newton establece que la fuerza de inercia desarrollada en la masa durante un instante de tiempo, es proporcional al producto de la masa (m) por su aceleración (\ddot{x}).

La amplitud de vibración libre, en ausencia de fuerzas externas, decae con el tiempo, indicando que existe un mecanismo que disipa la energía. La disipación de energía puede ser explicada por la fricción de los miembros en movimiento, la viscosidad de los materiales, la disipación de la energía histerética durante la respuesta inelástica, pero realmente, aún hoy en día, la fuente real no está claramente identificada. En cualquier caso, la disipación de la energía dentro de una estructura causa una vibración libre amortiguada y una cantidad de amortiguamiento viscoso equivalente (c) que englobe los anteriores efectos.

La ecuación dinámica de equilibrio se escribe como:

$$m(\ddot{u}) + c(\dot{u}) + ku = -m(\ddot{x}_o) \quad (2.3)$$

donde \ddot{x}_o es la aceleración del terreno correspondiente al registro obtenido por un acelerómetro durante un terremoto, (\ddot{u}) , (\dot{u}) , (u) , son los vectores de aceleración, velocidad y desplazamiento relativos al movimiento del terreno. La ecuación (2.3) indica que el sistema que es excitado en su base por un movimiento sísmico, es equivalente a un sistema fijado en la base que tiene unas cargas dinámicas aplicadas en su masa.

La frecuencia angular propia (ω) de este sistema viene dada como:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (rad/seg) \quad (2.4)$$

Suponiendo una respuesta elástica lineal, la aceleración pico absoluta y el desplazamiento de respuesta relativo para un movimiento sísmico, puede ser calculado en función del período de vibración ($T = 2\pi/\omega$) y del amortiguamiento viscoso.

2.4.2. Sistema de varios grados de libertad

La formulación de equilibrio dinámico para un sistema SDOF (ecuación 2.3), puede ser extendida a un sistema con múltiples grados de libertad (*MDOF: multiple-degree-of-freedom*). Las estructuras típicas en la ingeniería civil no son siempre esquematizadas como SDOF, sino que se necesitan modelar como MDOF. Por ejemplo, los edificios de varios pisos son analizados como sistemas MDOF.

La ecuación dinámica de equilibrio del sistema MDOF se escribe como:

$$[M](\ddot{u}) + [C](\dot{u}) + [K](u) = -[M][\gamma](\ddot{x}_o) \quad (2.5)$$

donde $[M]$, $[C]$ y $[K]$ son, respectivamente, las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez del sistema,

\ddot{x}_o es el vector que contiene la aceleración sísmica en la base de la estructura y $[\gamma]$ es una matriz auxiliar usada para distribuir la aceleración basal en los grados de libertad correspondientes.

En el caso de edificios de varios pisos, con forjados rígidos, es posible esquematizar la estructura considerando una sola masa concentrada en cada piso, obteniendo así el mínimo número de grados de libertad. En este caso hipotético, un edificio de n plantas, con diafragma horizontal, infinitamente rígido en su plano, y columnas infinitamente rígidas axialmente, puede ser descrito con sólo tres grados de libertad por piso (2 traslacionales y 1 rotacional).

2.4.3. Espectros de respuesta

Las características de un registro sísmico dado, son a menudo representadas por su espectro de respuesta, el cual relaciona un parámetro de respuesta dado con el período natural. El parámetro de respuesta puede ser la aceleración, la velocidad o el desplazamiento.

Un espectro de respuesta da la respuesta máxima amortiguada de todos los posibles sistemas de un grado de libertad lineales, usando la frecuencia natural o el período y el amortiguamiento para describir el sistema.

La definición del espectro de respuesta de desplazamiento es

$$S_d(T, \xi) = |u|_{max} \quad (2.6)$$

El valor del desplazamiento del espectro de respuesta (para un período de vibración T y un coeficiente de amortiguamiento ξ) es el máximo desplazamiento relativo u , en valor absoluto, que un sistema SDOF sostenga cuando es sujeto al acelerograma en estudio.

El espectro de respuesta de velocidad viene dado por:

$$S_v(T, \xi) = |\dot{u}|_{max} \quad (2.7)$$

y el espectro de respuesta de aceleración por:

$$S_a(T, \xi) = |\ddot{u} + \ddot{x}_o|_{max} \quad (2.8)$$

Para amortiguamientos pequeños, vale la siguiente relación entre los diferentes espectros de respuesta:

$$S_d(T, \xi) \equiv \frac{S_v(T, \xi)}{\omega} \equiv \frac{S_a(T, \xi)}{\omega^2} \quad (2.9)$$

Los espectros de respuesta utilizados en el presente trabajo están definidos, detalladamente en el *Capítulo 3*.

2.5. Peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo sísmico

2.5.1. La peligrosidad sísmica

La peligrosidad sísmica de un lugar se relaciona con los efectos provocados por los sismos en dicha zona (Bertero, 1992). Estos efectos se pueden representar por medio de la aceleración, la velocidad, el desplazamiento o por la intensidad sentida en el sitio. La peligrosidad sísmica es definida como la probabilidad de que ocurra un sismo en una zona determinada durante un tiempo específico (Yépez, 1996).

Es imprescindible una buena definición de la peligrosidad sísmica para poder estimar adecuadamente el nivel de pérdidas esperadas a causa de un sismo. El análisis de la peligrosidad sísmica es previo al estudio del riesgo sísmico.

Una primera decisión consiste en la selección del parámetro que expresa el tamaño del sismo y la forma de expresar la peligrosidad sísmica en función de ese parámetro. Existen varias metodologías para realizar una evaluación global de la peligrosidad sísmica en una región. La diferencia entre éstas

metodologías radica en los parámetros considerados y en los procedimientos utilizados, los cuales están relacionados con las fuentes sísmicas y con la evaluación de la propagación de la energía. Los algoritmos más utilizados para realizar esta evaluación son los de Cornell y McGuire (McGuire, 1978). Muchos investigadores opinan que lo más importante es la preparación cuidadosa de los datos, por encima de los métodos utilizados. Más recientemente, los estudios de peligrosidad sísmica ya se basan en valores espectrales (Fleta et al., 1996).

El objetivo de la evaluación de la peligrosidad sísmica a escala local, consiste en estimar la probabilidad anual de que ocurra un sismo de un tamaño dado. Se suele dar también en términos de período de retorno o probabilidad de ocurrencia en un período dado.

En este estudio la acción sísmica se define mediante espectros de respuesta y acelerogramas artificiales compatibles con los espectros de respuesta. Las acciones sísmicas consideradas corresponden a períodos de retorno de 500 años o a unas probabilidades de ocurrencia del 10 % en 50 años.

Se usarán las funciones espectrales proporcionadas por la norma sísmica española (1998; 2002) y el eurocódigo 8 (1998). Los espectros específicos para Barcelona fueron desarrollados por el Instituto Cartográfico de Cataluña (Irizarry, 2004).

2.5.2. La vulnerabilidad sísmica

Los edificios son estructuras vulnerables a los sismos. Mientras se realiza un análisis del riesgo sísmico del sistema estructural, es imprescindible poder identificar la vulnerabilidad sísmica asociada a los diferentes estados de daño. El desarrollo de la vulnerabilidad, en forma de curvas de fragilidad, representan un desafío técnico importante. Estas curvas se definen tradicionalmente como probabilidades.

No existe una metodología estándar para estimar la vulnerabilidad sísmica de los edificios, ni de las estructuras en general. Dolce et al. (1994), clasifican diferentes tipos de metodologías en cuatro técnicas de evaluación: técnicas directas, indirectas, híbridas y convencionales. Estas técnicas, en general, se basan en la recopilación de información de datos sobre los daños ocasionados por terremotos pasados y en índices de calidad estructural, entre otros.

El método del índice de vulnerabilidad de Benedetti y Petrini (Angeletti et al., 1988), utiliza datos obtenidos mediante inspección, para calificar la calidad del diseño y construcción sismorresistente de los edificios, mediante un coeficiente denominado *índice de vulnerabilidad*. Este método considera parámetros estructurales evaluados por expertos, tales como: la calidad del sistema resistente, la configuración en planta, conexión entre elementos, etc. Yépez (1996) y Mena (2002) usaron este método para caracterizar la vulnerabilidad sísmica de los edificios de Barcelona.

En las últimas 3 décadas, los análisis de vulnerabilidad sísmica en la ingeniería civil, se encuentra en un nivel avanzado. Se han desarrollado un gran número de técnicas de evaluación de la vulnerabilidad sísmica y se han realizado numerosas aplicaciones, Pinto et al. (2004); Giovinazzi y Lagomarsino (2001); Dumova (2000); Hurtado (1999); Singhal y Kiremidjian (1995); Hwang y Huo (1994); Gunturi (1992); Kawamura et al. (1992); Petrovski et al. (1992) y Kappos et al. (1992), entre otros.

La vulnerabilidad se puede entender como una propiedad del edificio, correspondiente a su predisposición intrínseca a sufrir daño, expresado como la factibilidad de que el sistema expuesto sea afectado por el fenómeno que caracteriza la amenaza. La amenaza es un peligro latente o un factor externo a un sistema expuesto, que se puede expresar matemáticamente como la probabilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un suceso con una cierta intensidad, en un sitio específico y en un período de tiempo determinado (Barbat y Pujades, 2004).

La vulnerabilidad sísmica está relacionada con el grado de daño de uno o varios sistemas como resultado de un movimiento sísmico de determinada magnitud, expresada en una escala de cero (sin daños) a uno (pérdida total). La vulnerabilidad se puede definir también como la capacidad que posee un sistema de resistir un suceso sísmico.

La vulnerabilidad en edificios existentes está relacionada con la capacidad que tienen de soportar los desplazamientos y esfuerzos inducidos por un sismo pero, también está relacionada con el comportamiento de los elementos no estructurales, tales como tabiques, instalaciones y equipos entre otros.

Un estudio de vulnerabilidad se puede llevar a cabo tanto en las construcciones existentes como en las que están en la fase de diseño. Cuando se realiza un diseño estructural hay que cumplir los criterios establecidos en las normativas, para asegurar las vidas humanas. Estos parámetros de diseño permiten que las estructuras sufran ciertos daños, por lo tanto, en el diseño se condiciona a la estructura, implícitamente, a una vulnerabilidad funcional, permitiendo un nivel de riesgo aceptable.

Para llevar a cabo un estudio de vulnerabilidad es necesario disponer de la mayor información posible de las estructuras así como de datos obtenidos de los daños observados en sismos pasados.

Lang (2002) y Lang y Bachmann (2003) estiman la vulnerabilidad sísmica de edificios existentes por un método basado en el cálculo de la capacidad de desplazamiento del edificio, siendo ésta comparada con la demanda sísmica dada, mediante un espectro de respuesta de desplazamiento.

En resumen, la vulnerabilidad de un edificio existente se puede entender como la capacidad que tiene la estructura para soportar acciones sísmicas. En este trabajo, se cuantifica la vulnerabilidad sísmica utilizando curvas de fragilidad.

2.5.3. El riesgo sísmico

El concepto de riesgo está relacionado con las pérdidas humanas y monetarias. El riesgo depende de la densidad de población, del desarrollo económico, del grado de preparación que se tenga ante un sismo. Pero sobre todo, de la peligrosidad de la zona y de la vulnerabilidad de los bienes expuestos. El riesgo sísmico es una consecuencia de la peligrosidad sísmica y de la vulnerabilidad de los sistemas expuestos.

El riesgo sísmico físico se define como el grado de pérdidas esperadas debido a un sismo y como una función de la peligrosidad sísmica y de la vulnerabilidad de la estructura. La peligrosidad se puede expresar en función de la aceleración o de la intensidad y la vulnerabilidad en términos de índices, curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño.

Las matrices de probabilidad de daño son muy usadas para representar el daño estructural en función de una intensidad sísmica, es decir, para definir la probabilidad de alcanzar un estado de daño para distintos niveles de aceleración.

Debido a que los terremotos son fenómenos aleatorios, es conveniente usar las probabilidades para caracterizar el riesgo sísmico. El riesgo físico se puede calcular como la pérdida esperada en un período de tiempo y se suele expresar en pérdidas económicas o humanas. Así como para la amenaza o peligrosidad se pueden crear mapas, para el riesgo también. Los escenarios sísmicos son muy importantes para elaborar planes de emergencia y para planificar el territorio. Estos escenarios reflejan, de acuerdo con el grado de vulnerabilidad del sistema expuesto, la distribución espacial de los efectos que puede causar un sismo de cierta intensidad sobre una zona (Barbat y Pujades, 2004).

En los estudios de riesgo sísmico intervienen una gran cantidad de parámetros. En lo referente a la peligrosidad hay que conocer las leyes de atenuación de intensidad, aceleraciones o valores espectrales, así como la geometría de las zonas sismogénicas; estos estudios se han ido incrementando y opti-

mizando mediante el uso de los sistemas de información geográfica (*G.I.S.: Geographic Information System*). Estos sistemas son relativamente nuevos y han surgido como una tecnología potente, ya que pueden realizar análisis georeferenciados y mapas. Por otra parte, su uso permite localizar las regiones con mayor riesgo sísmico, las estructuras más vulnerables, realizar estimaciones de pérdidas y estudios en líneas vitales; es decir, permite tener una idea global del problema a la hora de un sismo y plantear soluciones elaborando y aplicando medidas de control. Una definición de los sistemas de información geográfica es la siguiente: “*un conjunto de soportes informáticos formado por hardware, software, datos geográficos y personal asignado para capturar, almacenar, actualizar, manipular, analizar y representar información referenciada geográficamente*”; ésta es la definición de la empresa de software *Environmental Systems Research Institute Inc.* (ESRI, 1995).

En la actualidad casi todos los estudios que se han publicado en el mundo reconocen las ventajas de G.I.S. (Faccioli et al., 1995; King et al., 1995; Lawson, 1995). Muchos (Faccioli et al. (1995); Klyanchko (1995); Chavez y García (1995); Emmi y Horton (1993)) utilizan la intensidad macrosísmica como parámetro del terremoto, mientras que otros (Ho et al. (1995); Thibault y Velkov (1995); King et al. (1995); Mahdyiar et al. (1995)) utilizan la aceleración máxima. Hwang y Lin (1995) y Bustamante et al. (1995) usan la aceleración máxima obtenida de forma indirecta a partir de la magnitud y la distancia epicentral.

El estudio del riesgo sísmico es multidisciplinar y requiere un equipo de diferentes tipos de especialistas, como por ejemplo, sismólogos y geólogos para la estimación de la actividad sísmica de la región y para la delimitación de las fuentes sismogénéticas, ingenieros para la predicción del movimiento del suelo a nivel de cimentaciones y para la evaluación del comportamiento estructural debido a un sismo, también requiere la colaboración de técnicos de construcción y arquitectos. Para evaluar las consecuencias socio-económicas se requieren economistas, funcionarios gubernamentales y políticos.

Para la mayoría de los edificios, el terremoto es una importante amenaza. Su sacudida incluye los movimientos transmitidos a las estructuras aisladas así como también el efecto de los edificios adyacentes, debido al golpeteo y a los elementos compartidos. Otros efectos inducidos por los sismos son la licuefacción, el deslizamiento de laderas, asentamientos, inundaciones, maremotos, etc.

La acción sísmica esperada está representada por una serie de parámetros, tales como la amplitud, la frecuencia y la duración, o por un grupo de registros sísmicos. Los registros sísmicos proporcionan la aproximación más directa para analizar el desempeño de una estructura. No obstante, los espectros de respuesta, continúan siendo una aproximación práctica importante. Kramer (1996) y Stewart (2001) evalúan y discuten los registros sísmicos y los espectros de respuesta (FIB, 2003).

Estudios recientes (Alavi, 2000; Sasani, 2000; Rodríguez-Marek, 2000; Krawinkler, 1998; Somerville, 1998, 1997) han identificado la importancia de las características del impulso de los movimientos del suelo cercanos a la fuente. La amplitud de la aceleración y la duración del impulso, en relación a la rigidez y la resistencia de la estructura, son importantes para determinar la respuesta de amplitud (FIB, 2003).

Estudios geológicos e históricos, indican que los sismos de magnitudes más pequeñas, ocurren más frecuentemente que los de gran magnitud. Terremotos pasados han demostrado la importancia de reconocer que, la intensidad depende fuertemente de las características del sitio. Los suelos blandos tienden a filtrar los períodos cortos y a amplificar los períodos largos. Procedimientos para determinar los efectos de amplificación del sitio han sido desarrollados y ampliamente utilizados en aplicaciones de diseño sísmico (FIB, 2003).

2.6. Daño sísmico e índices de daño

2.6.1. El daño sísmico

El daño sísmico representa el nivel de deterioro de un sistema causado por una acción sísmica. Hoy en día existen muchos modelos para evaluar o cuantificar el daño. Sin embargo, aún no existe un criterio específico para definir los modelos de daño de forma unificada.

En las escalas de intensidad clásicas, la definición del daño se hacía en términos cualitativos. Este tipo de esquemas se basaban en la observación e identificación de daños reales, verificados en las estructuras después de la ocurrencia de un terremoto de determinadas características (Carvalho y Coelho, 1994).

Una estructura está compuesta por sistemas estructurales y por sistemas no estructurales. Dependiendo donde la estructura sufra daños, éstos pueden ser daños estructurales o no estructurales. El daño estructural es el que se produce en los elementos que conforman el sistema resistente (columnas, vigas y muros de carga); los elementos que no forman parte del sistema estructural resistente como, por ejemplo, los revestimientos, las divisiones con tabiques, son los que se consideran dentro del daño no estructural.

Se describen, a continuación los daños típicos causados por los grandes terremotos tanto en edificios de hormigón como de obra de fábrica. En cuanto a los edificios de hormigón, en los pilares (columnas) aparecen grietas a 45° y a 90° , las diagonales son a causa de la torsión y del cortante, y las grietas verticales son debidas al desprendimiento del hormigón, aplastamiento del hormigón y pandeo de las barras longitudinales; en las vigas también se producen grietas diagonales debido al cortante (falla del acero transversal) y a la torsión. También existen grietas verticales (rotura del acero longitudinal), aplastamiento del hormigón por flexión. Cuando el diseño de la unión es insuficiente, en los nodos aparecen grietas inclinadas (45°) debidas al cortante. Estas conexiones son las más importantes y se deben diseñar y ejecutar cui-

dadosamente. En los forjados o losas se pueden producir, alrededor de los pilares, unas grietas debidas al punzonamiento y, a causa de la flexión, se pueden producir también grietas a lo largo de todo el forjado. En cuanto a los daños no estructurales, los más comunes son el agrietamiento de muros divisorios, en los que el cortante produce unas grietas diagonales en forma de X (cruces de San Andrés) y unas grietas verticales, que aparecen en las esquinas y en la zona central y que son debidas a la tendencia al vuelco que tienen los muros, y a la flexión. Otros daños típicos no estructurales son el desprendimiento de acabados, rotura de cristales, de instalaciones. Cuando los pórticos poseen tabiques de relleno al entrar en contacto con ellos se vuelven más rígidos, cambiando las propiedades dinámicas de la estructura. Cuando se tienen ventanas rectangulares en el tope de un muro de relleno formando pilares cortos, se producen daños fuertes ya que el pilar tiende a fallar por los elevados esfuerzos cortantes que se producen al impedir su deformación hasta la altura total de piso.

En cuanto a la obra de fábrica, el modo de fallo más común, cuando está sujeta a compresión, es el de la aparición de grietas verticales en las unidades, producidas por las deformaciones verticales que se ven incrementadas por el efecto de las deformaciones del mortero de las juntas. Las deformaciones del mortero se producen debido a que éste tiende a expandirse más que la unidad (bloque), como consecuencia de su mayor flexibilidad y mayor coeficiente de Poisson. Debido a que el mortero y el bloque están unidos, el bloque resiste la expansión lateral adicional del mortero. Si el agrietamiento vertical se vuelve excesivo, se produce la inestabilidad del elemento y en consecuencia se produce el fallo. Otro fallo muy común es el que se presenta cuando la dirección principal de los esfuerzos se vuelve diagonal, ocurriendo entonces el fallo por tensión diagonal. Cuando los paneles de obra de fábrica son muy esbeltos, su resistencia se puede ver gobernada por la flexión fuera del plano, generando momentos de segundo orden y posibles fallos por pandeo fuera del plano, debido a la excentricidad de cargas y relaciones de esbeltez muy altas.

Como medida representativa de la degradación estructural se define un parámetro indicador del daño, el cual se puede definir a nivel local, que representa el nivel de daño en un elemento individual, y a nivel global, que representa el daño en una estructura entera. Estos índices pueden estar basados en algunos resultados como la respuesta medida de una estructura durante un sismo, en los resultados de un análisis dinámico no lineal o en la comparación de las propiedades físicas estructurales antes y después de un terremoto.

Para caracterizar el estado de una estructura después de un evento sísmico, existen muchos índices de daño que se basan en el concepto de ductilidad, sin considerar el daño acumulado bajo cargas sísmicas. Otros modelos se basan en la deformación plástica y en la energía absorbida durante un sismo. Algunos estudios relacionados con el daño son Bracci et al. (1989); Roufaiel y Meyer (1987); Hasselman et al. (1980); Banon et al. (1981); Chung et al. (1987, 1988, 1989, 1990); Kunnath et al. (1990, 1991, 1992); DiPasquale y Cakmark (1987, 1988); Reinhorn et al. (1988).

En cuanto a los índices de daño global, estos se suelen calcular como un promedio ponderado de los índices de daño locales, siendo necesario definir unos factores de ponderación que estén relacionados con la cantidad de energía absorbida a nivel local o que estén relacionados con criterios de importancia. Además, los índices de daño global, se pueden calcular con parámetros modales, tales como el período natural de vibración (DiPasquale et al., 1990).

Se describen a continuación los principales índices de daño adoptados en la literatura.

2.6.2. Índice de Park y Ang

Un índice de daño ampliamente utilizado para estructuras de hormigón, es el de Park y Ang (1985 a, b). Este índice ha sido calibrado usando datos reales de muchas estructuras dañadas por terremotos pasados. Este índice de daño

global se usa para representar el comportamiento del sistema estructural y se define como un promedio ponderado de índices de daño local (D_i) usando la energía disipada (E_i) en el elemento correspondiente como coeficiente de ponderación. El índice de daño global (D_T) viene dado por:

$$D_T = \sum \lambda_i D_i \quad \lambda_i = \frac{E_i}{\sum E_i} \quad (2.10)$$

El daño estructural se cuantifica por cinco estados discretos de daño: nulo, leve, moderado, severo y colapso. La Tabla 2.1 muestra los valores del índice de daño de Park y Ang (Park et al., 1987) correspondientes a los distintos estados de daño.

Tabla 2.1. Rangos del índice de daño de Park y Ang para diferentes estados de daño (Park et al., 1987).

Estados de Daño	Rangos del índice de Park y Ang
Leve	0.1 - 0.2
Moderado	0.2 - 0.5
Severo	0.5 - 1.0
Colapso	> 1.0

Estos estados de daño han sido calibrados con numerosos ensayos de laboratorio y con evaluaciones hechas a edificios de hormigón armado después de terremotos.

2.6.3. Índice de Roufaiel y Meyer

En 1987, Roufaiel y Meyer proponen calcular el parámetro de daño global de una estructura por medio de su curva de capacidad:

$$ID_G = \frac{dm - dy}{du - dy} \quad du = 0,06 H \quad (2.11)$$

donde dm es el desplazamiento lateral máximo en el último piso del edificio, dy es el desplazamiento de cedencia, du es el desplazamiento último y H es la altura total del edificio (Roufaiel y Meyer, 1987).

2.6.4. Índice de Bracci

El índice de daño de Bracci et al. (1989) está basado en el diagrama momento-curvatura. Estos autores han realizado ensayos sobre columnas y sobre pórticos. En la Tabla 2.2 se muestran los rangos de variación del índice de daño de Bracci para los diferentes estados de daño.

Tabla 2.2. Rangos del índices de Bracci para los diferentes estados de daño (Bracciet al., 1989).

Estados de Daño	Rangos de variación del índice de daño
No daño	< 0.33
Reparable	$0.33 - 0.66$
Irreparable	$0.66 - 1.0$
Colapso	> 1.0

2.6.5. Índice de Calvi

Calvi (1997, 1999) desarrolló un procedimiento simplificado para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de los edificios de mampostería, sujetos a un mecanismo de fallo en el plano. Este procedimiento considera la disipación de energía y la capacidad de desplazamiento de los edificios existentes y, a través de una metodología probabilística muy simple, calcula la probabilidad de ocurrencia de un estado de daño límite para un sismo dado. La demanda sísmica se define en términos del espectro de respuesta. Los estados límites se definen en términos de la deriva de piso. La Tabla 2.3 muestra los intervalos de la deriva de entrepiso para los cuatro estados de daño (Calvi, 1999; Calvi y Magenes, 1996).

Tabla 2.3. Límites del índice de Calvi para los estados de daño para estructuras de mampostería (Calvi, 1999).

Estados de Daño	Intervalos de derivas, δ (%)
Leve (LS1)	< 0.1
Moderado (LS2)	0.1 - 0.3
Severo (LS3)	0.3 - 0.5
Colapso (LS4)	> 0.5

Varios de los índices aquí nombrados han sido objeto de discusión (Kappos, 1992). Establecer límites o correlaciones en los índices de daño es un tema complejo y subjetivo. Algunos investigadores como Park y Ang (1987); Bracci et al. (1989); Calvi (1999) y Lagomarsino y Penna (2003), han propuesto correlaciones de los índices de daño con los estados de daño.

En este trabajo se usan 4 estados de daño: leve, moderado, severo y completo. El daño se cuantifica mediante una *matriz de probabilidad de daño*, que para un desplazamiento o aceleración espectral dada, define la probabilidad de que se dé un estado de daño.

Un parámetro de daño medio (D_M) ponderado definido como: $D_M = \sum i \cdot P(i)$, donde i vale 0, 1, 2, 3, 4, respectivamente, para los estados de daño nulo, leve, moderado, severo y completo y $P(i)$ define la probabilidad de ocurrencia del estado de daño i , permite definir el daño esperado mediante un sólo parámetro.

2.7. Ingeniería sísmica basada en desempeño

El diseño sismorresistente tiene como objetivo garantizar unas prestaciones o funciones del edificio en caso de un sismo. Los primeros procedimientos de diseño consideraban un único objetivo: evitar el colapso estructural. Hasta

hace poco, los códigos de diseño no consideraban necesario diseñar para niveles de servicio bajo cargas sísmicas. El uso explícito de múltiples objetivos de desempeño se introdujo en los años 90, en documentos tales como, FEMA 273 (FEMA, 1997), ATC 40 (ATC, 1996) y Vision 2000 (SEAOC, 1995), FIB (2003).

La *ingeniería basada en desempeño* conocida en la literatura inglesa como *performance based engineering* (PEB), fue creada por el comité Vision 2000 (SEAOC, 1995), el cual está formado por la asociación de ingenieros estructurales de California (SEAOC: *Structural Engineers Association of California*). La ingeniería basada en el desempeño comienza con la concepción de un proyecto y dura toda la vida del edificio, es decir, comienza con la selección de los objetivos de desempeño y con la identificación del peligro sísmico, continúa con el diseño conceptual, preliminar y final, revisa la aceptabilidad durante el diseño y finalmente, concluye con el control de calidad durante la construcción y con el mantenimiento durante toda la vida útil del edificio.

Los objetivos de desempeño se seleccionan y expresan en términos de los niveles esperados de daño. El lugar adecuado y el análisis de riesgo sísmico, son llevados a cabo para identificar el peligro del lugar y para caracterizar los niveles específicos del movimiento sísmico de diseño. En el diseño conceptual las decisiones claves son hechas en lo que respecta a la selección, el trazado y la configuración de los sistemas estructurales y no estructurales, y a la elección de un sistema de elementos dúctiles. El diseño preliminar establece el tamaño inicial de los miembros estructurales basados en los criterios iniciales de diseño. En el diseño final se refinan los tamaños y se completan los detalles de ductilidad. Con el análisis de aceptabilidad se verifican los criterios definidos por los objetivos de desempeño. Asegurar la calidad es esencial en la ingeniería basada en desempeño, ésta incluye una amplia revisión del diseño y una garantía de calidad en la construcción. El mantenimiento estructural incluye una garantía y protección contra el deterioro y las alteraciones del sistema resistente al terremoto.

La ingeniería sísmica basada en desempeño involucra el diseño completo y permite que el edificio sea construido para resistir sismos de diferentes magnitudes, permitiendo ciertos límites de daño. La limitación de los estados de daño se refiere al término de niveles de desempeño. El comité Vision 2000, define cuatro niveles de desempeño:

- Nivel completamente operacional: las instalaciones continúan en operación con daños despreciables.
- Nivel operacional: las instalaciones continúan en operación con daños menores.
- Nivel de seguridad para la vida: la seguridad es protegida, el daño es de moderado a severo.
- Nivel cerca al colapso: la seguridad está en riesgo, el daño es severo, pero el colapso estructural está prevenido.

La ingeniería sísmica basada en desempeño engloba completamente las tareas necesarias de la ingeniería, para crear estructuras con un comportamiento sísmico previsible.

Dentro de la ingeniería basada en el desempeño existen varias metodologías disponibles para el diseño basado en desempeño. *La metodología de diseño global*, se desarrolla a partir del concepto de que todos los edificios deben encontrar unos objetivos mínimos básicos y, además, que el diseño sísmico ideal, esté basado, al menos, en el coste total de la vida de la estructura, incluyendo el coste inicial y el coste de reparación de los daños ocasionados por los sismos. Se basa en el análisis global del sistema estructural. *La metodología de diseño basada en desplazamiento*, utiliza como punto de partida del diseño sísmico, el desplazamiento en vez de la fuerza, suponiendo que el control de desplazamiento o de deriva, es la clave para controlar el desempeño y el daño de la estructura. En el diseño sísmico tradicional basado en

fuerzas, la estructura es diseñada elásticamente para una respuesta de aceleración reducida y entonces, el desplazamiento es revisado como parte del criterio de aceptabilidad. En la metodología basada en desplazamiento, el proceso de diseño es inverso, se diseña el edificio con control de desplazamiento y entonces se revisa para las fuerzas. Otra *metodología es la basada en energía*, en ésta, el daño está directamente relacionado con la energía total de entrada. El potencial de daño del terremoto a una estructura específica y a su contenido, está estrechamente relacionado con la energía de entrada a la estructura y con su capacidad de disipación. Esta metodología tiene en cuenta los efectos de la duración y el contenido de energía del movimiento del terreno en diferentes períodos estructurales, así como también, la degradación del sistema estructural a través de la respuesta cíclica. El comportamiento histerético plástico está diseñado dentro de la estructura por medio del uso de elementos dúctiles, para los cuales la capacidad de disipación de energía debe ser establecida. *La metodología general fuerza-resistencia*, incluye el diseño sísmico más común. Está basada en determinar una fuerza cortante basal lateral (mínima), distribuida en toda la altura del edificio para realizar un análisis, estático o dinámico, diseñando los miembros con suficiente resistencia para resistir las fuerzas resultantes en los elementos. Los métodos de los códigos actuales normalmente, utilizan un espectro de respuesta elástico para describir la acción sísmica. Las fuerzas derivadas del espectro elástico son reducidas con un factor R para tener en cuenta la energía disipada por ductilidad.

En la ingeniería basada en desempeño, la clave para verificar el diseño sísmico adecuado es el análisis de aceptabilidad. Los valores límite de los diferentes parámetros de respuesta estructural completan los criterios de aceptabilidad del diseño. Los parámetros de respuesta son medidas de la respuesta estructural que pueden estar correlacionados con los niveles de daño y con los objetivos de desempeño. Los parámetros más críticos son la deriva, el desplazamiento, la ductilidad de demanda, la energía de demanda y la aceleración.

SEAOC (1995), define los siguientes niveles de desempeño estructural basados en la capacidad de deformación de la estructura:

- SP1: estado límite de cedencia
- SP2: 30 % de uso de la capacidad de deformación (Estado límite de servicio)
- SP3: 60 % de uso de la capacidad de deformación (Estado límite de control de daño)
- SP4: 90 % de uso de la capacidad de deformación (Estado límite de la seguridad vital)
- SP5: 100 % de uso de la capacidad de deformación (Estado límite de colapso)

Las intensidades sísmicas se caracterizan por cuatro niveles de eventos probabilísticos:

- EQ1: evento frecuente, período de retorno de 43 años, probabilidad de excedencia de 50 % en 30 años.
- EQ2: evento ocasional, período de retorno de 72 años, probabilidad de excedencia de 50 % en 50 años.
- EQ3: evento raro, período de retorno de 475 años, probabilidad de excedencia de 10 % en 50 años.
- EQ4: evento muy raro, período de retorno de 970 años, probabilidad de excedencia de 10 % en 100 años.

En el análisis de aceptabilidad se pueden emplear varias técnicas de análisis elástico o inelástico. Los procedimientos del análisis elástico, tales como, la fuerza lateral equivalente, los espectros de respuesta y el análisis modal,

han limitado la aplicación en determinar la respuesta inelástica. El análisis dinámico no lineal de historias en el tiempo, proporciona un análisis más completo. Los análisis más modernos como el espectro de capacidad o el pushover, analizan una estructura cargada incrementalmente, hasta que se alcance la deriva de capacidad última estimada, luego la estructura va cediendo por el desarrollo de una serie de rótulas plásticas.

2.8. Evaluación del desempeño sísmico

El concepto de diseño basado en desempeño, comportamiento o función, se conoce desde la década de los 90. Esta idea hace énfasis en el diseño de los estados límites últimos. Normalmente se diseña para el estado límite último, se busca aumentar la resistencia, pero con esto no necesariamente se garantiza reducir el daño y, por ende, la seguridad. Según Park y Paulay, los edificios porticados pueden comportarse mejor bajo impactos sísmicos si se asegura que las rótulas plásticas puedan ocurrir más en las vigas que en las columnas, es decir, formando un mecanismo de “columna fuerte viga débil” (Priestley, 2000).

Partiendo de unos estudios de Park y Priestley en 1985 para estructuras de puentes, Moehle (1992) sugiere para estructuras de edificación, unos requisitos para el diseño basado únicamente en fuerzas, debido a que reconoce algunas imperfecciones. Tales requisitos son el cálculo de la capacidad dúctil de la estructura y la revisión de ésta con la ductilidad de demanda estimada, correspondiente a un nivel de diseño sísmico y al factor de reducción adoptado para el diseño. En Nueva Zelanda y Europa esto aún es considerado como diseño de fuerzas, mientras que en Estados Unidos, al añadir el chequeo del desplazamiento, el cual tendrá posiblemente la modificación de la resistencia de diseño, se conoce como *diseño basado en desplazamiento* (en la literatura inglesa: *displacement-based design*) o *diseño basado en desempeño* (conocido como *performance-based design*, en la literatura inglesa).

Para la evaluación del comportamiento estructural básico se deben conseguir tres objetivos principales, los cuales se logran con el diseño del edificio. A continuación se nombran los tres estados límite para dicha evaluación del desempeño:

- Seguridad: protección de vidas humanas.
- Reparabilidad: conservación de la propiedad.
- Serviciabilidad: mantenimiento de su función.

El objetivo del estado límite de seguridad es evitar el peligro, dando seguridad a la gente dentro y fuera del edificio, el objetivo del estado límite de reparabilidad es garantizar la reparación de los daños causados al edificio por fuerzas externas y finalmente, el objetivo del estado límite de serviciabilidad, es asegurar la funcionalidad y la comodidad del edificio. Esta nueva filosofía de diseño basada en niveles de funcionamiento de las estructuras de edificación fue desarrollado en el marco de un proyecto Japonés de investigación y desarrollo que duró 3 años. Se trata del proyecto: *Development of a New Engineering Framework for Building Structures* (Aoki y Ohaashi, 2000).

Recientemente, Chopra y Goel (2001) han avanzado en el uso del espectro inelástico para la metodología del diseño basado en desplazamiento, donde la demanda sísmica está representada por espectros inelásticos en vez de espectros elásticos, generados para un rango de amortiguamiento viscoso equivalente.

Existen tres métodos principales para conseguir el diseño basado en desempeño y los tres métodos requieren la asimilación de la estructura completa de varios grados de libertad a una estructura de un solo grado de libertad, esto se hace aceptando que la respuesta dinámica de la estructura seguirá una forma específica y empleando el método de las coordenadas generalizadas (Paz, 1994). A continuación se describen, brevemente, los tres métodos.

2.8.1. Método del espectro de capacidad

Implementación inicial

El método del espectro de capacidad (Freeman, 1978) utiliza un gráfico de espectro de respuesta en coordenadas espectrales conocido como formato ADRS (*ADRS: Acceleration-Displacement-Response-Spectra*). Para un sistema estructural MDOF dado, se realiza un análisis *pushover* y los resultados se presentan en términos de un sistema SDOF equivalente. La curva resultante del *pushover*, que en formato ADRS se llama espectro de capacidad, se superpone sobre las curvas ADRS de la acción sísmica, las de demanda graficadas para diferentes valores de amortiguamiento viscoso equivalente, para así evaluar el desplazamiento de respuesta máximo.

El método del espectro de capacidad propuesto, inicialmente, por Freeman, ha sido estudiado extensamente. En algunos casos, se han propuesto modificaciones para identificar las limitaciones del método. La limitación de las primeras versiones del método se basaba en la forma del modo fundamental elástico inicial y, en la evaluación de la curva de capacidad utilizada para el análisis (Paret et al., 1996).

Implementación ATC-40

El método del espectro de capacidad es la base de los métodos en el documento ATC-40 (1996) titulado "*Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*".

Investigaciones recientes de Chopra (1999), (2000) han sugerido que pueden haber algunas limitaciones en la metodología del ATC-40, basada en la hipótesis de que un sistema inelástico MDOF puede ser modelado con una técnica de análisis iterativa, basada en un sistema elástico SDOF equivalente. El núcleo de la crítica, está en el uso de los conceptos de amortiguamiento

viscoso equivalente y de rigidez secante, popularizados por Gulkan y Sozen (1974).

En el ATC-40, hay tres métodos propuestos llamados *método A*, *método B* y *método C*. En la metodología propuesta por Chopra (2000), los métodos *A* y *B* del ATC-40 son modificados por el uso del espectro inelástico.

El procedimiento del *método A* es muy similar al método del espectro de capacidad con la modificación de los espectros inelásticos. La curva del espectro de capacidad es superpuesta sobre la de demanda, la cual es expresada como espectro inelástico en formato ADRS.

El *método A* del ATC-40 (1996) está ampliamente explicado en el *Capítulo 4*, ya que es el método empleado en el presente trabajo para obtener los espectros de demanda.

Los procedimientos recomendados en el documento FEMA-273/274 “*NEHRP commentary on the guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*” están también basados en el método del espectro de capacidad.

Este método se considera un método basado en fuerzas que incorpora una comprobación del desplazamiento.

2.8.2. Método N2

El método N2 desarrollado en la Universidad de Ljubljana, Eslovenia (Fajfar et al., 1997), se formuló a finales de la década de los años 80 y su desarrollo continuó hasta mediados de los 90. En el método N2, se estima el desplazamiento de demanda sísmico a partir del análisis del espectro de respuesta de un modelo bilineal de un SDOF equivalente, representando el modo elástico predominante de la estructura.

El método N2, donde N indica que se trata de un análisis no lineal y 2 hace referencia al uso de dos modelos matemáticos (Fajfar, 2000). El método

compara el desplazamiento de demanda, obtenido por el análisis del espectro de respuesta de un modelo bilineal equivalente a un sistema de un grado de libertad (SDOF), con los resultados de un análisis *pushover* de un sistema de varios grados de libertad (MDOF), determinando el espectro inelástico para ductilidades constantes, los espectros son representados en formato AD (aceleración-desplazamiento). Luego los índices de daño locales y globales se determinan con los modelos de daño de Park y Ang.

A continuación se presentan, de forma resumida, los pasos a seguir para la aplicación del método N2:

1. Datos: modelo estructural y espectro elástico, figura 2.4.

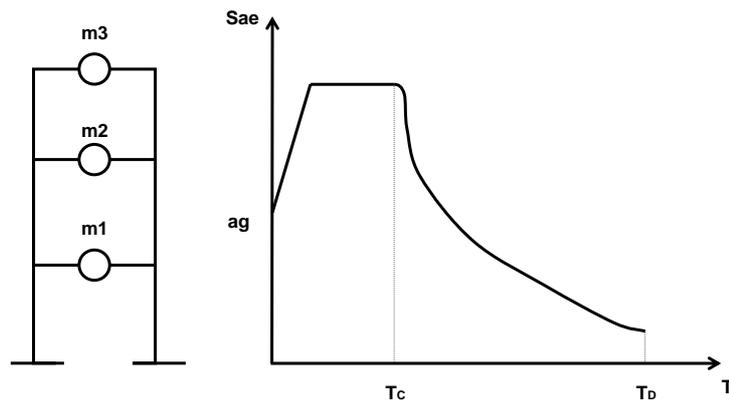


Figura 2.4: Estructura y espectro elástico.

2. Espectro de demanda sísmica en formato AD:

- a) Determinar el espectro elástico en formato AD (aceleración-desplazamiento):

$$Sd_e = \frac{Sa_e * T^2}{4\pi^2} \quad (2.12)$$

donde, Sa_e , Sd_e y T son la aceleración espectral, el desplazamiento espectral y el período, respectivamente para un modelo elástico.

- b) Determinar el espectro inelástico para ductilidades constantes.
3. Análisis pushover:
- a) Suponer el desplazamiento de forma ϕ .
 - b) Determinar la distribución vertical de las fuerzas laterales.
 - c) Determinar la relación entre cortante en la base (V) y desplazamiento en el tope del edificio Δ_{techo} .
4. Modelo equivalente a un sistema de un grado de libertad (SDOF):
- a) Determinar la masa equivalente (m^*).
 - b) Transformar del sistema MDOF al sistema SDOF.
 - c) Determinar una relación elasto-plástica aproximada de fuerza-desplazamiento.
 - d) Determinar la resistencia F_y^* , el desplazamiento D_y^* y el período T^* .
 - e) Determinar el diagrama de capacidad (aceleración-desplazamiento).
5. Demanda sísmica para el SDOF:
- a) Determinar el factor de reducción $R\mu$.
 - b) Determinar el desplazamiento de demanda Sd .
6. Demanda sísmica global para el modelo de varios grados de libertad (MDOF):
- a) Transformar el desplazamiento de demanda del SDOF al desplazamiento en el tope del edificio correspondiente al modelo MDOF.
7. Demanda sísmica local:
- a) Análisis pushover del MDOF.
 - b) Determinar las cantidades locales correspondientes al desplazamiento (derivadas de piso, rotaciones, etc).

8. Evaluación del comportamiento (análisis del daño): el comportamiento global puede ser visualizado comparando los desplazamientos de capacidad y demanda.

Este método es similar al método del espectro de capacidad, su principal diferencia está en que la demanda sísmica se representa mediante un espectro inelástico caracterizado por la rigidez inicial y el nivel de ductilidad. Con este método no es necesario calcular el amortiguamiento viscoso equivalente ya que la no linealidad viene caracterizada por el nivel de ductilidad.

2.8.3. Método basado en el desplazamiento

Propuesto por Priestley en el año 1992, y desarrollado por Priestley y Calvi en 1997 y por Priestley y Kowalsky en el año 2000 (Priestley, 2000). Este método, a diferencia de los anteriores en los que se calcula el desplazamiento de desempeño de la estructura, hace el proceso inverso, es decir, dado un comportamiento de diseño, la masa de la estructura determina la fuerza basal para la que debe ser dimensionada la estructura. Este método se conoce también como *método directo de diseño basado en desplazamiento*, Priestley (2003).

La estructura se debe representar como un oscilador equivalente de un grado de libertad (SDOF) con una masa efectiva m_e , figura 2.5.

La representación bilineal de la respuesta fuerza-desplazamiento del sistema SDOF se muestra en la figura 2.6, mientras que el diseño sísmico basado en fuerza-desplazamiento caracteriza a una estructura en términos de la rigidez inicial (K_i) y del amortiguamiento elástico, el método de diseño basado en desempeño caracteriza la estructura en términos de la rigidez efectiva o secante (K_e) en el desplazamiento máximo (Δd), figura 2.6.

Para un nivel de ductilidad de demanda se asigna un amortiguamiento viscoso equivalente, figura 2.7, representativo de la combinación del amortiguamiento

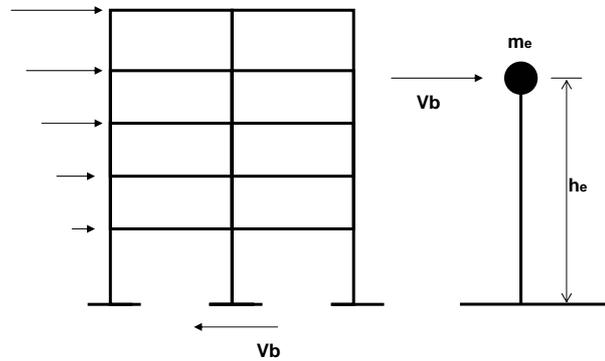
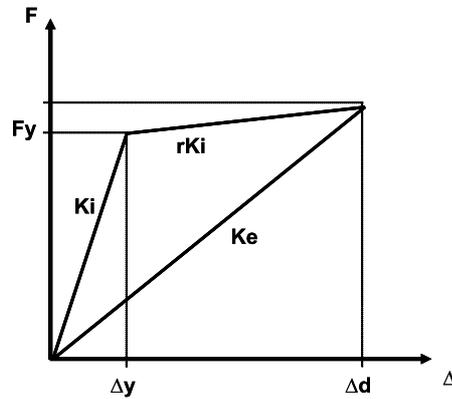


Figura 2.5: Simulación de SDOF.

Figura 2.6: Rigidez efectiva (K_e).

elástico e hysterético de la energía absorbida durante la respuesta elástica.

En la figura 2.7 se puede observar como para un nivel de demanda de ductilidad dado, un edificio metálico tendrá asignado un mayor nivel de amortiguamiento viscoso equivalente que un edificio de hormigón armado diseñado para un mismo nivel de ductilidad, como una consecuencia de las curvas de histeréisis.

Con el desplazamiento de diseño determinado en la respuesta máxima y el correspondiente amortiguamiento estimado a partir de la ductilidad de demanda esperada, el período efectivo (T_e) se puede leer de un grupo de espectros de desplazamiento de diseño (figura 2.8), donde se indica también los

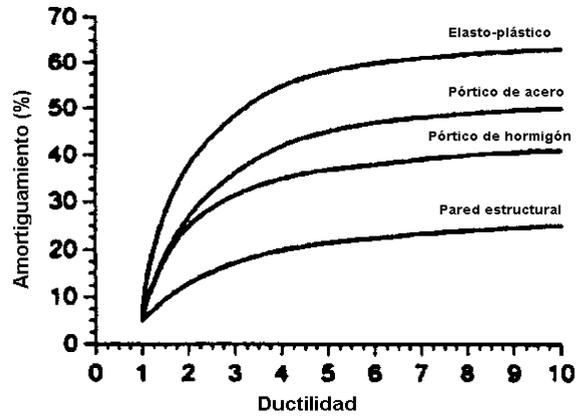


Figura 2.7: Amortiguamiento viscoso con ductilidad.

diferentes amortiguamientos efectivos en %, Priestley (2003).

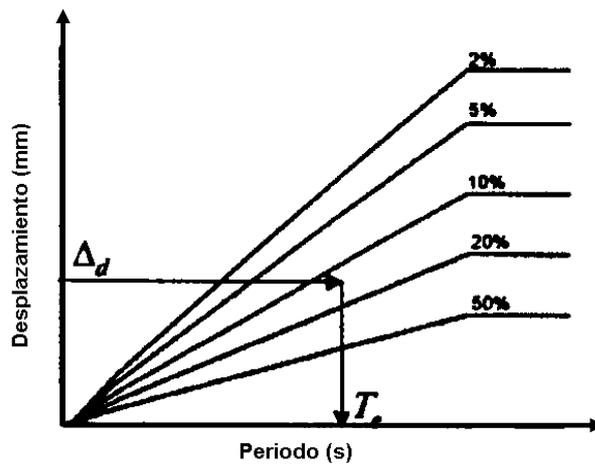


Figura 2.8: Espectros de desplazamiento de diseño.

La rigidez efectiva se puede determinar a partir de la siguiente ecuación

$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{m_e}{K_e}} \quad (2.13)$$

De la figura 2.6, se obtiene la fuerza sísmica lateral de diseño (F_d), la cual es también el cortante en la base de diseño (V_b).

$$F_d = V_b = K_e * \Delta_d \quad (2.14)$$

Esta fuerza de diseño de la estructura equivalente se distribuye en la estructura real y se dimensiona la estructura, a partir de aquí, se realiza un análisis estático no lineal para verificar que el amortiguamiento de partida se satisface dentro de una tolerancia aceptable.

2.9. Curvas de fragilidad

Las *curvas de fragilidad* se definen como una función de distribución acumulada de la probabilidad de alcanzar o exceder un estado de daño límite, en función de un estimador de la acción sísmica. El parámetro que define o caracteriza la acción sísmica en las curvas de fragilidad, suele ser la aceleración pico efectiva (*PGA*), la velocidad pico efectiva (*PGV*), el desplazamiento espectral (*Sd*) o la aceleración espectral (*Sa*).

En la metodología HAZUS (1999), las curvas de fragilidad se representan por funciones de distribución lognormal y, por lo tanto, pueden ser descritas por la media y la desviación estándar de acuerdo a la siguiente ecuación,

$$P[ED \geq Sd] = \Phi\left[\frac{1}{\beta_{ED}} \cdot \ln\left(\frac{Sd}{\bar{Sd}_{ED}}\right)\right] \quad (2.15)$$

donde Φ es la función de distribución estándar acumulada, *Sd* es el desplazamiento espectral, \bar{Sd}_{ED} es el desplazamiento espectral medio para el cual la probabilidad de que se alcance o exceda el estado de daño es del 50 %, β_{ED} es la desviación estándar asociada a los estados de daño (*ED*).

Los estados límite de daño considerados en la metodología HAZUS (1999) son: leve, moderado, severo y completo (muy fuerte), una descripción detallada puede ser encontrada en Kircher et al. (1997).

La metodología HAZUS fue desarrollada por la Agencia Federal de Emergencia de Estados Unidos (*FEMA: Federal Emergency Management Agency*). HAZUS es un acrónimo de HAZard y de U.S. y es una herramienta concebida para el análisis del riesgo sísmico en los Estados Unidos, en la cual la

acción sísmica se define en términos espectrales. La metodología está basada en tres conceptos fundamentales: curvas de capacidad, punto de desempeño y curvas de fragilidad.

2.10. Matrices de probabilidad de daño

La forma más frecuentemente usada para estimar la probabilidad de un estado de daño es por medio de la matriz de probabilidad de daño (*MPD*); se supone que un grupo de edificios de una misma tipología estructural, tendrán el mismo comportamiento bajo la acción de un mismo sismo, y además, el nivel de daño podría ser el mismo para todo el grupo de edificios (Di Pasquale et al., 2001). Cada elemento de la matriz está expresado de acuerdo a la ecuación (2.16):

$$MPD(DV/I, T) = P(DV/I, T) \quad (2.16)$$

donde *DV* corresponde a un nivel o estado de daño dado, *I* es la intensidad sísmica y *T* es una tipología estructural específica (Restrepo, 2004). Normalmente, la intensidad está descrita por alguna escala macrosísmica, como por ejemplo, la escala macrosísmica europea (*EMS: European Macroseismic Scale*, Grünthal, 1998).

Esta forma de cuantificar el daño es considerada como un método directo, ya que permite estimar el daño sísmico en un solo paso, considerando el edificio como un miembro dentro de una clase específica. De acuerdo a la ecuación (2.16), la *MPD* define la probabilidad de alcanzar un nivel de daño para una intensidad sísmica y una tipología dadas. La ventaja de este método es la posibilidad de utilizar las *MPD* calibradas en una zona dada, para evaluar el daño en otra zona en la cual los edificios tengan características similares.

En los primeros estudios de riesgo sísmico, la acción se define para valores discretos de, por ejemplo, intensidad, y los tipos de edificio se incluyen en unas pocas clases, por ejemplo, A, B, C. Las probabilidades de que un tipo

de edificio sufriera un estado de daño dado al sufrir una intensidad (I), se obtienen mediante el análisis de datos de daño causados por terremotos. El ATC-13 (1985) desarrolla este tipo de matrices a partir de un estudio sofisticado basado, no en daños observados, sino en la opinión y el juicio de expertos.

En esta tesis el análisis de daño se fundamenta en el desarrollo de curvas de fragilidad, en las que la acción sísmica se considera en términos espectrales. A partir de ellas y para las demandas sísmicas que son previsibles en Barcelona se desarrollan matrices de probabilidad de daño para los edificios de hormigón armado, que se agrupan en tres clases: de gran altura, de mediana altura y de poca altura. Se obtienen también curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño para los prototipo de casa aislada de dos plantas típicas de viviendas unifamiliares de Cataluña. Finalmente, se obtienen curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño para los edificios de obra de fábrica de ladrillo.

2.11. Resumen

En este capítulo se presentaron los principales conceptos relacionados con la acción sísmica y la respuesta estructural de los edificios. Entre las definiciones consideradas para un seguimiento adecuado de la tesis se encuentra la deriva de entrepiso, es el desplazamiento horizontal entre dos pisos adyacentes; la deriva, la cual corresponde a la deriva de entrepiso dividida por la altura del piso; el desplazamiento en el techo es el desplazamiento lateral en la última planta del edificio y este desplazamiento dividido entre la altura total del edificio define la deriva promedio.

También se presentó una definición de los métodos de análisis sísmicos (estáticos y dinámicos, lineales y no lineales) y los sistemas de uno o varios grados de libertad, además de las curvas y espectros de capacidad, de los espec-

tros de respuesta, de las curvas de fragilidad y, finalmente, de las matrices de probabilidad de daño. Cuando se habla de una curva de capacidad, se está hablando de la relación entre la resistencia de la carga lateral y el desplazamiento de una estructura, el espectro de capacidad no es más que una curva de capacidad en coordenadas espectrales. El espectro de respuesta relaciona un parámetro de respuesta (aceleración, velocidad o desplazamiento) con el período natural.

En el estado del arte aquí presentado, se dedicaron secciones específicas relacionadas con la evaluación del riesgo sísmico por medio del análisis no lineal. En cuanto al riesgo sísmico se puede decir que depende de la peligrosidad y de la vulnerabilidad sísmica; que representa la probabilidad de que una estructura o un grupo de ellas, sufra cierto grado de daño durante un período de exposición dado. Por otro lado, la peligrosidad sísmica es la probabilidad de que una medida escalar de intensidad sísmica seleccionada en un sitio, exceda un valor dado en un intervalo de tiempo determinado y la peligrosidad o fragilidad sísmica se define en una estructura como el grado de daño debido a la ocurrencia de un sismo de intensidad dada.

En este trabajo, se presentó una sección relacionada al daño sísmico en edificios, el cual representa el nivel de deterioro causado por una acción sísmica, y unos índices de daño propuestos por diferentes investigadores. También se presentó una metodología que se centra en el análisis de aceptabilidad, siendo este análisis la clave para verificar el diseño sísmico por medio de análisis lineales o no lineales, esta metodología se conoce con el nombre de ingeniería sísmica basada en desempeño. Esta metodología engloba el rango completo de actividades ingenieriles necesarias para crear estructuras con un comportamiento sísmico predecible. Seguidamente, se presentaron los métodos de evaluación del diseño sísmico basado en desempeño o comportamiento. Los métodos son tres y requieren la asimilación de un sistema MDOF a uno SDOF. Los métodos son: el método del espectro de capacidad, el método N2 y el método basado en desplazamiento. En los dos primeros métodos se calcu-

la el desplazamiento de desempeño de la estructura y con el método basado en desempeño se hace el proceso inverso, dado un comportamiento de diseño se determina la fuerza basal para la que debe ser dimensionada la estructura. Estos métodos constituyen una gran herramienta para la aplicación del diseño basado en desempeño y para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica. Finalmente, las curvas de fragilidad definen la probabilidad de alcanzar o exceder un estado de daño en función de un parámetro representativo de la acción sísmica. Las matrices de probabilidad de daño se emplean para estimar la probabilidad de alcanzar un estado de daño para un grupo de edificios de una misma tipología, dada una intensidad sísmica. Con estos temas descritos en el presente capítulo, es posible introducirse en un análisis sobre la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios, situados en un emplazamiento dado.