

CAPÍTULO 6

DESEMPEÑO SÍSMICO DE EDIFICACIONES ESENCIALES

6.1. INTRODUCCIÓN

La experiencia de sismos recientes ha puesto en evidencia una importante limitación del enfoque implícito en los códigos de diseño sísmico hasta ahora empleados; el desempeño de una edificación durante un sismo no está dado de manera explícita en estos códigos y los enfoques empleados no conducen a un eficiente control de los daños ni a una plena satisfacción de la filosofía de diseño sismorresistente (Bertero, 1992). De hecho, la mayoría de las metodologías de evaluación y previsiones para el diseño sísmico, sólo consideran un nivel de movimiento del terreno para el cual, la edificación no debería colapsar. Estas previsiones raramente reconocen que pueden ocurrir daños sustanciales y grandes pérdidas asociados a sismos de naturaleza más frecuente. En tal sentido, es importante reconocer que la seguridad ante el colapso debido a grandes sismos no implica necesariamente un comportamiento aceptable de la edificación durante sismos de pequeña o moderada intensidad, por lo que se requiere definir múltiples niveles de desempeño como una estrategia para disponer de nuevas alternativas aceptables de evaluación.

En este sentido, se han impulsado una serie de propuestas para la evaluación y diseño de edificaciones basadas en los conceptos de *desempeño sísmico*, donde la aceptación de los diferentes niveles de daños se determina basado en la frecuencia con los cuales estos daños ocurren y en las consecuencias que tienen sobre los usuarios y la comunidad. Dentro de esta concepción, identificada o definida como un *diseño basado en el desempeño sísmico*, se engloban aquellas metodologías según las cuales los criterios estructurales se expresan en términos de determinados niveles de desempeño esperados. Entre las principales propuestas que impulsan el desarrollo de estos conceptos destacan las recomendaciones del Comité VISION 2000 (SEAOC, 1995) y las propuestas del ATC-40 (1996). Aunque ambas propuestas difieren en detalles, se fundamentan en los mismos conceptos desarrollados a continuación.

El presente capítulo desarrolla los conceptos asociados al desempeño sísmico de las edificaciones según las propuestas del comité VISION 2000 (SEAOC, 1995) y del ATC-40 (1996). El objetivo principal de este capítulo es sentar las bases y los criterios de calificación de la respuesta sísmica de las edificaciones esenciales que permitan la toma de decisiones respecto de su comportamiento esperado durante un sismo, fundamentada en los conceptos de desempeño sísmico, desde el punto de vista estructural y no estructural, para diferentes niveles de movimiento del terreno. Asimismo, se describen cualitativamente las diferentes acciones o intervenciones destinadas a reducir la vulnerabilidad sísmica de estas instalaciones.

6.2. DISEÑO BASADO EN EL DESEMPEÑO SÍSMICO

De manera general, el *diseño basado en el desempeño sísmico* consiste en la selección de apropiados esquemas de evaluación que permitan el dimensionado y detallado de los componentes estructurales, no estructurales y del contenido, de manera que para un nivel de movimiento especificado y con diferentes niveles de confiabilidad, la estructura no

debería ser dañada más allá de ciertos estados límites (Bertero, en SEAOC, 1995). Tiene por objeto el desarrollo de métodos que permitan concebir, diseñar, construir y mantener edificaciones que sean capaces de exhibir un desempeño predecible, cuando son afectadas por sismos. El desempeño se cuantifica en términos de la cantidad de daño sufrido por un edificio afectado por un movimiento sísmico y el impacto que tienen estos daños en las actividades posteriores al evento sísmico. Este concepto no es sólo aplicable a edificios, sino que puede ser extendido a todo tipo de estructuras e incluso a sus componentes no estructurales y contenido (Hamburger, 1997; Porter et al., 1993).

La definición del comportamiento esperado de una edificación durante movimientos sísmicos de diferentes intensidades debe ser establecida de manera cualitativa, en una primera *fase conceptual*, antes de emprender las sucesivas fases del proceso, entre las que destacan la *fase numérica*, orientadas al diseño propiamente dicho, y finalmente la *fase de implementación*, donde la calidad del diseño debe ser garantizado por un adecuado control de calidad durante la ejecución y mantenimiento de las obras (Teran, 1997). Durante esta primera fase conceptual, el desempeño sísmico de las edificaciones se establece sobre la base de tres conceptos fundamentales: el *nivel de desempeño*, el *nivel de amenaza* y el *desempeño esperado de la edificación*.

6.2.1. Nivel de desempeño

El *nivel de desempeño* describe un estado límite de daño. Representa una condición límite o tolerable establecida en función de los posibles daños físicos sobre la edificación, la amenaza sobre la seguridad de los ocupantes de la edificación inducidos por estos daños y la funcionalidad de la edificación posterior al terremoto (ATC-40, 1996). Es una expresión de la máxima extensión del daño, donde se considera tanto la condición de los elementos estructurales como de los elementos no estructurales y su contenido, relacionado con la función de la edificación. Los niveles de desempeño suelen expresarse en términos cualitativos de significación pública (impacto en ocupantes, usuarios, etc.) y en términos técnicos ingenieriles para el diseño o evaluación de edificaciones existentes (extensión del deterioro, degradación de elementos estructurales o no estructurales, etc.) (SEAOC, 1995).

6.2.1.1. Propuesta VISION 2000

La Propuesta del Comité VISION 2000 (SEAOC, 1995) define cuatro niveles de desempeño identificados a través de los siguientes calificadores:

A - Totalmente Operacional. Nivel de desempeño en el cual no ocurren daños. Las consecuencias sobre los usuarios de las instalaciones son despreciables. La edificación permanece totalmente segura para sus ocupantes. Todo el contenido y los servicios de la edificación permanecen funcionales y disponibles para su uso. En general no se requieren reparaciones.

B – Operacional. Nivel de desempeño en el cual ocurren daños moderados en elementos no estructurales y en el contenido de la edificación, e incluso algunos daños ligeros en elementos estructurales. El daño es limitado y no compromete la seguridad de la edificación que debería permanecer disponible para cumplir con sus funciones normales inmediatamente después del sismo, aunque los daños en elementos no estructurales y contenido, puede interrumpir parcialmente algunas funciones. En general, se requieren algunas reparaciones menores.

C - Seguridad. Nivel de desempeño en el cual ocurren daños moderados en elementos estructurales, no estructurales y en el contenido de la edificación. Degradación de la rigidez lateral y la capacidad resistente del sistema. Interrupción de servicios eléctricos, mecánicos y perturbación de las vías de escape de la edificación. Las instalaciones quedan fuera de servicio y el edificio probablemente requerirá reparaciones importantes.

D – Pre-Colapso. Nivel de desempeño en el cual la degradación de la rigidez lateral y la capacidad resistente del sistema compromete la estabilidad de la estructura aproximándose al colapso estructural. Interrupción de servicios y vías de escape. La edificación es completamente insegura para sus ocupantes y la extensión de las reparaciones pueden resultar no factible técnica o económicamente.

En la mencionada referencia, se incluye una amplia descripción de los niveles permisibles o tolerables de daño asociados a los cuatros niveles de desempeño indicados, para los diferentes sistemas y sub-sistemas del edificio, los componentes del sistema resistente a cargas verticales y laterales, así como los componentes secundarios y no estructurales (arquitectónicos, eléctricos, mecánicos, etc.). La Tabla 6.1., resume algunas de las principales características asociadas a estos niveles de desempeño y su relación con los estados de daños.

Tabla 6.1. Estados de daño y niveles de desempeño (SEAOC, 1995)

<i>Estado de daño</i>	<i>Nivel de Desempeño</i>	<i>Características principales</i>
Despreciable	Totalmente Operacional	Daño estructural y no estructural despreciable o nulo. Las instalaciones continúan prestando sus servicios y funciones después del sismo.
Ligero	Operacional	Daños ligeros. Las instalaciones esenciales continúan en servicio y las no esenciales pueden sufrir interrupciones de inmediata recuperación.
Moderado	Seguridad	Daños moderados. La estructura sufre daños pero permanece estable. Seguridad de ocupantes. Algunos elementos no estructurales pueden dañarse
Severo	Pre-Colapso	Daño estructural severo, en la proximidad del colapso estructural. Falla de elementos no estructurales. Seguridad de ocupantes comprometida.
Completo	Colapso	Colapso estructural

6.2.1.2. Propuesta ATC-40

La propuesta del ATC-40 (1996) especifica separadamente *el nivel de desempeño para la estructura y el nivel de desempeño para los componentes no estructurales* de manera que su combinación conduce a la definición del *nivel de desempeño de la edificación*.

- Nivel de desempeño para la estructura

Describen los posibles estados de daño sobre la estructura. Para tal fin, se definen tres estados de daño discretos o límites: inmediata ocupación, seguridad y estabilidad

estructural, y dos rangos intermedios: daño controlado y seguridad limitada, los cuales se designan con la abreviación SP-n, (“Structural Performance”, donde n es un número).

SP-1. Inmediata ocupación; el sistema resistente a cargas verticales y laterales permanece prácticamente inalterado, puede haber ocurrido daño estructural muy limitado, el peligro a la vida es despreciable y la edificación se mantiene funcionando en su totalidad.

SP-2. Daño controlado; corresponde a un estado de daño que varía entre las condiciones límite de inmediata ocupación y seguridad. La vida de los ocupantes no está en peligro aunque es posible que sean afectados.

SP-3. Seguridad; pueden haber ocurrido daño significativo en la estructura, sin embargo, la mayoría de los elementos estructurales se mantienen. Amenaza a la vida de los ocupantes interiores y exteriores e incluso, puede haber afectados. Costos elevados asociados a las reparaciones estructurales.

SP-4. Seguridad limitada; corresponde a un estado de daño que varía entre las condiciones límite de seguridad y estabilidad estructural, con alto peligro para los ocupantes.

SP-5. Estabilidad estructural; corresponde a un estado de daño en el cual el sistema estructural está en el límite de experimentar un colapso parcial o total. Han sucedido daños sustanciales, con una significativa degradación de rigidez y resistencia del sistema resistente a cargas laterales, aún cuando los componentes del sistema resistente a cargas verticales mantengan la capacidad suficiente para evitar el colapso. Existe un elevado peligro para ocupantes y transeúntes, así como un peligro elevado en caso de réplicas. Estas edificaciones requieren reparaciones estructurales significativas.

SP-6. No considerado; no corresponde con un nivel de desempeño de la estructura, sino con una condición en la cual sólo se incluye una evaluación sísmica de los componentes no estructurales. Se limita a considerar el desempeño de los elementos no estructurales.

- Nivel de desempeño para los componentes no estructurales

Describen los posibles estados de daño de los componentes no estructurales. Para tal fin, se definen cuatro estados de daño: operacional, inmediata ocupación, seguridad y amenaza, los cuales se designan con la abreviación NP-n (“Nonstructural Performance”, donde n designa una letra).

NP-A. Operacional; después del sismo, los sistemas, componentes y elementos no estructurales permanecen sin daño y funcionando. Todos los equipos y maquinarias deben permanecer operativos aunque algunos servicios externos no estén del todo disponibles.

NP-B. Inmediata ocupación; los sistemas, componentes y elementos no estructurales permanecen en su sitio, con pequeñas interrupciones que no comprometen o limitan su funcionamiento. Se mantiene un estado de seguridad para los ocupantes.

NP-C. Seguridad; contempla considerable daño en sistemas, componentes y elementos no estructurales, pero sin colapso o interrupción de los mismos que pueda atentar seriamente contra los ocupantes. No debería haber fallo en los componentes peligrosos, sin embargo, el

equipamiento y las maquinarias pueden quedar fuera de servicio. Puede haber algunos afectados, el peligro a la vida por los daños en componentes no estructurales es bajo.

NP-D. Amenaza; incluye importante daño en los sistemas, componentes y elementos no estructurales, pero sin colapso de los grandes y pesados elementos que pongan en peligro a grupos de personas. El peligro a la vida por los daños en componentes no estructurales es alto.

NP-E. No considerado; no corresponde con un nivel de desempeño de los componentes no estructurales, sino con una condición en la cual sólo se incluye una evaluación sísmica de los componentes estructurales. Se limita a considerar el desempeño de los elementos estructurales.

- Nivel de desempeño de la edificación

Describen los posibles estados de daño para la edificación. Estos niveles de desempeño se obtienen de la apropiada combinación de los niveles de desempeño de la estructura y de los componentes no estructurales. La Tabla 6.2., muestra las posibles combinaciones donde se han destacado e identificado los cuatro niveles de desempeño de edificaciones más comúnmente referenciados; operacional (1-A), inmediata ocupación (1-B), seguridad (3-C) y estabilidad estructural (5-E), así como otros niveles de desempeño posibles (2-A, 2-B, etc.). La designación NR corresponde a niveles de desempeño No Recomendables en el sentido que no deben ser considerados en la evaluación.

Tabla 6.2. Niveles de desempeño de la edificación (ATC-40, 1996)

	<i>SP-1</i> <i>Inmediata</i> <i>Ocupación</i>	<i>SP-2</i> <i>Daño</i> <i>Controlado</i> <i>(rango)</i>	<i>SP-3</i> <i>Seguridad</i>	<i>SP-4</i> <i>Seguridad</i> <i>limitada</i> <i>(rango)</i>	<i>SP-5</i> <i>Estabilidad</i> <i>Estructural</i>	<i>SP-6</i> <i>No</i> <i>considerado</i>
<i>NP-A</i> <i>Operacional</i>	1-A Operacional	2-A	NR	NR	NR	NR
<i>NP-B</i> <i>Inmediata</i> <i>Ocupación</i>	1-B Inmediata Ocupación	2-B	3-B	NR	NR	NR
<i>NP-C</i> <i>Seguridad</i>	1-C	2-C	3-C Seguridad	4-C	5-C	6-C
<i>NP-D</i> <i>Amenaza</i>	NR	2-D	3-D	4-D	5-D	6-D
<i>NP-E</i> <i>No</i> <i>Considerado</i>	NR	NR	3-E	4-E	5-E Estabilidad Estructural	No Aplicable

Estos niveles de desempeño están asociados a la siguiente descripción:

1-A. Operacional: se relaciona básicamente con la funcionalidad. Los daños en componentes estructurales son limitados. Los sistemas y elementos no estructurales permanecen funcionando. Cualquier reparación requerida no perturba ninguna función. Se

mantiene la seguridad de los ocupantes. Se mantienen las funciones de los servicios de la edificación, incluso cuando los externos a la misma no estén disponibles.

1-B. Inmediata ocupación; corresponde al criterio más usado para edificaciones esenciales. Los espacios de la edificación, los sistemas y los equipamientos permanecen utilizables. Se mantienen en funcionamiento los servicios primarios. Quizás algunos servicios secundarios presenten pequeñas interrupciones de fácil e inmediata reparación. Se mantiene la seguridad de los ocupantes.

3-C. Seguridad vital; corresponde a un estado de daños que presenta una baja probabilidad de atentar contra la vida. Constituye el nivel de desempeño de la edificación que se espera alcanzar con la aplicación de los actuales códigos sísmicos; es decir, que se corresponde a un desempeño equivalente al que se obtendría con la aplicación sistemática de los códigos actuales de diseño sísmico. Se caracteriza por presentar daños limitados en los componentes estructurales y el eventual fallo o volcamiento de los componentes no estructurales, con posibilidad inclusive de fallo en algún elemento peligrosos y en alguno de los elementos primarios (servicios de agua, electricidad, etc.) y secundarios (acabados, fachadas, etc.), siempre que no atente contra la vida de los usuarios.

5-E. Estabilidad estructural; para este estado de daño prácticamente no queda reserva alguna del sistema resistente a carga lateral que permita soportar una réplica, sólo se mantiene cierta capacidad del sistema resistente a cargas verticales para mantener la estabilidad de la estructura, de manera que el peligro para la vida es muy alto. El nivel de daño estructural implica que no se requiere la revisión de los componentes no estructurales. El peligro de los ocupantes y transeúntes por el colapso o falla de componente no estructurales exige el desalojo de la edificación.

6.2.2. Desempeño esperado de la edificación

El *desempeño esperado de la edificación* describe un comportamiento sísmico que pueden considerarse satisfactorio para una edificación sometida a movimientos sísmicos de diferentes intensidades (ATC-40, 1996). Es una expresión del comportamiento deseado o del desempeño objetivo que debe ser capaz de alcanzar un edificio sujeto a un determinado nivel de movimiento sísmico. Pueden definirse múltiples niveles de desempeño esperado, seleccionando diferentes niveles de desempeño de la edificación para cada uno de los niveles de movimientos especificados. Su selección debe estar basada en las características de ocupación de la edificación, la importancia de la función de sus instalaciones, las consideraciones económicas relacionadas con los costos de reparación de daño y de interrupción de servicios, la importancia de la edificación en el ámbito histórico y cultural (SEAOC, 1995).

El desempeño esperado está íntimamente ligado a la definición de los *niveles de amenaza sísmica* que puede ser expresado en forma probabilística o determinística. En los enfoques probabilistas, especificando un nivel de movimiento asociado con una probabilidad de ocurrencia, mientras que en los enfoques deterministas, en términos del movimiento máximo esperado para un evento, con una magnitud dada y asociado a una fuente específica. Convencionalmente estos movimientos se especifican en términos de parámetros ingenieriles para fines de diseño como por ejemplo, la intensidad macrosísmica, aceleraciones pico, los espectros de respuesta, etc., relacionados con el período medio de retorno o bien, con la probabilidad de excedencia. *El período medio de retorno* es una

expresión del período de tiempo medio, en años, entre la ocurrencia de sismos que producen efectos del mismo orden de severidad. *La probabilidad de excedencia* es una representación estadística de la posibilidad que las consecuencias de un sismo excedan un nivel de efectos determinados en un tiempo específico de exposición, en años (SEAOC, 1995). El período medio de retorno y la probabilidad de excedencia pueden relacionarse directamente como;

$$T = -\frac{t}{\ln(1-p)} \tag{6.1}$$

- T ... Periodo medio de retorno, en años.
- p ... Probabilidad de excedencia.
- t ... Tiempo de exposición, en años

6.2.2.1. Propuesta VISION 2000

La propuesta del Comité VISION 2000 (SEAOC, 1985) define cuatro niveles de amenaza sísmica. La Tabla 6.3., reproduce los correspondientes cuatro niveles de movimiento sísmico que se designan con los siguientes calificadores;

Tabla 6.3. Niveles de movimiento sísmico (SEAOC, 1995)

<i>Nivel del movimiento sísmico</i>	<i>Período medio de retorno T (años)</i>	<i>Probabilidad de excedencia (p,t)</i>
Frecuente	43 años	50% en 30 años
Ocasional	72 años	50% en 50 años
Raro	475 años	10% en 50 años
Muy Raro	970 años	10 % en 100 años

El desempeño esperado de las edificaciones establece los requerimientos mínimos sobre el desempeño sísmico ante los diferentes niveles de amenaza. La Tabla 6.4., reproduce los niveles recomendados de desempeños esperados para edificaciones, conforme a su clasificación de acuerdo al uso y ocupación en instalaciones de seguridad crítica, instalaciones esenciales/riesgosas e instalaciones básicas.

Tabla 6.4. Niveles recomendados de desempeños esperados (SEAOC, 1995)

1 ..Instalaciones Básicas 2 ..Instalaciones Esenciales/Riesgosas 3.. Instalaciones de Seguridad Crítica 0...Desempeño inaceptable		<i>Nivel de Desempeño Sísmico</i>			
		<i>Totalmente Operacional</i>	<i>Operacional</i>	<i>Seguridad</i>	<i>Colapso</i>
<i>Nivel del Movimiento Sísmico</i>	<i>Frecuente (T=43 años)</i>	1	0	0	0
	<i>Ocasional (T=72 años)</i>	2	1	0	0
	<i>Raro (T=475 años)</i>	3	2	1	0
	<i>Muy Raro (T=970 años)</i>	-	3	2	1

6.2.2.2. Propuesta del ATC-40

De acuerdo a la propuesta del ATC-40 (1996) se definen tres niveles de amenaza correspondiente a movimientos sísmicos identificados como:

Sismo de Servicio (SS); correspondiente a movimientos de baja a moderada intensidad, de ocurrencia frecuente, generalmente asociados con un 50% de probabilidad de ser excedido en un período de 50 años, con un período medio de retorno de aproximadamente 72 años, de manera que puede llegar a ocurrir varias veces durante la vida útil de una edificación. En base a los resultados de peligrosidad típicos de un emplazamiento determinado, este movimiento representa aproximadamente la mitad del nivel de movimiento asociado al sismo de diseño tradicionalmente especificado en los códigos, por tratarse de sismos más frecuentes y de menor severidad.

Sismo de Diseño (SD); correspondiente a movimientos de moderada a severa intensidad, de ocurrencia poco frecuente, generalmente asociados con un 10% de probabilidad de ser excedido en un período de 50 años, con un período medio de retorno de aproximadamente 475 años. Se corresponde con el nivel de movimiento tradicionalmente especificado por la mayoría de los códigos de diseño para edificaciones convencionales y se espera que ocurra al menos una vez en la vida útil de una edificación.

Sismo Máximo (SM); correspondiente a movimientos de intensidad entre severos o muy severos, de muy rara ocurrencia, generalmente asociados con un 5% de probabilidad de ser excedido en un período de 50 años, con un período medio de retorno de aproximadamente 975 años. Se corresponde con el nivel de movimiento tradicionalmente especificado por los códigos de diseño para edificaciones esenciales y representa cerca de 1.25 a 1.5 veces el nivel de movimiento asociado al sismo de diseño tradicionalmente especificados en los códigos, de allí que la mayoría asocian esta relación al factor de importancia de las edificaciones esenciales, por tratarse de sismos menos frecuentes de mayor severidad.

El *nivel de desempeño esperado de la edificación*, se establece una vez identificados los límites de daños tolerables en una edificación y los niveles de movimientos del terreno debido a sismos. Para el ATC-40 (1996), la decisión sobre el nivel de desempeño esperado para una edificación depende básicamente de consideraciones funcionales, políticas, económicas (de costos), de preservación. Existe una amplia variedad de combinaciones, atendiendo a las características particulares de uso, función e importancia de cada edificación. Como muestra de ello, la Tabla 6.5., presenta a título de ejemplo, un nivel dual de desempeño esperado, asociado al llamado criterio de seguridad básica, generalmente empleado en edificaciones convencionales, donde se espera que la edificación presente un nivel de desempeño de seguridad vital (3-C) para un sismo de diseño (SD) y un nivel de desempeño de estabilidad estructural (5-E) para un sismo máximo (SM).

Tabla 6.5. Nivel de desempeño esperado: criterio de seguridad básica (ATC-40, 1996)

Nivel del movimiento del terreno	Nivel de desempeño de la edificación			
	Operacional	Inmediata Ocupación	Seguridad Vital	Estabilidad Estructural
Servicio (SS)				
Diseño (SD)			X	
Máximo (SM)				X

6.3. CONSIDERACIONES PARA EDIFICACIONES ESENCIALES

El enfoque o estrategia presentado bajo el concepto de *diseño basado en el desempeño sísmico* puede ser adaptado al diseño y/o evaluación de prácticamente cualquier tipo de edificación. En el caso particular de edificaciones esenciales, el problema está en definir razonables niveles de desempeño esperado de la edificación, compatible con los niveles de respuesta deseados y que se espera que estas instalaciones alcancen ante movimientos sísmicos de diferentes intensidades, lo cual por lo general es una decisión difícil y delicada, con serias implicaciones sociales, económicas y políticas.

Es evidente que en las edificaciones esenciales es fundamental el mantenimiento de sus funciones antes, durante y después de un terremoto. Esta condición exige ampliar los conceptos de desempeño estructural tradicionalmente considerados en edificaciones convencionales con los conceptos de desempeño no estructural y funcional. Sobre el diseño basado en el desempeño estructural se ha avanzado mucho y, por lo tanto, si se dispone de toda la información de sus características constructiva se puede evaluar el desempeño estructural de las edificaciones existente. Sin embargo, los estudios sobre el desempeño no estructural y funcional son más limitados y en algunos casos rebasan el campo de la ingeniería estructural y sísmica, involucrando seguramente otras disciplinas y especialidades. En este sentido, es importante examinar las diferentes propuestas que se han desarrollado y que abordan la evaluación de las edificaciones esenciales sobre la base de conceptos del desempeño sísmico desde un punto de vista estructural, no estructural y funcional.

Utilizando como base el formato contenido en la propuesta del ATC-40 (1996), la Tabla 6.6., presenta una equivalencia de los niveles de desempeño esperados para edificaciones esenciales, establecidos por las principales guías de diseño de este tipo de instalaciones. En particular se hace referencia a las recomendaciones contenidas en:

- Propuesta del Comité VISION 2000 (SEAOC, 1995) para instalaciones esenciales.
- Propuesta de los códigos de diseño sísmico del llamado “Triservices” (DOD, 1986).
- Título 24 – Hospitales, de la Comisión de Edificaciones del Estado de California (CBSC, 1995).
- Disposiciones particulares para el diseño sísmico de los “Veterans Administration Hospital” (VA, 1986).

Tabla 6.6. Niveles de desempeño esperado para edificaciones esenciales

Nivel del movimiento Del terreno	Recomendaciones de diseño.			
	<i>Vision 2000</i>	<i>Triservices Essential</i>	<i>California Hosp/Essent.</i>	<i>VA Hospital</i>
<i>Servicio (SS)</i>	1A	1B		
<i>Diseño (SD)</i>	1B		1B	
<i>Máximo (SM)</i>	3C	3C	5E	1A

(Véase también Tabla 6.2.)

Se aprecia una importante discrepancia en las recomendaciones del nivel de desempeño esperado propuestos por las guías de diseño de edificaciones esenciales más reconocidas de E.E.U.U., lo cual pone de manifiesto la falta de consenso y la necesidad de clarificar los objetivos que se pretenden alcanzar para lograr un nivel de seguridad razonable en este tipo de edificaciones.

Es importante destacar el hecho de que hoy se dispone de metodologías, herramientas y tecnología para lograr que una edificación se diseñe y se construya de forma que cumpla los requerimientos de desempeño más restrictivos y exigentes, por lo que resulta impostergable la necesidad de definir en las edificaciones esenciales, los objetivos de diseño o los niveles de desempeño esperado de la edificación compatibles con los niveles de importancia de estas instalaciones y que el diseño basado en el desempeño sísmico constituye el camino apropiado para su implementación.

6.4. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE LAS EDIFICACIONES ESENCIALES

Una vez completada la *fase conceptual* y establecidos los niveles de daños tolerables en la edificación para cada nivel de amenaza, *la evaluación sísmica de una edificación* requiere establecer su capacidad de satisfacer el nivel de desempeño esperado, de acuerdo con la sismicidad local, propia o característica de su emplazamiento. De manera que las limitantes implícitas en el nivel de desempeño esperado de las edificaciones esenciales, representan en sí, los criterios de aceptación que servirán de base para la toma de las decisiones relativas a la necesidad de implementar una adecuación o intervención de la edificación. Esta decisión es compleja ya que involucra diversos factores que incluyen consideraciones técnicas, económicas, sociales y políticas, que desde un punto de vista formal, exigen la concurrencia de diversos elementos, entre los que destaca en primer lugar, una descripción de las diferentes decisiones que pueden adoptarse de conformidad con los niveles de desempeño de la edificación durante un sismo y presupone la existencia de un tomador de la decisión, que puede ser una persona, una institución, una entidad o el estado, el cual generalmente tiene unas preferencias subjetivas (Egozcue et al., 1997).

Desde el punto de vista operativo, la evaluación sísmica de una edificación exige como siguiente paso, la evaluación de las pérdidas potenciales o daños probables inducidos por los diferentes niveles de movimiento sísmico, de manera que, una edificación se considera sísmicamente inadecuada si las pérdidas potenciales estimadas durante la evaluación superan el nivel de daño tolerable y por ende, los niveles de exigencias sísmicas superan las previsiones sismorresistentes. Su desarrollo forma parte de la segunda fase del proceso de diseño basado en el desempeño sísmico; *la fase numérica*, que comprende tanto el diseño preliminar como el diseño final o diseño propiamente dicho y que involucra el dimensionado y detallado de los diversos componentes estructurales y no estructurales de la edificación, basado en alguna estrategias o procedimientos de evaluación que sea transparente, flexible, simple y concisa, capaz de responder a los requerimientos impuestos en la fase conceptual (Teran, 1997).

En este sentido, es importante tener presente que la evaluación de las pérdidas potenciales o daños probables inducidos por un movimientos sísmico en una edificación, involucra una gran cantidad de factores que van desde la apropiada definición de la excitación, la definición realista de un modelo estructural representativo de la edificación, una caracterización apropiada de materiales, una definición coherente de los estados de cargas y están limitados por la información disponible de la edificación y las limitaciones implícita en los modelos de análisis y de la respuesta, sobre todo los de naturaleza no lineal.

Existen una gran variedad de procedimientos analíticos para la evaluación sísmica de edificaciones existentes (SEAOC, 1995), algunos basados en comportamiento elástico-lineal y otros en un comportamiento inelástico, no lineal. En los primeros, se definen estados de fuerzas laterales estáticas o dinámicas y procedimientos elásticos para determinar la relación demanda-capacidad de los elementos; proporcionan una buena aproximación de la capacidad elástica y la primera cedencia, pero no pueden predecir mecanismos de falla, ni tomar en cuenta la redistribución de fuerzas durante el progreso de la cedencia. En los métodos inelásticos, es posible aproximarse a lo que realmente sucede en la edificación, identificar modos de falla y el potencial de un colapso progresivo.

La primera y más intuitiva estrategia, consiste en *estimar la sobre-resistencia local y global de una edificación existente*. Es sabido que la respuesta inelástica y la demanda de ductilidad de desplazamiento de una edificación depende en gran medida de su resistencia actual, la cual normalmente es mayor y en algunos casos mucho mayor que la considerada en el diseño. La relación entre la resistencia actual y la supuesta en el código de diseño define la sobre-resistencia estructural, de manera que un factor mayor que la unidad implica seguridad y viceversa, un factor menor que la unidad implica daño, fallo o colapso (Miranda, 1991). Entre los principales factores responsables de esta sobre-resistencia estructural destacan; los factores de magnificación o mayoración de las cargas, los factores de reducción o minoración de resistencia, el uso de esfuerzos admisibles en el diseño, las diferencias entre las resistencias reales y nominales de los materiales, el endurecimiento por deformación, los diseños gobernados por otros estados de cargas diferentes al sísmico o controlados por los desplazamientos, los requerimientos torsionales, los efectos tridimensionales no considerados, la contribución de elementos no estructurales, la uniformidad de la construcción, la contribución de los entrepisos. En fin, estos factores varían de edificio a edificio y su estimación es realmente difícil, además su presencia puede sobre todo a nivel local, modificar los mecanismos resistentes de la edificación, alterando de manera impredecible el patrón de respuesta esperado (Miranda, 1991). Una aplicación de este tipo de metodología (Freeman et al., 1984), considera un procedimiento de análisis elástico para calcular la fuerza en los elementos estructurales (demanda), la cual se compara con la capacidad cedente, a través de una llamada relación de demanda inelástica, de manera que, si dicha relación permanece dentro de un rango tolerable para todos los elementos, se puede considerar que la estructura satisface las previsiones sísmicas.

Otra estrategia para la evaluación de las pérdidas potenciales en edificaciones existentes consiste en *comparar las previsiones estructurales con las demandas sísmicas* que pueden ocurrir a lo largo de la vida útil de la edificación. Las previsiones estructurales, se refieren a parámetros o características estructurales tales como la resistencia cedente, la resistencia máxima, la capacidad de disipación de energía, la ductilidad, las deformaciones cedentes y máximas, etc., mientras que las demandas sísmicas, se refieren a parámetros de la respuesta de la edificación sujeta a movimientos sísmicos, entre los que destacan la demanda de resistencia elástica e inelástica, la demanda de desplazamientos, la demanda de ductilidad local y global, la demanda de energía histerética, etc. De manera que, tanto a nivel local como a nivel global, las previsiones estructurales deben ser mayores que las demandas sísmicas. Si bien la implementación puede ser difícil, fundamentalmente por las fuentes de incertidumbres asociadas, existen diferentes opciones disponibles en términos probabilísticos y sobre todo determinísticos que permiten la comparación de estos parámetros con resultados aceptables (Miranda, 1991).

Entre los métodos inelásticos destacan los basados en el análisis completo de la respuesta no lineal para una señal de entrada o historia de carga en el tiempo. Estos métodos tienden a ser procedimientos complejos y poco prácticos para uso general, por lo que se han desarrollado métodos de análisis no lineales simplificados, también llamados *métodos de análisis estático no lineal*, que constituyen una alternativa eficiente con mucho auge a los que se le ha dedicado especial atención en los últimos años (ATC-40, 1996).

6.4.1. Métodos simplificados de análisis estático no lineal

Cuando se somete una edificación a movimientos del terreno debido a sismos, experimenta desplazamientos laterales y consecuentemente deformaciones en sus elementos. Para respuestas de pequeña amplitud, las deformaciones en los elementos permanecen en el rango elástico y prácticamente no ocurren daños, mientras que para respuestas de mayor amplitud, las deformaciones de los elementos exceden su capacidad elástica y la edificación experimenta daños. En este caso, la mejor estimación de la respuesta global de la estructura y de la demanda en sus componentes individuales, se obtiene recurriendo a sofisticados procedimientos de análisis no lineal en el tiempo, cuyos resultados tienden a ser altamente sensibles a pequeños cambios del comportamiento de sus componentes y a las características del movimiento empleado. De hecho, un análisis dinámico no lineal conduce a diferentes estimaciones del desplazamiento máximo, para diferentes registros cubiertos por un mismo espectro de respuesta. Esta situación, ha propiciado el desarrollo de procedimientos simples, pero robustos, que permiten estimar los valores medios de la fuerza y el desplazamiento, los cuales se conocen como *métodos simplificados de análisis estático no lineal* (Tsopelas et al., 1997).

Existen diversos métodos de análisis estático no lineal para evaluar edificaciones existentes que permiten comparar la capacidad de la edificación con la demanda sísmica a la cual será expuesta. Entre los principales métodos simplificados de análisis estático no lineal destacan;

- El método del espectro capacidad-demanda; permite estimar gráficamente el desempeño sísmico de una edificación a través de la intersección del espectro de capacidad con el espectro de demanda (Freeman et al., 1984; ATC-40, 1996).
- El método del coeficiente del desplazamiento; procedimiento numérico para estimar la demanda de desplazamiento de una estructura usando una representación bilineal de la curva de capacidad y coeficientes de corrección. (ATC-40, 1996).
- El método de la secante; procedimiento numérico que sustituye la estructura por otra con rigidez secante o efectiva. (ATC-40, 1996).

A continuación se presenta una descripción detallada *del método del espectro capacidad-demanda* ya que el mismo permite hacer una representación gráfica muy clara y comparar directamente, el espectro de capacidad global (fuerza-desplazamiento) de la estructura con el espectro de respuesta representativo de la demanda sísmica, facilitando una rápida interpretación de la respuesta ante un movimiento del terreno.

6.4.2. Método del Espectro Capacidad-Demanda.

6.4.2.1. Fundamentos del método

El método se fundamenta en una representación aproximada de las características globales no lineales de la estructura, obtenida mediante el reemplazo del sistema no lineal por un sistema lineal equivalente usando como base procedimientos del análisis modal (ATC-40, 1996; FEMA, 1996). Si bien, estos procedimientos son válidos solamente para estructuras de comportamiento lineal, su uso en estructuras de comportamiento no lineal representa una aproximación que permite la representación del sistema a través de sus propiedades lineales efectivas. De manera que este método se diferencia de los métodos convencionales de análisis lineal, en que estos últimos utilizan directamente las propiedades elásticas de la estructura, mientras que los anteriores, usan propiedades efectivas o secantes de la misma, para calcular los desplazamientos. El uso de este método involucra varias aproximaciones, de manera que su implementación requiere además de conocimiento del comportamiento y la dinámica de estructuras, la aplicación de un sensato juicio ingenieril.

En términos generales, el método consiste en comparar el espectro de capacidad de la estructura con el espectro de la demanda sísmica para identificar el desplazamiento máximo ó punto de desempeño, donde la capacidad y la demanda se igualan, permitiendo estimar la respuesta máxima de la edificación, la cual servirá de base para compararla con el nivel de desempeño esperado.

Es importante destacar que la capacidad de una edificación particular y la demanda impuesta por un sismo dado no son independientes. De hecho, cuando se incrementa la demanda, la estructura eventualmente entra en cedencia, la rigidez disminuye y los períodos de vibración se alargan, lo cual se evidencia en el mismo espectro de capacidad. Adicionalmente, aumenta la energía disipada por ciclo, debido a la degradación de resistencia y rigidez, sobre todo cuando la edificación está en capacidad de experimentar ciclos histeréticos grandes y estables, incidiendo directamente en el amortiguamiento efectivo. De manera que, la determinación del desplazamiento donde la capacidad y la demanda se igualan, exige un proceso iterativo en el cual, inicialmente se compara el espectro de capacidad con el espectro de demanda, descrito a través del espectro de respuesta elástico usando 5% de amortiguamiento, que será sucesivamente ajustado por un factor de reducción, que tome en cuenta de manera compatible, la disipación histerética de energía o amortiguamiento efectivo asociado al punto de desplazamiento obtenido en cada fase. Una vez identificado el punto de desempeño asociado a la respuesta sísmica máxima que experimentará la edificación durante el movimiento sísmico especificado, se podrá decidir en función del nivel de desempeño esperado, la aceptabilidad o necesidad de intervención en una edificación existente.

6.4.2.2. Espectro de Capacidad

A través de un análisis estático no lineal incremental de un modelo representativo de la estructura se obtiene una curva de capacidad (Fig. 6.1.), la cual generalmente se representa como el corte basal (V_0), obtenido para varios incrementos del estado de carga lateral, respecto al desplazamiento lateral del último nivel de la edificación (Δ_n). Esta curva consiste en una serie de segmentos de rectas de pendiente decreciente, asociados a la progresiva degradación de la rigidez, la cedencia en elementos y en general, al daño. A este tipo de evaluación se conoce como un análisis “*pushover*” y su resultado está fuertemente

influenciado por el esquema de distribución de carga lateral supuesto; sin embargo, existen recomendaciones sobre como establecerlos de manera racional, por ejemplo, que la misma sea consistente con la distribución de fuerzas inerciales o con la forma de vibración del modo considerado. Además, la pendiente de la línea trazada desde el origen de coordenadas hasta un punto de la curva definido por un desplazamiento (d) representa la rigidez efectiva o secante de la estructura asociada a dicho desplazamiento.

Usando propiedades modales asociadas al modo fundamental de vibración, es posible transformar la curva de capacidad a un nuevo formato ADRS (“Acceleration-Displacement Response Spectra”) donde se representa la aceleración espectral (Sa), respecto al desplazamiento espectral (Sd), denominado *espectro de capacidad*. Para esta conversión, cada punto (Vo_i , Δn_i) de la curva de capacidad, corresponde a un punto (Sa_i , Sd_i) del espectro de capacidad, según:

$$Sd_i = \frac{\Delta n_i}{(\beta_1 \times \phi_{1,n})} \qquad Sa_i = \frac{Vo_i}{\alpha_1} \qquad (6.2)$$

- α₁ ... masa modal asociada al modo fundamental o primer modo de vibración.
- β₁ ... factor de participación asociado al modo fundamental.
- φ_{1,n} ... amplitud en el nivel n, de la forma de vibración del modo fundamental.

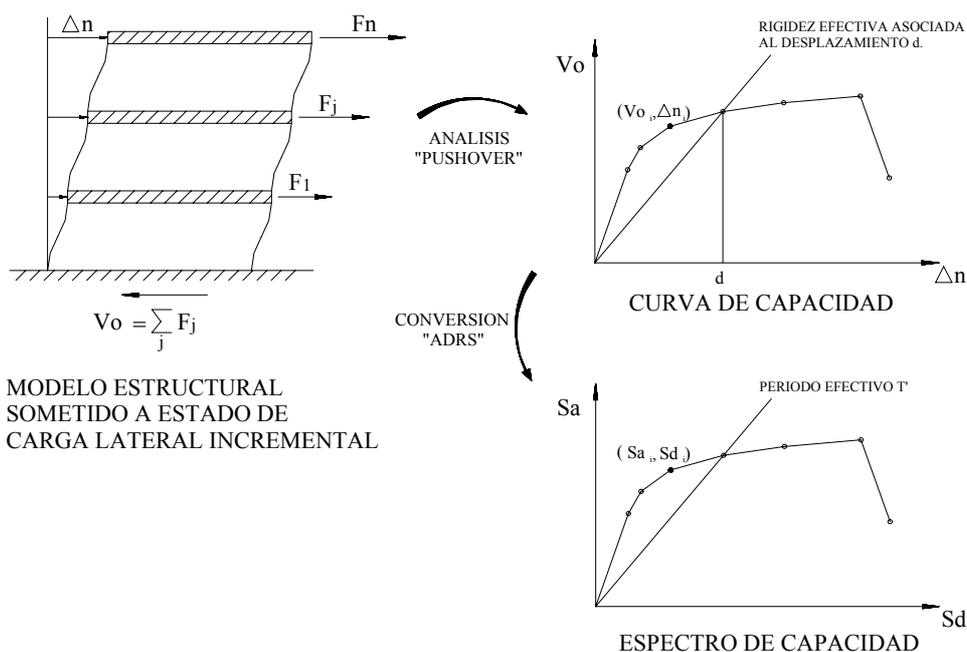


Fig. 6.1. Espectro de capacidad

En esta representación, cada línea trazada desde el punto origen hasta la curva, tiene una pendiente (ω')², donde ω' es la frecuencia circular asociada a la respuesta efectiva de la estructura cuando la misma es deformada hasta dicho desplazamiento espectral. De manera que el período efectivo de la estructura (T') asociado a dicho desplazamiento espectral puede determinarse como T'=2π/ω'.

6.4.2.3. Espectro de demanda

La demanda sísmica inicialmente se caracteriza usando el espectro de respuesta elástico de aceleración típicamente definido para un amortiguamiento del 5% (Fig. 6.2.), el cual debe ser transformado a un formato ADRS, es decir, de aceleración espectral (S_a como una fracción de la aceleración de gravedad g) respecto el desplazamiento espectral (S_d). Para dicha conversión cada punto (S_{a_i}, T_i) del espectro de respuesta donde T_i es el período en segundos, corresponde a un punto (S_{a_i}, S_{d_i}) del espectro de demanda, según:

$$S_{d_i} = \frac{T_i^2}{4\pi^2} S_{a_i} \times g \quad (6.3)$$

De manera que el *espectro de demanda* es una representación gráfica de la aceleración máxima de respuesta respecto el correspondiente desplazamiento máximo, para un período y nivel de amortiguamiento dado. Estos valores máximos se corresponden con los valores pseudoespectrales siempre que se trate de pequeños valores del amortiguamiento.

Este espectro de respuesta elástico debe ser sucesivamente ajustado para un factor de amortiguamiento compatible con el nivel de deformaciones esperado. De hecho, para altos niveles de deformación se esperan importantes incrementos en la capacidad de disipar energía, más aún, si la estructura cuenta con dispositivos de disipación, en cuyo caso, la demanda sísmica inicial debe ser reducida en proporción al incremento del amortiguamiento efectivo. Para tal fin, diversas recomendaciones proponen valores de amortiguamiento característico para diferentes sistemas estructurales (Tabla 6.7.) y factores de modificación de la respuesta elástica dependientes del amortiguamiento (Tabla 6.8.), los cuales deben aplicarse de manera consistente para cada nivel de movimiento del terreno especificado.

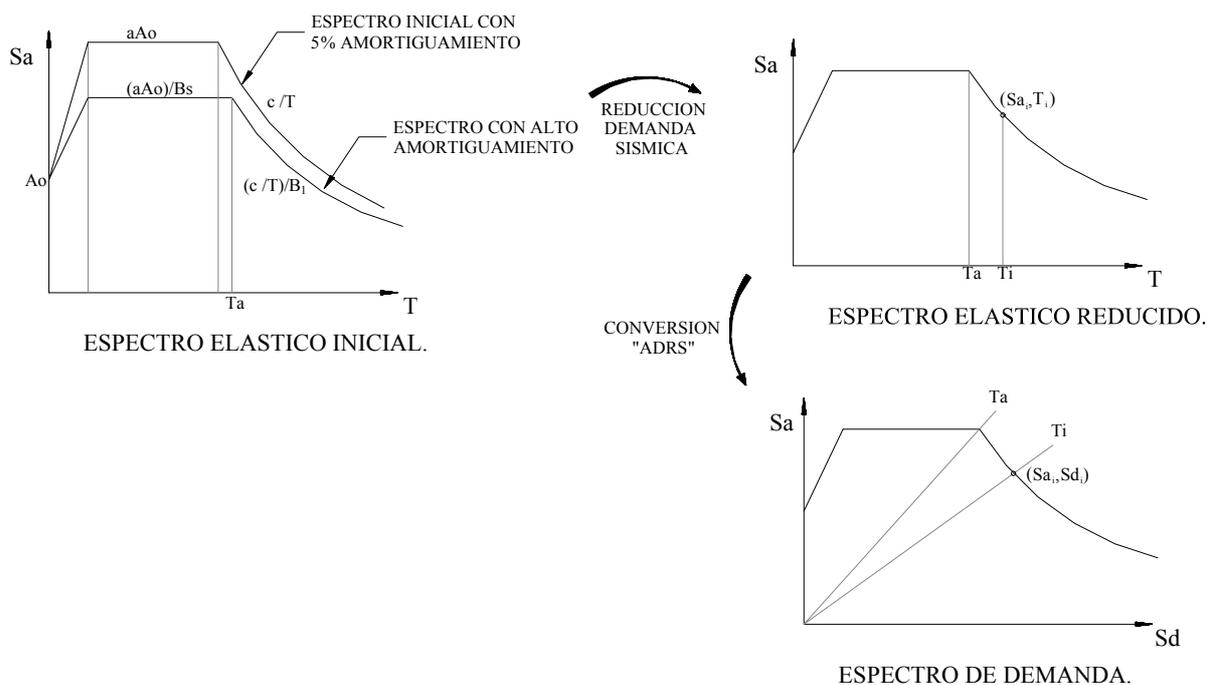


Fig. 6.2. Espectro de demanda sísmica

Tabla 6.7. Amortiguamiento para sistemas estructurales (Freeman et al., 1984)

<i>Sistema Estructural Principal</i>	<i>Elástico-lineal</i> (bajo nivel de deformación)	<i>Posterior a la cedencia</i> (alto nivel de deformación)
<i>Estructura metálica</i>	3%	7%
<i>Concreto reforzado</i>	5%	10%
<i>Mampostería</i>	7%	12%
<i>Madera</i>	10%	15%
<i>Sistema dual</i>	(1)	(2)

Notas: (1) Usar un promedio ponderado en proporción a la participación relativa de cada sistema.
 (2) Puede usarse el valor del sistema con mayor amortiguamiento.

Tabla 6.8. Factor de modificación de la respuesta elástica (FEMA, 1996)

<i>Factor de amortiguamiento</i>	<i>Factor B_s</i> (Rango de cortos periodos)	<i>Factor B_l</i> (Rango de largos periodos)
≤ 2%	0.8	0.8
5%	1.0	1.0
10%	1.3	1.2
20%	1.8	1.5
30%	2.3	1.7
40%	2.7	1.9
≥ 50%	3.0	2.0

6.4.2.4. Estimación de la respuesta sísmica máxima

Superponiendo el espectro de capacidad con el espectro de la demanda sísmica es posible identificar la intersección de las curvas, definiendo así el *punto de desempeño* (A, d), donde se igualan la demanda y la capacidad. Este punto representa la respuesta estructural correspondiente al modo fundamental de vibración en términos de pseudo-aceleración y pseudo-desplazamiento espectral asociado al máximo desplazamiento, que permiten la determinación del desplazamiento Δn y corte basal V_o , usando procedimientos de análisis modal, de manera que:

$$V_o = A \times \alpha_1 \quad \Delta n = d \times \beta_1 \times \phi_{1,n} \quad (6.4)$$

Si el desplazamiento Δn está asociado a un nivel de deformaciones que no es compatible con el nivel de amortiguamiento implícito en la reducción de la demanda sísmica supuesta, es necesario repetir el proceso hasta lograr compatibilizar estos parámetros. De manera similar, utilizando los parámetros modales asociados a los modos superiores de vibración puede obtenerse la respuesta estructural para otros modos de vibración.

La Fig. 6.3., describe gráficamente el citado procedimiento. En la misma se observa como el espectro de demanda sísmica inicial debe ser apropiadamente reducido tomando en consideración un factor de amortiguamiento compatible con la capacidad de disipación de energía del sistema, el cual está asociado con el nivel de deformaciones esperado y determinado por el punto de desempeño sobre el espectro de capacidad. Asociando en el eje de las abscisas los correspondientes valores espectrales de desplazamientos que determinan los diferentes rangos del desempeño estructural, es posible calificar de manera directa el desempeño de la estructura para los diferentes niveles de la amenaza sísmica considerados.

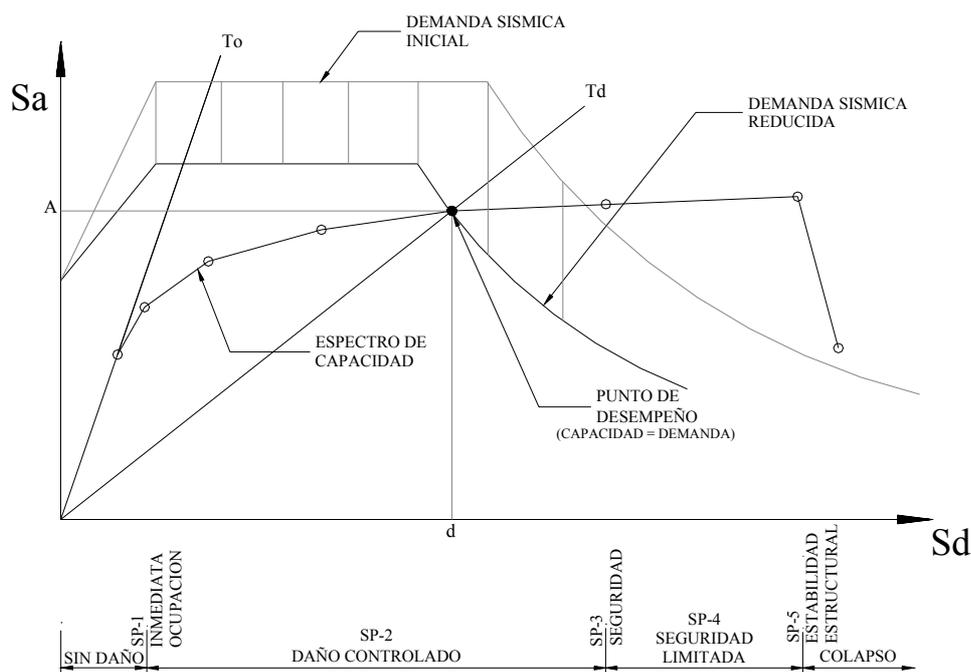


Fig. 6.3. Espectro de Capacidad-Demanda (ATC-40, 1996).

Así pues, el espectro capacidad-demanda, constituye una herramienta gráfica bastante práctica que permite determinar entre otras cosas;

- La respuesta estructural máxima del sistema.
- Calificar el desempeño sísmico que experimentará la edificación durante un movimiento sísmico específico, lo cual requiere la definición de los rangos de desplazamiento espectral asociado a cada nivel de desempeño estructural.
- La modificación del período de vibración efectivo durante el sismo respecto al obtenido en régimen elástico para bajos niveles de deformación.
- Evaluar la eficiencia de un esquema de intervención estructural propuesto.

Finalmente, es importante destacar que la metodología descrita representa un enfoque aproximado para determinar la respuesta no lineal de una edificación sometida a un movimiento sísmico y que en ningún caso, debe ser considerado como una solución exacta. Sin embargo, estudios comparativos entre los resultados de un análisis no lineal en el tiempo, con los métodos de análisis estático no lineal simplificado (Tsopeles et al., 1997), demuestran que el método del espectro capacidad-demanda, permite en general obtener buenos estimados de la respuesta estructural en términos del desplazamiento máximo promedio y de la aceleración total, sobre todo si se incorpora apropiadamente la reducción de la demanda sísmica debido a la modificación del amortiguamiento del sistema. En especial, se obtienen resultados satisfactorios para estructuras cuya respuesta sísmica está gobernada por el modo fundamental de vibración.

6.5. NECESIDAD DE INTERVENCIÓN DE LA EDIFICACIÓN

El resultado de la evaluación sísmica debe servir de base para la toma de decisiones referente a la necesidad de intervención de una edificación. Esta decisión puede dirigirse hacia diferentes posiciones que van desde no tomar ninguna acción, hasta hacer mínimas reparaciones y/o modificaciones, adecuar, reajustar la edificación ó inclusive la demolición.

Cada una de estas acciones debe estar dirigida a reducir la vulnerabilidad funcional, no estructural o estructural de la edificación, dependiendo de los requerimientos asociados al nivel de desempeño esperado y a los resultados de la misma evaluación. En este sentido, lo importante es entender que la intervención de la vulnerabilidad de los elementos expuestos debe hacerse antes de la ocurrencia del evento sísmico para lograr una efectiva mitigación del daño causado por el mismo y que permita reducir o prevenir los daños y consecuencias que puede inducir un evento sísmico sobre una región o población. De manera que, la pronta adopción de medidas preventivas es la mejor manera de mitigar los efectos producidos por estos desastres y que la mitigación no tiene precio, a largo plazo se paga, no sólo con dinero real sino con vidas salvadas (OPS, 1993).

6.5.1. La intervención estructural

Desde un punto de vista estructural, la adecuación o reajuste de una edificación, comúnmente referida como *reforzamiento estructural*, consiste en una modificación sensata de las características estructurales (resistencia, rigidez, masa, deformabilidad, capacidad de disipación de energía, etc.) que permita proporcionar a la misma un desempeño sísmico aceptable. Ello implica necesariamente la identificación de las deficiencias sísmicas de la edificación y la selección de una apropiada estrategia de adecuación que permita reducir la vulnerabilidad a un nivel aceptable, conforme con las características particulares de cada edificación.

Las estrategias de adecuación o reforzamiento estructural persiguen reducir la susceptibilidad de la edificación de sufrir daños debidos a un sismo. Teniendo en cuenta que dichos daños generalmente dependen del nivel de deformaciones (máxima deformación), así como de la historia de deformaciones (número, magnitud, secuencia de incursiones inelásticas, etc.), es importante reconocer que el control de daños implica en cierta manera el control de las deformaciones relativas.

La intervención estructural consiste en la implementación de todas aquellas medidas estructurales necesarias para garantizar un nivel de desempeño estructural adecuado ante un sismo. En términos generales, las estrategias de reforzamiento y adecuación estructural pueden englobarse desde el punto de vista cualitativo en tres grupos (ATC-40, 1996); las técnicas de rigidización y/o reforzamiento, técnicas para elevar la capacidad de deformación y técnicas para reducir la demanda sísmica. En la práctica, estas técnicas suelen implementarse a través de la inserción de elementos adicionales como muros de corte (tanto exteriores como interiores a la edificación), contrafuertes, pórticos, pórticos arriostrados, arriostramiento de pórticos, muros de relleno en pórticos, reforzamiento de diafragmas, reforzamiento de columnas y vigas, incorporación de elementos de confinamiento, incorporación de elementos de aislamiento de base, utilización de unidades de disipación de energía, modificación de la rigidez local de elementos, incorporación de soportes adicionales, reducción de masa por remoción o sustitución de componentes pesados o inconvenientemente situados.

- *Reforzamiento y rigidización del sistema*; representan las estrategias más comúnmente empleadas para intervenir edificaciones con un inadecuado sistema resistente a cargas laterales. Pueden estar orientadas a incrementar la capacidad resistente o incrementar la rigidez lateral. Ambas estrategias están muy relacionadas pero son diferentes. Las Figuras 6.4.a. y 6.4.b., esquematizan el efecto de este tipo de intervención que en términos prácticos se implementan con la introducción de muros ó pórticos adicionales en la estructura ó a través de la intervención de los existentes.

- *Mejoramiento de la capacidad de deformación*; el incremento de la capacidad de deformación del sistema se logra mejorando la capacidad de deformación de los elementos que la componen, de manera que las acciones generalmente están orientadas a mejorar el confinamiento en elementos poco dúctiles, incrementar la resistencia, reducir la rigidez localmente o agregar soportes adicionales. La Fig. 6.4.c., esquematiza el efecto de esta intervención.

- *Reducción de la demanda sísmica*; implica modificaciones en la respuesta estructural para reducir las demandas de fuerzas y deformaciones en el sistema. Existen diferentes estrategias tales como el aislamiento de la base, el incremento de la capacidad de disipación de energía empleando dispositivos disipadores (Fig. 6.4.d.) y finalmente, la reducción de masas innecesarias, que redundará en reducción de las fuerzas sísmicas.

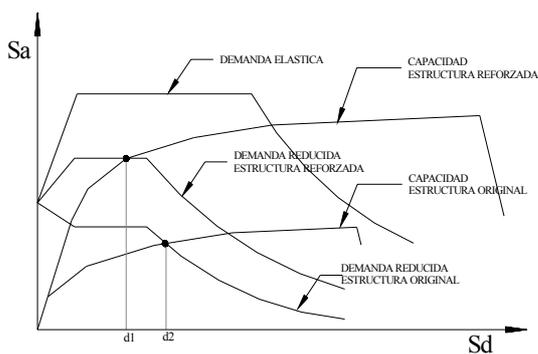


Fig. 6.4.a. Efecto del reforzamiento

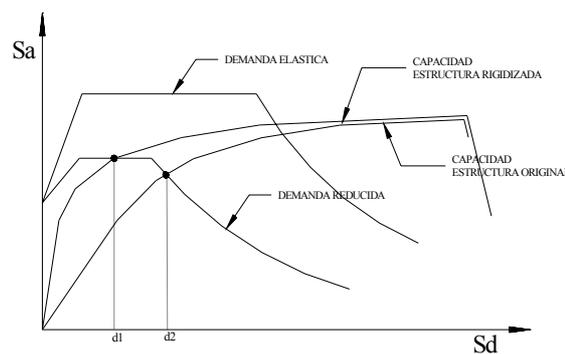


Fig. 6.4.b. Efecto de la rigidización

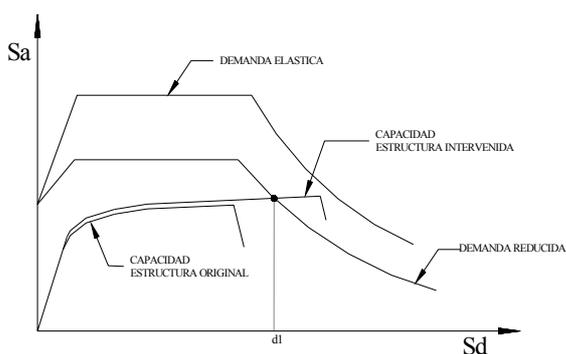


Fig. 6.4.c. Efecto del incremento de la capacidad de deformación

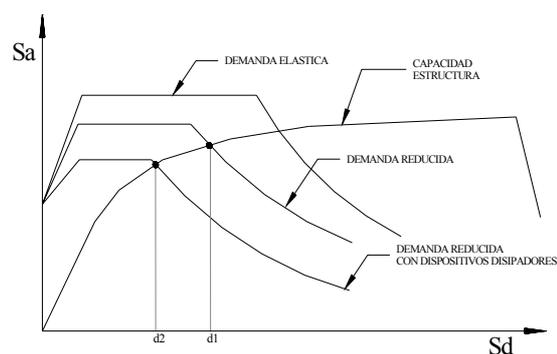


Fig. 6.4.d. Efecto del incremento de la capacidad de disipación de energía

Si bien estas medidas pretenden reducir la vulnerabilidad estructural, en la mayoría de los casos, no son suficientes para reducir la vulnerabilidad no estructural y mucho menos la funcional. De manera que cuando se decide la intervención de una edificación, debe hacerse con una visión suficientemente amplia para cubrir los diferentes aspectos involucrados. En este sentido, es importante diferenciar una intervención estructural de una intervención no estructural y funcional (OPS, 1993).

6.5.2. La intervención no estructural

La intervención no estructural consiste en la implementación de todas aquellas medidas sobre el sistema, los elementos y los componentes no estructurales, necesarias para garantizar su adecuado desempeño ante un sismo. Si bien, la intervención estructural repercute sobre algunos componentes no estructurales (sobre todo los arquitectónicos, como paredes y tabiques), es evidente que ciertos elementos, equipamiento y/o contenido expuestos, merecen la adopción de medidas apropiadas para reducir o eliminar su vulnerabilidad, evitando que sufran daño o que su fallo pueda atentar contra la seguridad de los ocupantes, los bienes y/o la funcionalidad de la instalación. En general, entre estas medidas de mitigación destacan la remoción y/o reubicación de elementos peligrosos, la restricción de la movilización de ciertos objetos, el uso apropiado de anclajes, de acoples flexibles y de soportes, la sustitución o modificación de objetos que representen peligro, el aislamiento de objetos, la fijación sobre todo de estanterías y otros elementos altos, el refuerzo de elementos, la redundancia de materiales esenciales, la rápida respuesta y reparación.

6.5.3. La intervención funcional

Se entiende por intervención funcional todas aquellas medidas necesarias para garantizar el mantenimiento de las condiciones apropiadas de funcionalidad al momento de la actuación ante una crisis sísmica. Teniendo en mente los importantes incrementos en la demanda de servicios característicos de las edificaciones esenciales, la intervención funcional debe estar orientada a identificar las deficiencias funcionales de la instalación en casos de emergencia y hacer las adecuaciones necesarias, que en algunos casos, pueden implicar variaciones en los diseños y distribuciones de áreas, de manera que permitan mitigar y prevenir colapsos funcionales. Ello en cierta manera escapa del alcance del técnico estructural y exige la intervención de todo un equipo multidisciplinario en el que participe personal especializado, ingenieros, arquitectos, planificadores, etc., con el fin de lograr una adecuación eficiente de la planta física, usos, servicios, accesos y áreas exteriores. Desde el punto de vista funcional, entre las medidas más importantes destacan la señalización de servicios, rutas de evacuación y escape, de equipos de emergencia, tanto en el interior de la edificación como en el exterior y los alrededores, la existencia de un plan de emergencia efectivo y probado, la permanente disponibilidad de las salidas de emergencia, la práctica de simulacros de actuación en caso de sismos, información sobre las acciones a tomar, equipamiento básico para atención de primeros auxilios y de comunicación, sistemas de alarma, redundancia en equipos y servicios vitales, entre otros.

6.6. RESUMEN Y DISCUSIÓN

Para solventar las limitaciones en el enfoque tradicionalmente implícito en los códigos de diseño sísmico hasta ahora empleados y promover una nueva generación de códigos que permitan concebir, diseñar, construir y mantener edificaciones que sean capaces de exhibir un desempeño predecible cuando son afectadas por sismo, se han impulsado una serie de propuestas basadas en los conceptos de desempeño sísmico implementadas dentro de la concepción del llamado diseño basado en el desempeño sísmico.

El desarrollo de este enfoque comprende tres fases; una fase conceptual, una fase numérica y una fase de implementación. La fase conceptual, constituye la médula espinal de este nuevo marco a través de la definición de los niveles de desempeño, los niveles de amenaza y el desempeño esperado de la edificación. Se han destacado dos propuestas que impulsan el desarrollo de este marco conceptual; el Comité VISION 2000 (SEAOC, 1995) y el ATC-40 (1996). Ambas propuestas difieren en detalles pero se fundamentan en los mismos conceptos, siendo aplicables no solo a edificios sino que pueden ser extendidos a otros tipos de estructuras.

Su aplicación al caso de las edificaciones esenciales parte de la definición de razonables objetivos de desempeño, compatibles con los niveles de respuesta que se esperan que estas instalaciones alcancen durante movimientos sísmicos de diferentes intensidades. En este sentido, reconocidos códigos y guías de diseño han propuesto los niveles de desempeño esperado para edificaciones esenciales de cuya comparación se desprende una importante discrepancia que pone de manifiesto la falta de consenso existente y la necesidad de clarificar los objetivos deseados para lograr un nivel de seguridad razonable y acorde con la importancia de este tipo de instalaciones.

Para la evaluación del comportamiento sísmico de las edificaciones, existen una gran cantidad de metodologías, algunas basadas en el comportamiento elástico-lineal y otras en el comportamiento inelástico-no lineal. De hecho, existen una variedad de procedimientos destinados a cuantificar la capacidad de la edificación que reconocen el carácter no lineal de la respuesta sísmica de la estructura y que permiten estimar los niveles de daños en función de la demanda sísmica. Los métodos convencionales de análisis no lineal de estructuras, basados en la respuesta dinámica en el tiempo, son generalmente complejos y poco prácticos para su uso general, lo que ha propiciado el desarrollo de métodos alternativos y simplificados, que aunque limitados en precisión, son robustos, poco sensibles a las particularidades de la señal y que permiten una implementación práctica. Entre estos métodos, uno de los que ha adquirido mayor fuerza en los últimos años, es el llamado *método del espectro capacidad-demanda* (ATC-40, 1996). Este método es un *procedimiento simplificado de análisis estático no lineal* que permite a través de una representación gráfica estimar el desempeño sísmico de una estructura. Consiste en comparar el espectro de capacidad de la estructura con el espectro de demanda sísmica para identificar el llamado punto de desempeño sísmico, donde la capacidad y la demanda se igualan, permitiendo estimar la respuesta máxima de la edificación, que servirá de base para identificar el nivel de desempeño sísmico y justificar la toma de las decisiones. Un aspecto atractivo de este método es su implementación gráfica, sin embargo ha sido objeto de importantes acotaciones y evaluaciones (Chopra y Goel, 1999, 2000), ya que en algunos casos no es capaz de proporcionar un buen estimado de la deformación inelástica del sistema. De manera que, es importante recordar que estos métodos representan un enfoque aproximado para determinar la respuesta no lineal de una estructura sometida a un movimiento sísmico y que en ningún caso, debe ser considerada como una solución exacta, ya que involucra importantes aproximaciones que requieren además del conocimiento del comportamiento y la dinámica de estructuras, la aplicación de un sensato juicio ingenieril.

El resultado de la evaluación del comportamiento sísmico de la edificación debe servir de base para la toma de decisiones referentes a la necesidad de intervención de una edificación, cuyas acciones deben estar dirigidas a reducir la vulnerabilidad funcional, no estructural o estructural de la edificación. Dentro de las estrategias de intervención estructural destacan las técnicas de reforzamiento y rigidización del sistema, el

mejoramiento de su capacidad de deformación y aquellas dirigidas a reducir los niveles de la demanda sísmica. La efectividad de cada una de estas estrategia debe ser evaluada según el caso, sin dejar de recordar la necesidad de complementarlas con intervenciones no estructurales y funcionales.

A veces intervenciones oportunas, sencillas y económicas, utilizar un poco de creatividad e imaginación, tomar medidas de precaución de fácil implementación, bastan para lograr importantes reducciones en los niveles de vulnerabilidad existentes como una contribución en la prevención y mitigación de los desastres sísmicos. Otras veces, serán necesarias intervenciones más profundas y por supuesto más costosas, sin embargo, cuando se trata de edificaciones esenciales, es poco cuanto se haga. Se debe recordar que, *la falta de preparación es una de las condiciones necesarias para que un sismo pase de ser un fenómeno natural a una catástrofe.*