



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**METODOLOGÍA BASADA EN DESEMPEÑO
PARA EDIFICIOS EN PÓRTICOS DE CONCRETO
REFORZADO**

Autores:

Camilo Velásquez Mesa

Andrés Felipe Ortega Naranjo

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Medellín, Colombia

2021



Metodología Basada en Desempeño Para Edificios en Pórticos de Concreto Reforzado

Camilo Velásquez Mesa
Andrés Felipe Ortega Naranjo

Tesis o trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Especialista en análisis y diseño de estructuras

Asesores (a):
Juan Carlos Vélez Cadavid

Línea de Investigación:
No Aplica.
Grupo de Investigación:
No aplica.

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Medellín, Colombia
2021.

1 MOTIVACION

En la actualidad el diseño sismo-resistente de edificaciones está fundamentado en la metodología de diseño basado en fuerzas (DBF), un procedimiento que ha sido reconocido y ampliamente aceptado por el gremio consultor del país, sin embargo, posee ciertas limitaciones o falencias en la estimación de ciertos parámetros a nivel de comportamiento de la estructura que son importantes conocer, como por ejemplo; el periodo estructural, la rigidez inicial del sistema, la ductilidad que pudiese desarrollar la estructura, el daño en elementos estructurales y no estructurales, entre otras.

Mediante un procedimiento de diseño basado en desempeño es posible determinar de forma más realista las demandas sísmicas locales y globales de la estructura, al partir de un desplazamiento esperado y posteriormente hallar las fuerzas internas generadas en cada uno de los elementos.

Estos procedimientos han sido utilizados comúnmente para realizar rehabilitaciones o análisis de vulnerabilidad de estructuras, sin embargo, ha tomado cierto reconocimiento como herramienta de diseño de estructuras nuevas; como es el caso de Nueva Zelanda que lo incluyó como una alternativa de diseño sísmico.

Las estructuras de pórticos de concreto reforzado son de las estructuras más comunes en los edificios utilizados en regiones de zona sísmica intermedia y alta en nuestro país. Sin embargo, el uso de estos sistemas estructurales y la variabilidad geométrica de las secciones de los elementos, materiales utilizados y sus propiedades mecánicas, conllevan a que el comportamiento dinámico de tales estructuras, bajo acciones sísmicas, sea difícil de evaluar.

Es por esto que mediante la metodología de diseño por desempeño, y aprovechando las ventajas que presenta respecto a la metodología basada en fuerzas (DBF), se pretende realizar una revisión bibliográfica acerca de su alcance y desarrollo, y comparar diferentes metodologías realizadas por diferentes autores alrededor del mundo mediante un cuadro comparativo, para determinar claramente el alcance de cada método y su posible aplicación según el tipo de estructura que se esté analizando, evidenciando también así, las ventajas y limitaciones que propone cada autor de una forma clara, concisa y sintetizada.

2 OBJETIVO GENERAL

Realizar una revisión bibliográfica del método de diseño sísmico por desempeño, analizando los diferentes métodos propuestos por autores a lo largo del tiempo, y estableciendo los criterios técnicos básicos que puedan servir como guía para ser utilizada por cualquier profesional de la ingeniería estructural con el propósito de saber que metodología aplicar a una estructura específica, mediante un cuadro comparativo de diferentes metodologías propuestas.

3 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Estudiar y evaluar las diferentes metodologías existentes en la actualidad para la aplicación del diseño sísmico por desempeño de estructuras, presentando los aspectos básicos y generales de cada uno, con el propósito de definir el rango de acción de los mismos.
- Determinar cómo se realiza el diseño por desempeño de edificios de pórticos de concreto reforzado y sus diferentes metodologías propuestas hasta la fecha.
- Desarrollar un cuadro comparativo sintetizando la información encontrada en la revisión bibliográfica, comparando los alcances y limitaciones de las metodologías de cada autor, el cual permitirá determinar que metodología es la más óptima según el tipo de edificación que se esté analizando.

4 MARCO TEÓRICO

El diseño estructural es una actividad ingenieril encargada de determinar objetivamente las características, especificaciones, dimensiones, materiales, entre otros, con las cuales se deben llevar a cabo el proyecto a ejecutar. La filosofía principal de diseño es que la estructura garantice una operabilidad ante las situaciones normales de uso y un cierto grado de seguridad y confiabilidad ante eventos extremos naturales, como por ejemplo sismos. El diseño estructural se realiza de acuerdo a diferentes metodologías de análisis que tienen una base científica y experimental, las cuales adoptan los reglamentos para hacer exigible el cumplimiento de dichos procedimientos, aceptando sus bondades y sus falencias.

Desde 1975 Park y Paulay consideraron que un incremento en la resistencia global de una estructura podría garantizar la seguridad y, por consiguiente, reducir el daño necesariamente, además, grandes avances en el tema permitieron identificar que, si las rótulas plásticas se forman en las vigas y no en las columnas, y que la resistencia a cortante de los miembros superara la correspondiente resistencia a flexión, garantizaría un mejor comportamiento de la estructura ante un evento sísmico. Estos dos aspectos pueden considerarse como el inicio de una nueva filosofía de ingeniería sísmica basada en desempeño

(ISBD de aquí en adelante), en donde es posible controlar y predecir el comportamiento de la estructura y sus posibles daños (Aguilar, 2010). En este caso, la ingeniería es más que un cálculo, incluye el desarrollo real de un sistema desde la concepción, pasando por la proyección y el diseño, el control de calidad en la construcción y el mantenimiento (Visión 2000, SEAOC 1995).

Las filosofías de diseño de las normas actuales han sido escritas primordialmente para mitigar la pérdida de vidas humanas, sin embargo, hoy es evidente que la gran cantidad de pérdidas económicas en edificaciones diseñadas de acuerdo a las normas actuales se deben a daños en los elementos no estructurales, tal como se muestra en la Figura 4-1:

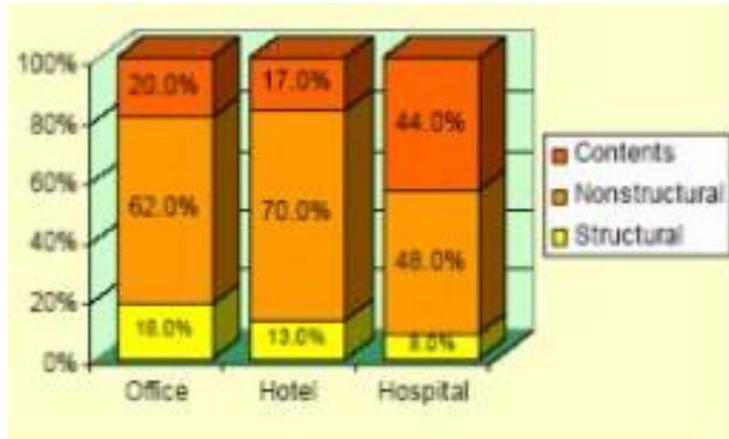


Figura 4-1 Distribución de costos en edificios (Taghavi y Miranda, 2003).

El método de diseño basado en desempeño de la estructura, además de garantizar y mitigar la pérdida de vidas humanas ante un evento sísmico, tiene en cuenta el desempeño de cada uno de los componentes de la edificación (incluyendo los elementos no estructurales), que como se evidenció en la Figura 4-1, es aproximadamente la mitad de los costos de una edificación, siendo de gran importancia la evaluación y control de su desempeño.

En Colombia el diseño sísmico se realiza con un criterio básico de desempeño, pues, aunque se busca los diferentes estados de funcionalidad estructural, solo se intenta pronosticar mediante un solo escenario de diseño que resulta insuficiente (Gallego, 2014).

En Estados Unidos la realidad es muy similar, el código ACI adopta los procedimientos de análisis basados en fuerzas (DBF); Sin embargo, el código FEMA con origen en dicho País, tiene por objetivo garantizar la calidad de la construcción a nivel local ante un desastre, haciendo modelos de códigos de construcción de la Nación de los Estados Unidos (García y Naranjo, 2011), con la inclusión de metodologías basadas en desempeño, que hasta el momento solo son aplicados para rehabilitación de estructuras existentes y no como una base del diseño de estructuras nuevas.

Debido a estas falencias en los actuales métodos de diseño, es importante tener en cuenta que la seguridad ante el colapso debido a grandes sismos, no implica necesariamente un comportamiento aceptable de la edificación durante sismos de pequeña y moderada intensidad, como se ha comprobado en sismos no muy alejados de la actualidad, como por ejemplo el sismo de Northridge-USA en 1994 y el sismo de Kobe-Japón 1995, en donde colapsaron muchas estructuras y se tuvieron grandes pérdidas

humanas y económicas, incluso en edificaciones que no debían colapsar como universidades, tal como se muestra en la Figura 4-2 y en la Figura 4-3:



Figura 4-2. Daño estructural de la Universidad de California en Northridge. que debió ser considerada como una estructura indispensable (tomada de https://elpais.com/elpais/2019/01/18/album/1547770866_044938.html?rel=mas#foto_gal_6)



Figura 4-3. Colapso de puente en el sismo de Kobe (tomada de <https://japon-secreto.com/el-gran-terremoto/>)

En forma sintetizada la ingeniería sísmica basada en desempeño es un método que, por medio de un procedimiento sistemático permite diseñar las edificaciones para que alcancen un comportamiento predecible y deseable de sus elementos estructurales y no estructurales. (Pérez, 2014). En la Figura 4-4 se presenta un flujo de trabajo para llevar a cabo un diseño por desempeño.

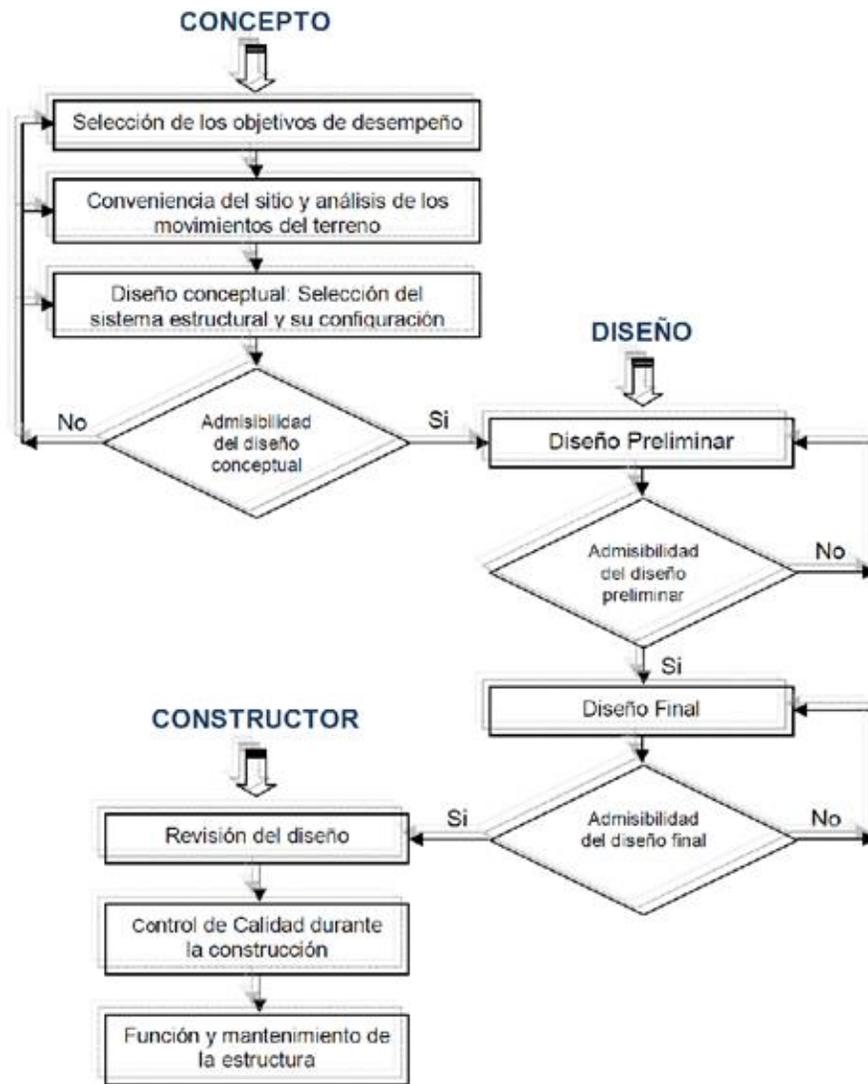


Figura 4-4. Diagrama de flujo diseño basado en desempeño. Tomada de Aguilar, 2010.

5 ESTADO DEL ARTE

El objetivo del diseño sísmico es proveerle a las estructuras características y propiedades tales que le permitan tener un comportamiento adecuado ante las diversas intensidades sísmicas a las cuales estará sujeta durante su vida útil, de tal forma que, ante intensidades frecuentes y moderadas se limiten los niveles de daño que puedan ocurrir, y para intensidades excepcionales se proteja la estabilidad e integridad física del sistema y consigo, la vida de personas que lo habitan.

En pro de lograr lo anterior, se han propuesto metodologías que dictan tener un control más directo de las deformaciones laterales de la estructura ante diferentes intensidades sísmicas. Esto es a grandes rasgos la filosofía del diseño sísmico basado en desempeño, la cual difiere en gran medida del procedimiento de diseño basado en fuerzas, metodología que ha sido adoptada por muchas normativas de diseño en diferentes países.

Según Priestley y Kowalsky (2007), los principales problemas de los métodos basados en fuerzas son:

- Los diseños por fuerzas se inician considerando una rigidez aproximada para determinar el periodo de la estructura, mediante el cual se distribuyen las fuerzas de diseño entre los diferentes elementos estructurales, sin embargo, como la rigidez es dependiente de la resistencia de los elementos, estas características no podrían ser conocidas hasta que el proceso de diseño sea finalizado.
- La asignación de las fuerzas sísmicas de los elementos estructurales basado en una rigidez inicial (aun así, si se conociera de forma precisa) no es un procedimiento lógico debido a que no es correcto asumir que todos los elementos estructurales fluirán al mismo tiempo y de manera simultánea.
- El diseño estructural basado en fuerzas (DBF) se fundamenta en que un único factor de modificación de respuesta (basándose en la ductilidad de la estructura) es apropiado para una forma estructural y para un material específico, lo cual no tiene la suficiente validez.

El criterio actual del diseño sísmico basado en desempeño pretende predecir y controlar el comportamiento estructural, es decir, diseñar un sistema estructural para sustentar un nivel predeterminado de daño bajo un nivel predefinido de intensidad sísmica. Dentro de la concepción del diseño basado en el desempeño sísmico, se encuentran las recomendaciones del Comité VISION 2000 (SEAOC, 1999) y las propuestas del ATC-40 (ATC, 1996). Ambas propuestas se fundamentan en los mismos conceptos.

El diseño basado en el desempeño sísmico consiste en la selección de apropiados esquemas de evaluación que permitan el dimensionamiento 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 límite (SEAOC, 1999). El desempeño se cuantifica en términos de la cantidad de daño en un edificio afectado por un sismo y el impacto que tienen estos daños en las actividades posteriores al evento sísmico. Este concepto no es solo aplicable a edificios, si no que puede ser extendido a todo tipo de estructuras e incluso a sus componentes no estructurales y contenido (Hamburger y Moehle, 2000; Porter et al., 1993).

La idea principal de esta filosofía es determinar de manera cualitativa el comportamiento esperado de una edificación durante movimientos sísmicos de diferentes intensidades, estableciendo los conceptos fundamentales de nivel de desempeño, nivel de amenaza y desempeño esperado de la edificación.

El nivel de desempeño 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 y la funcionalidad de la edificación posterior al movimiento sísmico (ATC, 1996).

Cabe notar que el paso inicial de la metodología consta en determinar los objetivos de desempeño, los cuales describen un estado límite de daño. La propuesta del comité Vision 2000 propone cuatro estados límites que se describen de forma general a continuación: el estado operacional está relacionado con la funcionalidad de la estructura; ocupación inmediata asocia daños mínimos en elementos no estructurales que no impidan el funcionamiento normal de la misma; seguridad a la vida relaciona daños limitados de elementos estructurales y eventuales fallos de elementos no estructurales; y el estado de prevención al colapso está asociado con un daño inminente de los elementos no estructurales, si bien se mantiene cierta capacidad del sistema estructural ante cargas verticales, la estructura no posee rigidez ante movimientos horizontales.

Para ilustrar de una mejor forma los daños que se pueden presentar en los anteriores estados límites descritos se presenta la Figura 5-1.



Figura 5-1. Representación gráfica de estados límites de diseño por desempeño. (Tomado de: Sesión 3 Diseño Basado en Desempeño - Youtube <https://www.youtube.com/watch?v=ZerYE9liDVK>).

A continuación, se enuncian los 6 niveles de desempeño para los elementos estructurales según la propuesta del ATC-40. Las iniciales SP significa "Structural Performance"

SP-1 Ocupación Inmediata; Los daños son muy limitados. El sistema resistente a cargas verticales y laterales permanece prácticamente inalterado. No existen pérdidas de vidas humanas 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 ocupación y seguridad inmediata. La vida de los ocupantes no está en peligro, aunque es posible que se vean afectados ligeramente.

SP-3. Seguridad de vida; puede haber ocurrido daño significativo en la estructura, sin embargo, la mayoría de los elementos estructurales se mantienen. Los daños después del evento sísmico no agotan por completo los márgenes de seguridad existentes frente a un posible colapso parcial o total de la estructura. Existe amenaza a la vida de los ocupantes interiores y exteriores e incluso, puede haber afectados. Cabe la posibilidad de requerir reparaciones estructurales, siempre y cuando sean viables desde el punto de vista económico.

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

SP-5. Estabilidad estructural o prevención del colapso; corresponde a un estado de daño en el cual el sistema estructural está en el límite de experimentar un colapso parcial o total. Han ocurrido daños sustanciales, con una significativa degradación de rigidez y resistencia del sistema estructural resistente a cargas laterales, aun cuando los componentes del sistema resistente a cargas verticales mantengan la capacidad suficiente para evitar el colapso. A pesar de que el sistema de cargas verticales se mantenga funcionando, existe un alto riesgo de que se produzca el colapso debido a posibles 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.

Adicionalmente, según la propuesta del ATC-40, se debe combinar el nivel de desempeño de los elementos estructurales con los componentes no estructurales de la edificación, los cuales se listan a continuación. La abreviación NP significa “Nonstructural Performance”:

NP-A. Operacional; una vez ocurrido el evento sísmico, los sistemas, componentes y elementos no estructurales permanecen en su sitio sin daño y funcionando de forma regular. Todos los equipos y maquinarias deben permanecer operativos, aunque algunos servicios externos no estén del todo disponibles, sin que esto comprometa la ocupación de la edificación.

NP-B. Ocupación Inmediata; los sistemas, componentes y elementos no estructurales permanecen en su sitio, con pequeñas interrupciones que no comprometen o limitan su funcionamiento. Algunos servicios externos pueden no estar disponibles. 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. Los sistemas, equipos y maquinaria pueden verse seriamente afectados, requiriendo, en algunos casos, ser reparados o, en el peor de los casos, reemplazados. Puede haber algunos afectados; el peligro a la vida por los daños en componentes no estructurales es bajo.

NP-D. Amenaza reducida; 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, como, por ejemplo: parapetos y muros exteriores de mampostería. 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.

Con base en las anteriores descripciones de los diferentes niveles de daño para los componentes de una edificación, según la propuesta del Vision 2000 y el FEMA 356, se puede formar una matriz que conduce al diseñador a la definición del nivel de desempeño global de la estructura. En la Tabla 1 se presenta la matriz para la definición del nivel de desempeño global de la estructura.

Tabla 1. Niveles de desempeño, propuestos por Visión 2000 y FEMA 356.

Niveles de Desempeño no estructural	Niveles de desempeño estructural					
	SP-1 Ocupación Inmediata	SP-2 Daño Controlado (Rango)	SP-3 Seguridad	SP-4 Seguridad limitada (Rango)	SP-5 Estabilidad Estructural	SP-6 No considerado
NP-A Operacional	1-A Operacional	2-A	NR	NR	NR	NR
NP-B Ocupación Inmediata	1-B Ocupación Inmediata	2-B	3-B	NR	NR	NR
NP-C Seguridad	1-C	2-c	3-C Seguridad	4-C	5-C	6-C
NP-D Amenaza	NR	2-D	3-D	4-D	5-D	6-D
NP-E No Considerado	NR	NR	3-E	4-E	5-E Estabilidad Estructural	No Aplicable

NR: Combinación No Recomendada

Para evaluar el comportamiento de las estructuras y determinar su desplazamiento objetivo con base en el nivel de desempeño estructural definido en la Tabla 1, se determina según varios autores y normativas vigentes, las derivas máximas asociadas a estos, como se muestra en la Tabla 2:

Tabla 2. Desplazamiento relativo objetivo según el nivel de desempeño

Referencia	Ocupación Inmediata SP-1	Seguridad a la Vida SP-3	Prevención al Colapso SP-5
FEMA 356	1% Transitorio, Permanente insignificante	2% Transitorio, 1% Permanente	4% Transitorio o 4% Permanente
ATC-40	1%	2%	—
ASCE-41	Deriva transitoria que cause el menor daño en elementos no estructurales. Deriva permanente insignificante	Deriva suficiente para causar daño en elementos no estructurales. Notable deriva permanente.	Deriva suficiente para causar un extenso daño en elementos no estructurales. Amplia deriva permanente.
Priestley, Calvi y Kowalsky	0.50%	2% - 2.5%	Deriva que presente un daño extensivo en elementos estructurales, pero que conserve una reserva de capacidad como se muestra en la Figura 5-2.

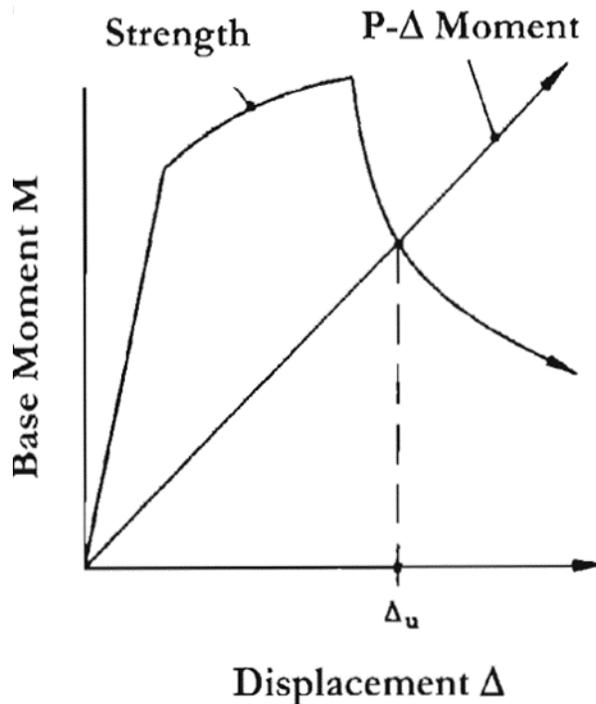


Figura 5-2. Relación de desplazamiento con el momento en la base (Priestley, Calvi y Kowalsky)

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 el enfoque probabilista, 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. (Aguilar, 2010).

El comité Vision 2000 en la Tabla 3 define cuatro movimientos sísmicos de diseño; frecuente, ocasional, raro y muy raro, con base en el intervalo de recurrencia y la probabilidad de excedencia. Estos movimientos

sísmicos, como se mencionó anteriormente, se relacionan con el nivel de desempeño de la estructura en tres grupos tal como se muestra en la Tabla 4; estructuras críticas, esenciales y básicas. Las estructuras críticas corresponden a cualquier tipo de instalación que pueda resultar en un riesgo inaceptable para la comunidad, por ejemplo, depósito de materiales peligrosos; las estructuras esenciales las cuales después de un evento sísmico deben seguir en funcionamiento, por ejemplo, hospitales; y las estructuras básicas que no clasifique dentro de las anteriores.

Tabla 3. Movimientos sísmicos de diseño. Comité Visión 2000

Movimiento Sísmico de Diseño	Intervalo de Recurrencia	Probabilidad de Excedencia
Frecuente	43 años	50 % en 30 años
Ocasional	72 años	50 % en 50 años
Raro	475 años	10 % en 50 años
Muy Raro	950 años	10 % en 100 años

Tabla 4. Objetivos de desempeño propuestos por Vision 2000.

Movimiento Sísmico de Diseño	Nivel de desempeño de la Edificación			
	Totalmente Operacional	Operacional	Seguridad	Próximo al colapso
Frecuente (43 años)	1	0	0	0
Ocasional (72 años)	2	1	0	0
Raro (475 años)	3	2	1	0
Muy Raro (970 años)	---	3	2	1
0. Desempeño inaceptable				
1. Edificaciones básicas				
2. Edificaciones esenciales				
3. Edificaciones de seguridad crítica				

Gracias al desarrollo de la nueva filosofía de diseño basado en desempeño, se han propuesto numerosos métodos de diseño sísmico basados en desplazamientos que buscan crear estructuras que presenten una respuesta controlada, con el fin de asegurar el comportamiento adecuado de una edificación sujeta a diferentes intensidades sísmicas de diseño. Debido a que el objetivo principal de este trabajo es conocer los alcances y limitaciones de algunas de estas metodologías, las siguientes secciones se enfocan en este índice de desempeño para justificar su uso y desarrollo.

5.1 DISEÑO SISMICO BASADO EN DESPLAZAMIENTOS

Actualmente las tendencias del diseño sísmico basado en desempeño y los avances sobre el conocimiento del comportamiento estructural, hacen cuestionable el enfoque del diseño sísmico basado en fuerzas (Aguilera, 2011), ya que existen ciertas deficiencias e inconsistencias que a continuación se mencionan:

- a. El alcance de la “regla de iguales desplazamientos”, establece que la ductilidad de desplazamiento ($\mu\Delta$) está directamente relacionada con un factor de reducción (R), mediante el cual se reduce la fuerza lateral elástica, para definir la resistencia en la que la estructura incursiona en el rango inelástico. Por lo tanto, como se ilustra en la Figura 5-3, para un sistema que entra al rango inelástico el desplazamiento es más importante que la fuerza, debido a que la fuerza reducida tiene una mínima influencia en el desplazamiento último.

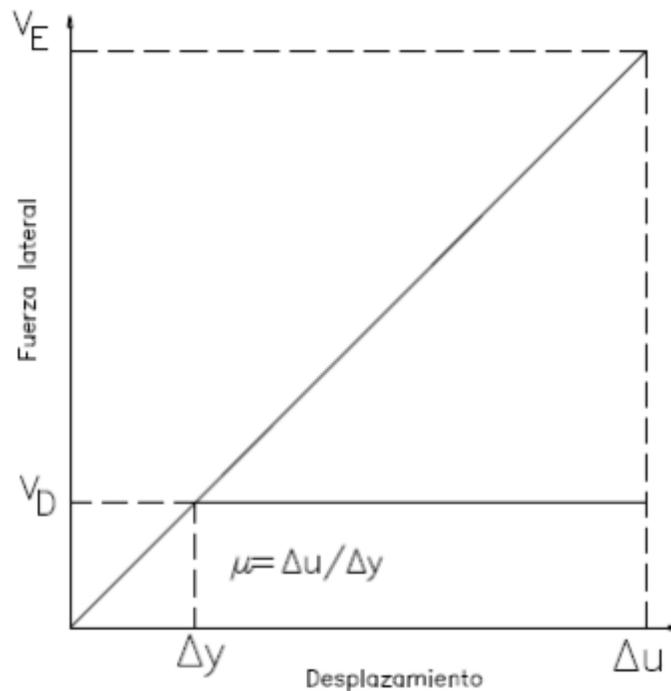


Figura 5-3. Regla de iguales desplazamientos - Curva fuerza-desplazamiento

- b. En el diseño sísmico basado en fuerzas, al analizar y diseñar estructuras diferentes, si estas llegan a tener el mismo factor de reducción también van a poseer la misma ductilidad. Es claro que este no es el caso, ya que la ductilidad depende de varios factores, tales como: resistencia de los materiales, geometría, carga axial, refuerzo longitudinal, refuerzo transversal, módulo de elasticidad entre otros.
- c. La suposición de que la rigidez estructural es independiente de la resistencia y que la curvatura de fluencia de los elementos estructurales es directamente proporcional a una resistencia es incorrecto (Figura 5-4 (a)), ya que evidencia experimental muestra que la rigidez es directamente proporcional a la resistencia y que la curvatura de fluencia es sensiblemente independiente de la resistencia (Figura 5-4 (b)).

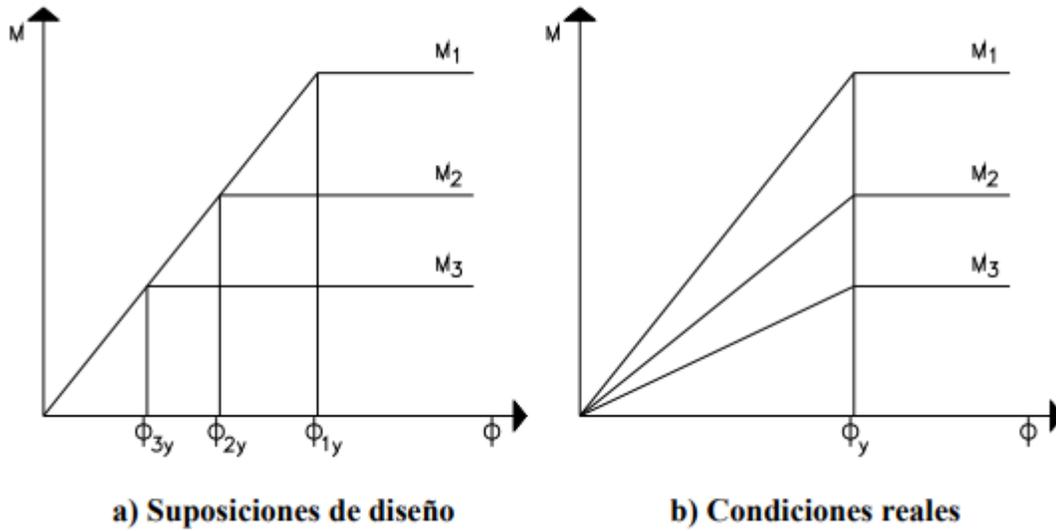


Figura 5-4. Influencia de la resistencia en la relación momento-curvatura

5.2 BASES FUNDAMENTALES DEL DISEÑO SISMICO BASADO EN DESPLAZAMIENTOS

Ya que los comportamientos de los elementos estructurales y no estructurales no se consideran adecuados si su deformación es excesiva bajo sismos asociados al estado límite de servicio y posiblemente contribuya a la inestabilidad de la estructura para el estado límite último. Generalmente, se acepta que el daño esté relacionado con la deformación unitaria y/o las distorsiones de entrepiso y debido a las deficiencias del diseño sísmico basado en fuerzas, se ha propuesto el diseño sísmico basado en desplazamientos, ya que con esto es posible determinar el desempeño de la estructura con mejor exactitud. Para ilustrar esto considérese el caso de un muro esbelto de comportamiento bilineal de escasa pendiente de postfluencia:

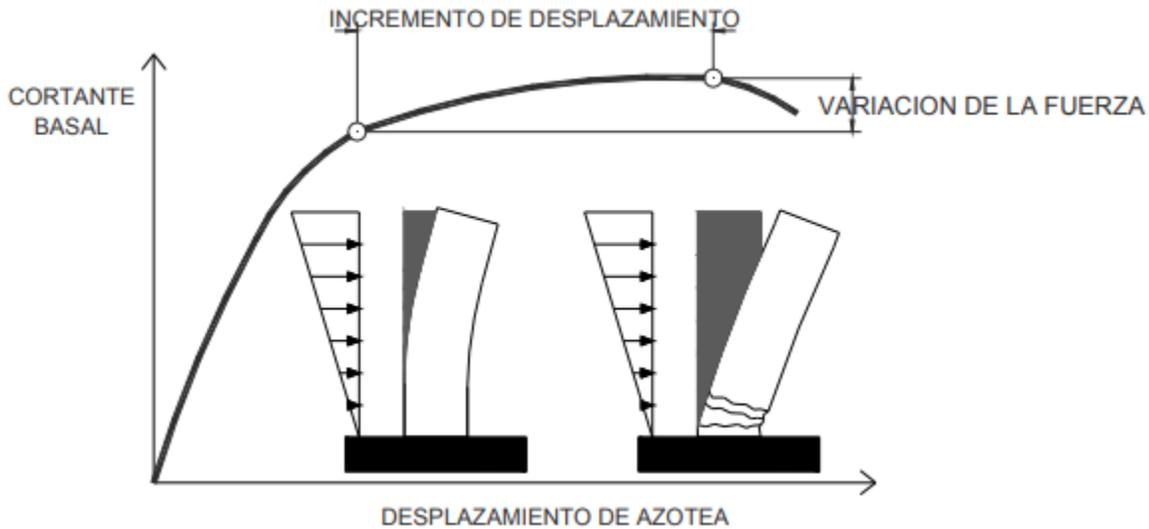


Figura 5-5. Comportamiento sísmico de un muro de concreto reforzado (Tomado de FIB, 2003)

En la Figura 5-5 se observa que, para un valor bajo de desplazamiento, el muro presenta agrietamiento del concreto y fluencia del acero. A partir de este valor empieza a formarse una articulación plástica en su base, que al llegar a la rotación crítica, después de incrementarse el desplazamiento, conduce a la falla. La magnitud del daño puede cuantificarse con la deformación de la articulación plástica la cual se relaciona directamente con los desplazamientos. En la curva de capacidad se observa que después de la fluencia, la variación de la fuerza no es significativa, por lo que no se puede cuantificar el daño a partir de ésta (López, 2009).

En el diseño sísmico basado en desplazamientos, el diseño se desarrolla estableciendo un desplazamiento objetivo; la resistencia y rigidez no se consideran como variables de diseño sino como resultados finales de este. Algunas de las ventajas principales son que: no es necesario el factor de reducción de fuerza lateral (R ó Q'), no se requieren ecuaciones empíricas para estimar el periodo fundamental de la estructura, la resistencia y rigidez satisfacen los criterios de deformación y se aborda directamente la naturaleza inelástica de una estructura durante un sismo (Aguilera, 2011).

Por lo tanto, es adecuado considerar los desplazamientos al inicio del diseño, enfocándose en las deformaciones y distorsiones para obtener una estructura que cumpla con los requerimientos de los diferentes estados límite, tomando en cuenta sus probabilidades de excedencia las cuales dependen de la sismicidad local y la importancia de la estructura, para cumplir con esto consideramos la matriz de objetivos de desempeño (SEAOC, 1995).

5.3 METODOS DE DISEÑO SISMICO BASADOS EN DESPLAZAMIENTOS

Existen actualmente diversos métodos de aplicación de la metodología de diseño por desempeño, cada uno con ciertas ventajas y limitaciones; se mencionarán algunos métodos y sus principales características:

- Freeman, 1998 – Método del espectro de capacidad

Este método parece ser la mejor opción para revisar el desempeño en estructuras existentes con secciones y resistencias de elementos conocidas. Esto es porque el método requiere un espectro de capacidad para la estructura, el cual es gráficamente sobrepuesto dentro del espectro de demanda para diferentes niveles de ductilidad/amortiguamiento.

- Panagiotakos y Fardis, 1999 - Diseño sísmico con deformación controlada

Este método está basado en la deformación, usando la rigidez inicial con un espectro de respuesta. El método permite revisar la ductilidad objetivo para un sismo frecuente y para el sismo raro se requiere que las rotaciones inelásticas permisibles no sean excedidas. Como herramienta basada en el diseño por desempeño, el método parecería restrictivo ya que solo se revisan dos estados límite, además de que no se puede controlar el daño no estructural.

- SEAOC, 1999 - Diseño sísmico basado en desplazamientos directos

Este método es rápido y de fácil aplicación para obtener el cortante basal de diseño, correspondiente a una distorsión objetivo que depende del nivel de desempeño. Tiene ciertas limitaciones, ya que no controla la demanda de ductilidad.

- Aschheim y Black, 2000 - Diseño sísmico para el punto de fluencia del espectro

Este método permite diseñar por desempeño relativamente rápido, el método consiste en desarrollar un punto de fluencia en un espectro, el cual es usado para definir las regiones de diseño permisibles considerando una distorsión objetivo y valores adecuados de ductilidad. Se sugiere que la fuerza de fluencia corresponde a una ductilidad de desplazamiento específica y puede ser determinada aproximadamente de un espectro elástico usando la relación suavizada $R-\mu-T$ definida por Miranda y Bertero (1994).

- Browning, 2001 - Método proporcionado para estructuras de concreto reforzado

Este método es relativamente rápido y simple de usar, aunque solo es aplicable a pórticos regulares de concreto reforzado. En este proceso de diseño no se controlan las rotaciones inelásticas demandadas ni los límites de ductilidad

- Chopra y Goel, 2001 - Diseño basado en desplazamientos usando el espectro inelástico

Este método utiliza el paso inicial del método de Priestley y Calvi (1997) para determinar el desplazamiento objetivo y la ductilidad de diseño, el método entonces entra al espectro de respuesta inelástico de desplazamientos para obtener el período y la rigidez inicial. Con el desplazamiento de fluencia y la rigidez inicial conocidos, la fuerza de fluencia puede ser determinada. De este modo este método diseña las estructuras para un nivel de distorsión objetivo y rotaciones plásticas aceptables. En el proceso de diseño no se controla la ductilidad de desplazamiento.

- Priestley et al., 2007 - Diseño sísmico directo basado en desplazamientos

Este método es aplicable a edificios, tanto con sistemas de carga a base de marcos como de muros de cortante. Consiste en caracterizar a la estructura por la rigidez secante para un desplazamiento máximo y un nivel de amortiguamiento viscoso equivalente apropiado para la energía histerética absorbida durante la respuesta inelástica. El enfoque usado para caracterizar la estructura se basa en el procedimiento de análisis de estructura substituta (Shibata y Sozen, 1976).

- Ayala et al., 2009 - Diseño sísmico por desplazamientos con control de daño

Este método idealiza la curva de capacidad de un sistema de múltiples grados de libertad con una curva bilineal misma que se transforma a una de un sistema simplificado de referencia correspondiente al modo fundamental de un espacio espectral de pseudoaceleraciones contra desplazamientos, mediante resultados obtenidos de un análisis modal de la estructura (López, 2009).

- Sullivan, 2010 - Diseño sísmico basado en desplazamientos con factor de energía

Este método está dirigido a controlar el pico de las deformaciones inelásticas, igualando la energía externa impuesta por el sismo a la estructura con el trabajo interno hecho por la estructura para alcanzar el estado de deformación. La base del procedimiento de diseño es determinar la resistencia de diseño, para estimar la proporción del trabajo externo que queda almacenado en el pico de respuesta del sistema lineal, a

través del uso de un factor de disipación de energía. Una de las limitaciones de este método es que sólo es aplicable a estructuras de baja a mediana altura.

- Kappos et al., 2010 - Diseño sísmico basado en deformaciones directas

Este método se basa en deformaciones directas, tomando en cuenta modelos estructurales de análisis parcialmente inelásticos que consideran análisis no lineal paso a paso, para registros escalados de acuerdo a dos estados límite basados en desempeño.

Otra metodología importante a mencionar es la de Restrepo J.I. (2006) la cual propone el uso de espectros de desplazamientos ajustados para tener en cuenta las incertidumbres en la demanda y en la sobre-resistencia de los materiales. La pendiente del espectro de desplazamientos, en la zona de velocidad constante, es función de la probabilidad de excedencia del sismo de diseño.

El diseño de la estructura parte de ductilidades de curvatura de los elementos escogidas de antemano; determina el desplazamiento de fluencia de la estructura y el desplazamiento último de diseño, para encontrar la ductilidad de desplazamiento del sistema; luego deduce sobre el espectro de desplazamientos el máximo periodo admisible para cumplir requisitos de un diseño sísmico basado en desempeño y ello permite a su vez obtener la fuerza cortante de diseño.

De manera general los métodos de diseño sísmico por desplazamientos logran diseños consistentes al compararlos con un análisis dinámico no lineal paso a paso (Sullivan, 2002). Cada uno de estos métodos considera simplificaciones para hacerlos adecuados en la práctica.

De acuerdo a las evaluaciones hechas con base en la descripción de cada uno de los métodos de diseño por desplazamientos, en esta monografía, con fines de investigación se eligen tres métodos, los cuales son:

- Diseño sísmico directo basado en desplazamientos (DSDBD)
- Diseño sísmico basado en deformaciones directas (DSBD)
- Diseño sísmico por desplazamientos con control de daño (DSDCD)

En la siguiente sección se mostrará a detalle el procedimiento de cada uno de estos tres métodos seleccionados.

5.4 METODOS SELECCIONADOS DE DISEÑO SÍSMICO POR DESPLAZAMIENTOS

5.4.1 DISEÑO SÍSMICO DIRECTO BASADO EN DESPLAZAMIENTOS (Priestley et al., 2007)

El método de diseño sísmico directo basado en desplazamientos describe el comportamiento de la estructura a través de una rigidez secante al desplazamiento máximo y un nivel de amortiguamiento viscoso equivalente asociado a la energía histerética absorbida durante la respuesta inelástica. El enfoque utilizado para el análisis de la estructura se basa en el procedimiento de la estructura sustituta (Shibata y Sozen, 1976).

Con el desplazamiento de diseño determinado de acuerdo con el nivel de desempeño requerido y el amortiguamiento a partir de la demanda de ductilidad esperada, se obtiene el periodo efectivo para el desplazamiento máximo, de un espectro de diseño.

A continuación, representando a la estructura como un sistema equivalente de un grado de libertad, se calcula la rigidez efectiva asociada a la respuesta máxima, de acuerdo con estos valores se calcula el cortante basal (Figura 5-6)

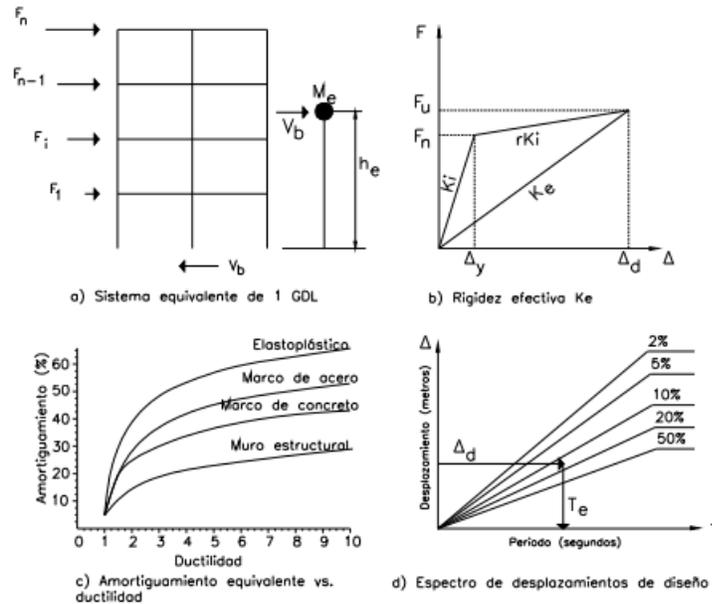


Figura 5-6. Fundamentos del diseño sísmico directo basado en desplazamientos (Priestley et al., 2007)

A continuación, se enumeran los pasos a seguir, para cumplir con el método de diseño sísmico directo basado en desplazamientos para pórticos de concreto reforzado:

Paso 1: Seleccionar los límites de comportamiento

Deben considerarse dos estados límite, estos son: completamente operacional (con un buen detallado el daño no estructural no deberá ser evidente para distorsiones menores que $\theta=1\%$) y de control de daño (se puede definir por los límites de la deformación unitaria del material y los límites de distorsión de diseño destinados a restringir el daño no estructural). Este último está entre los límites de comportamiento operacional y de seguridad de vida, y depende de la importancia y función de la estructura. En casi todas las estructuras de concreto reforzado (muros o pórticos), es posible que los límites de distorsión del reglamento controlen la distorsión de diseño (Aguilera, 2011). Se proponen dimensiones iniciales de los elementos estructurales y se calcula la distorsión de fluencia de entrepiso, mediante la siguiente ecuación:

$$\theta_y = 0.50\varepsilon_y \left(\frac{L_b}{h_b} \right)$$

Donde:

ε_y = deformación de fluencia del acero de refuerzo

L_b = Luz libre de viga de un entrepiso

hb = Altura de viga

Paso 2: Cálculo del desplazamiento de diseño del sistema equivalente

Se define el desplazamiento de diseño del sistema equivalente, de acuerdo con los límites impuestos para el nivel de desempeño requerido. Considerando igualdad de trabajos de la estructura sustituta y el sistema real, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\Delta_d = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i^2)}{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)}$$

Donde:

m_i = masa correspondiente al i ésimo nivel

Δ_i = desplazamiento correspondiente al i ésimo nivel

Para el cálculo de Δ_i es necesario conocer el desplazamiento del entrepiso crítico, definido de acuerdo con las capacidades de deformación del elemento crítico o por el límite permisible de distorsión del entrepiso (López, 2009), se calcula el desplazamiento Δ_i con la siguiente expresión:

$$\Delta_i = \omega_o \delta_i \left(\frac{\Delta_c}{\delta_c} \right)$$

$$\omega_o = 1.15 - 0.0034H_n \leq 1.0$$

Donde:

ω_o = factor de desplazamiento menor o igual a la unidad

H_n = altura total de la estructura

Δ_c = desplazamiento de entrepiso crítico (desplazamiento del primer nivel)

δ_c = distorsión crítica (distorsión del primer nivel)

δ_i = configuración deformada asociada al primer modo del comportamiento inelástico del sistema.

A continuación, se describen las ecuaciones para el cálculo de δ_i , apropiadas para fines de diseño:

$$\delta_i = \frac{H_i}{H_n} \quad n < 4$$

$$\delta_i = \frac{4}{3} \frac{H_i}{H_n} \left(1 - \frac{H_i}{4H_n} \right) \quad n \geq 4$$

Donde:

H_i = altura correspondiente al nivel i

n = número de niveles de la estructura

Paso 3: Cálculo del desplazamiento de fluencia y obtención de la ductilidad del sistema

El desplazamiento de fluencia a la altura de la fuerza sísmica lateral resultante depende de la distorsión de fluencia y la altura efectiva (aproximadamente $0.6H_n$ y $0.7H_n$ para estructuras de pórticos y muros respectivamente) y se calcula con la siguiente ecuación:

$$\Delta_y = \theta_y H_e$$

Donde:

θ_y = distorsión de fluencia de entrepiso constante a lo largo de la altura (definida en paso 1)

H_e = altura efectiva de la estructura sustituta

Los valores de la altura efectiva mencionados con anterioridad son adecuados para estructuras regulares, pero cuando la masa o la altura de los niveles varían significativamente con la altura total, debe determinarse un valor preciso. En estos casos, la altura efectiva (H_e) se debe calcular como sigue:

$$H_e = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i H_i)}{\sum_{i=1}^n (m_i H_i)}$$

Calculado el desplazamiento de fluencia del sistema equivalente, y con el desplazamiento de diseño previamente calculado, se puede obtener la ductilidad de desplazamiento con la siguiente expresión:

$$\mu = \frac{\Delta_d}{\Delta_y}$$

Paso 4: Cálculo del amortiguamiento viscoso equivalente

El amortiguamiento viscoso equivalente (ξ_{eq}) depende del sistema estructural y de la demanda de ductilidad del sistema. Existen gráficas con la relación μ - ξ_{eq} , dependiendo del sistema estructural, para un pórtico de concreto reforzado se calcula como:

$$\xi_{eq} = 0.05 + 0.565 \left(\frac{\mu - 1}{\mu \pi} \right)$$

Paso 5: Cálculo de la distribución de fuerzas en los entrepisos y cortante basal

El cortante basal se debe distribuir verticalmente en proporción a la masa y la configuración deformada consistente con el desplazamiento máximo del sistema estructural:

$$F_i = V_b \frac{(m_i \Delta_i)}{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)}$$

donde el cortante basal de diseño para la respuesta máxima es:

$$V_b = K_e \Delta_d$$

Y la rigidez efectiva asociada a la respuesta máxima, se calcula como sigue:

$$K_e = \frac{4\pi^2 m_e}{T_e^2}$$

La masa efectiva representa la masa modal del primer modo de comportamiento inelástico. La masa efectiva puede variar desde alrededor del 70% de la masa total para edificios de muros en voladizo hasta más del 85% para edificios de pórticos de concreto reforzado de más de 20 pisos (Priestley et al., 2007), se calcula con la siguiente ecuación:

$$m_e = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)}{\Delta_d}$$

Con los valores del desplazamiento de diseño (Δ_d), el amortiguamiento viscoso equivalente (ξ_{eq}) y el espectro de desplazamientos (de cualquier registro acelerográfico) se obtiene el periodo efectivo (T_e).

Paso 6: Análisis del sistema equivalente y diseño de los elementos estructurales

El análisis de la estructura se realiza con las fuerzas distribuidas, y debe basarse en la rigidez de los miembros representativa de las condiciones para la respuesta de desplazamiento máximo. Se recomienda utilizar una inercia de vigas reducida, para incluir el daño esperado en las mismas (mecanismo de viga débil-columna fuerte) y de esta manera estos miembros estén sujetos a acciones inelásticas

$$I_b = \frac{I_{cr}}{\mu}$$

Las columnas se modelan con la inercia gruesa sin algún tipo de reducción, ya que serán diseñadas por capacidad. Se acepta que ocurra daño en la base de las columnas, por lo tanto, la base de las columnas se modela como una articulación y aplicándole un momento tal que el punto de inflexión de las columnas del primer entrepiso se presente a una altura aproximada del 60% de la altura de este (López, 2009). Se debe cumplir con la siguiente condición:

$$\sum M_{bc} = 0.60V_b h_1$$

Después de aplicar estas propiedades al modelo estructural, se realiza el análisis y se obtienen las fuerzas y con base en estas se calcula el refuerzo longitudinal en vigas y para las columnas se calcula el refuerzo longitudinal y transversal con el enfoque de diseño por capacidad.

Por último, se hace el detallado adecuado para que las vigas y las columnas de la base desarrollen un comportamiento dúctil. Las fórmulas que se han mencionado son para estructuras de concreto reforzado (pórticos de concreto reforzado), en caso de que el sistema estructural que se desea diseñar sea diferente (sistemas estructurales a base de muros, sistemas estructurales duales, sistemas estructurales con base flexible, etc.) o con otro material, las fórmulas deben adecuarse.

En la Figura 5-7, se presenta el diagrama de flujo del procedimiento de diseño sísmico directo basado en desplazamientos (Priestley et al., 2007)

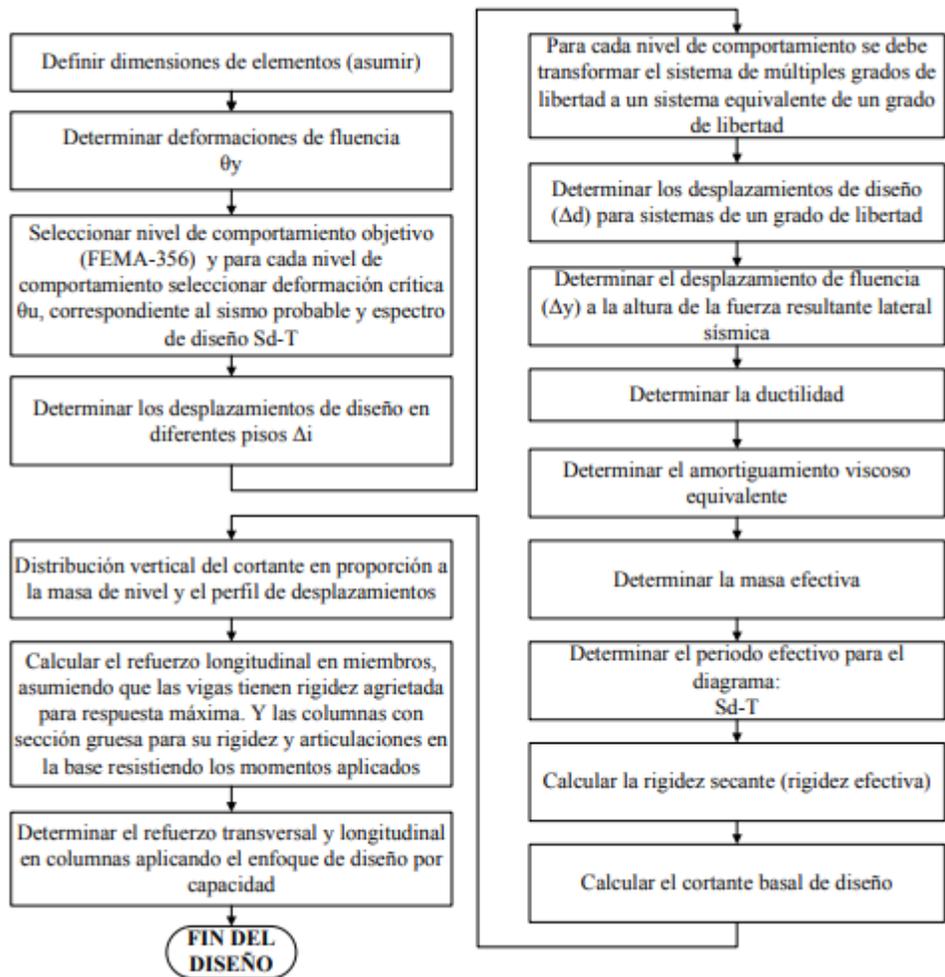


Figura 5-7. Diagrama de flujo de procedimiento de diseño sísmico directo basado en desplazamientos directos (Priestley et al., 2007)

5.4.2 DISEÑO SÍSMICO BASADO EN DEFORMACIONES DIRECTAS (Kappos y Stefanidow, 2010)

Se presenta un método de diseño sísmico basado en deformaciones directas, tomando en cuenta modelos estructurales de análisis parcialmente inelástico que consideran análisis dinámicos no lineales paso a paso para registros escalados adecuadamente de acuerdo a dos estados límite basados en criterios de desempeño. El análisis dinámico no lineal paso a paso, tiene la característica principal de ser la herramienta más sofisticada actualmente disponible, ya que permite obtener la respuesta en el tiempo, sin embargo, la complejidad del método hace que sea aplicable en ciertos casos específicos como para fines académicos, calibración de análisis estáticos, etc.

Paso 1: Diseño a flexión de las zonas con articulaciones plásticas basado en criterios de servicio:

Establecer un nivel básico de resistencia, asegurando que la estructura permanecerá en “servicio” después de un sismo con altas probabilidades de excedencia (50%/50 años). Por lo tanto, se requiere un análisis inicial, el cual proporcionará la resistencia de los elementos (zonas de disipación de energía) que responderán inelásticamente durante las verificaciones de servicio.

Se seleccionan como zonas de disipación de energía a los extremos de todas las vigas y la base de las columnas de planta baja (pudiéndose generar también en otra localización, dependiendo de las características estructurales de la edificación), utilizando el mecanismo de “columna fuerte-viga débil”, en este mecanismo para que la estructura en su conjunto llegue al colapso se requiere que se formen articulaciones plásticas en todos los pisos y además en la base de las columnas, en el mecanismo de “columna débil viga fuerte” para que se presente el colapso basta con que este mecanismo se forme en un solo entrepiso. Esto se aprecia en la Figura 5-8:

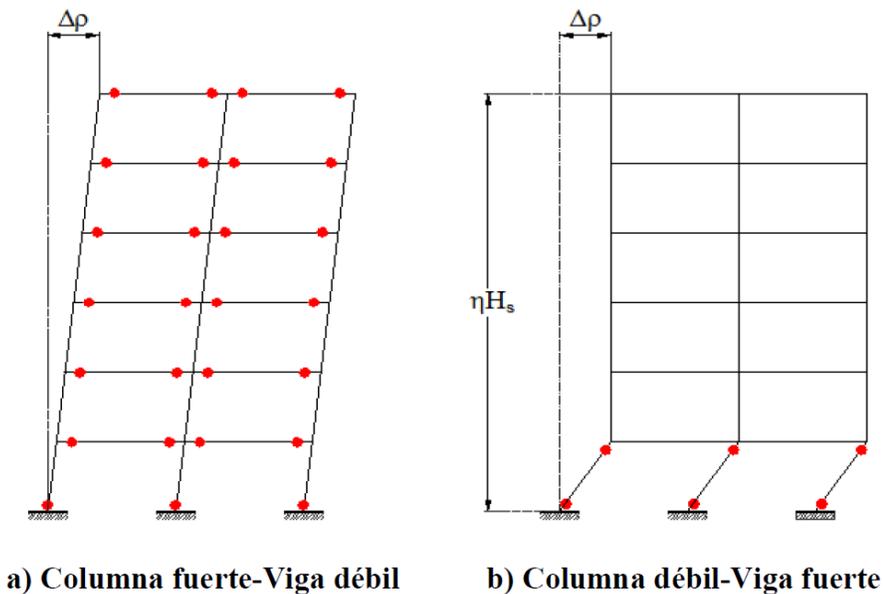


Figura 5-8. Mecanismos de respuesta inelástica para pórticos.

Se lleva a cabo un análisis elástico, del modelo derivado de un dimensionamiento preliminar. Usando como demanda un registro escalado de acuerdo al nivel de desempeño de ocupación inmediata (servicio). Se utiliza un valor $v=2/3$ para modificar el sismo y con esto tomar en cuenta el posible sobrediseño debido a cuantías mínimas estipuladas en los reglamentos (Kappos y Stefanidou, 2010).

Las rigideces consideradas son: 50%Elg y Elg para vigas y columnas respectivamente (Kappos y Stefanidou, 2010). Se deben utilizar valores medios en las resistencias de los materiales (f_{cm} para concreto y f_{ym} para acero).

Para obtener un factor de reducción α , que permita controlar las deformaciones actuantes en las vigas, se relacionan las rotaciones elásticas con las correspondientes inelásticas (Figura 5-9).

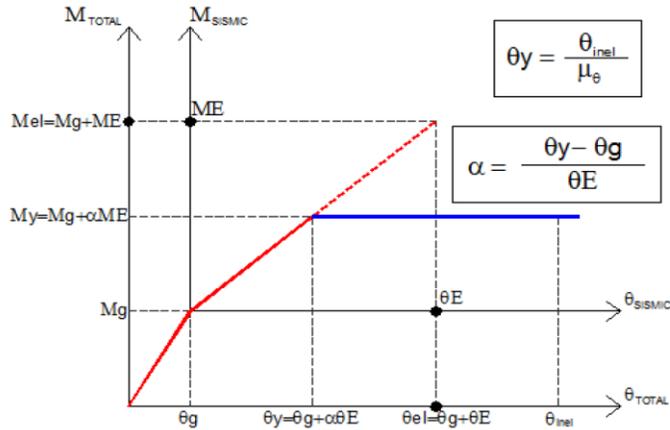


Figura 5-9. Definición de la pendiente del diagrama $M-\theta_{inel}$ y de α para vigas.

Proponiendo el factor de ductilidad de rotación objetivo (μ_θ) y la máxima rotación inelástica (θ_{inel}), de la θ_{el} encontrada en el análisis elástico, se calcula la rotación de fluencia (θ_y) para cada elemento estructural. Por simplicidad se puede asumir que la respuesta $M-\theta$ elástica y elastoplástica es la misma. Los momentos y rotaciones debidos a carga permanente (gravedad + viva reducida) son los que se aplican primero y permanecen constantes (θ_g, M_g), y cualquier reducción de la fuerza elástica (M_{el}) debería referirse a la carga sísmica que es aplicada después de la carga permanente. Entonces el momento de fluencia (M_y) se calcula como:

$$M_y = M_g + \alpha M_E$$

Donde el factor de reducción α , el mismo para momentos y rotaciones es:

$$\alpha = \frac{\theta_y - \theta_g}{\theta_E}$$

Por último, se calculan las fuerzas de diseño reducidas para cada viga, las cuales están directamente relacionadas con la ductilidad rotacional objetivo para el nivel de desempeño de servicio. La demanda de refuerzo longitudinal para vigas se calcula usando procedimientos de diseño a flexión y considerando los requerimientos mínimos de acuerdo a las normas. En caso de que la demanda de acero longitudinal resulte menor a los requerimientos mínimos, se debe hacer una reducción de la sección transversal, para que las deformaciones no resulten significativamente por debajo de las permisibles de acuerdo al nivel de desempeño. Con este proceder se intenta lograr un equilibrio entre desempeño y economía.

Paso 2: Selección de las acciones sísmicas:

El análisis dinámico no lineal paso a paso necesario para el diseño sísmico de acuerdo al método propuesto requiere la definición de registros apropiadamente escalados. El conjunto de acelerogramas usados para el análisis debe incluir un par de componentes para cada movimiento sísmico y es recomendable que se seleccionen basados en análisis de riesgo sísmico. El registro sísmico usado para diseño, debe ser escalado de acuerdo al nivel correspondiente asociado al estado límite examinado. Los autores del método señalan que los acelerogramas deben ser actuales y reales, además recomiendan que se usen cuando menos 3 registros (Kappos y Manafpour, 2001).

Paso 3: Establecer el modelo parcialmente inelástico:

En este paso se pide establecer el modelo parcialmente inelástico (PIM, por sus siglas en inglés) de la estructura, donde las vigas y la base de las columnas de planta baja son modelados como elementos que fluyen, con su resistencia basada en el refuerzo calculado para las fuerzas reducidas de acuerdo a las deformaciones inelásticas permitidas para el estado límite de servicio. En este modelo, las columnas restantes permanecen en el rango elástico.

Paso 4: Verificaciones de servicio:

Hacer un análisis dinámico no lineal paso a paso para el modelo descrito en el paso anterior, con el registro escalado para la intensidad asociada al estado límite de “servicio” (50%/50 años). Se verifica que los valores máximos de distorsiones de entrepiso y rotaciones de articulaciones plásticas estén dentro de los valores permisibles de acuerdo con el reglamento. Los valores recomendados de distorsiones de entrepiso varían entre 0.2 a 0.6%, mientras que las rotaciones plásticas permisibles varían entre 0.001 a 0.005 rad para columnas y 0.005 para vigas (Kappos y Manafpour, 2001). En este paso se revisa el desempeño inelástico del sistema estructural y se verifica que el factor de ductilidad rotacional (μ_θ) obtenido para vigas y las bases de las columnas de planta baja sea consistente con el valor propuesto durante el diseño.

Paso 5: Diseño del refuerzo longitudinal en columnas (y/o muros) para el estado límite de “seguridad de vida”:

El diseño de elementos considerados como elásticos (columnas y/o muros) en el modelo parcialmente inelástico (PIM), se basa en resultados inelásticos del análisis dinámico no lineal paso a paso, con el registro sísmico escalado para la intensidad asociada al estado límite de “seguridad de vidas” (probabilidad de excedencia 10%/50 años). Este análisis proporciona la combinación de momento crítico (M) y su correspondiente carga axial (N) de cada columna y/o muro. Para columnas sujetas a carga biaxial se deben considerar tres combinaciones: máxima (My) con su correspondiente Mz y N; máxima (Mz) y su correspondiente My y N; mínima (N) compresión o máxima (N) tensión y su correspondiente My y Mz.

Para este análisis se pide que se consideren los valores de diseño en las resistencias de los materiales (f_{cd} y f_{yd} para concreto y acero respectivamente) en los elementos que se van a diseñar.

Se considera que existen ciertas variaciones en la resistencia del material (debido a la conexión viga columna), por lo tanto, se puede llegar a considerar una sobreestimación del acero longitudinal durante el diseño. Se propone entonces un factor de 1.26 (f_{ym}/f_{yd}) para aumentar el momento y la fuerza axial, para así cumplir con el objetivo de desempeño y hacer que las columnas no fluyan (Kappos et al. 2010), sin embargo, este factor no es necesario para las columnas que si fluyen (base de columnas de planta baja) ya que para estas se consideró el valor medio de la resistencia de los materiales (f_{cm} y f_{ym}).

Paso 6: Diseño por cortante:

Las fuerzas de cortante deben corresponder a las acciones sísmicas de un sismo con probabilidades de excedencia de 2%/50 años (asociado con el nivel de desempeño “prevención al colapso”). Sin embargo, para simplificar el procedimiento de diseño, el detallado y diseño por cortante debe llevarse a cabo usando las fuerzas por cortante calculadas en el análisis dinámico no lineal paso a paso para la acción sísmica asociada al nivel de desempeño de “seguridad de vida”, y para relacionarlo con el sismo de 2%/50 años se

considera el factor γ_v (mayor a la unidad), se recomienda para vigas ($\gamma_v=1.20$) y para columnas ($\gamma_v=1.15$) (Kappos et al. 2010).

Paso 7: Detallado para longitud de desarrollo, anclaje y confinamiento:

El detallado de todos los elementos debe hacerse para cumplir con longitudes de desarrollo, anclaje y confinamiento de acuerdo al nivel de inelasticidad considerado y al nivel de ductilidad.

Los pasos mencionados anteriormente son los que se deben seguir para cumplir con el método basado en deformaciones directas.

A continuación, se presenta el diagrama de flujo (Figura 5-10) del método basado en deformaciones directas:

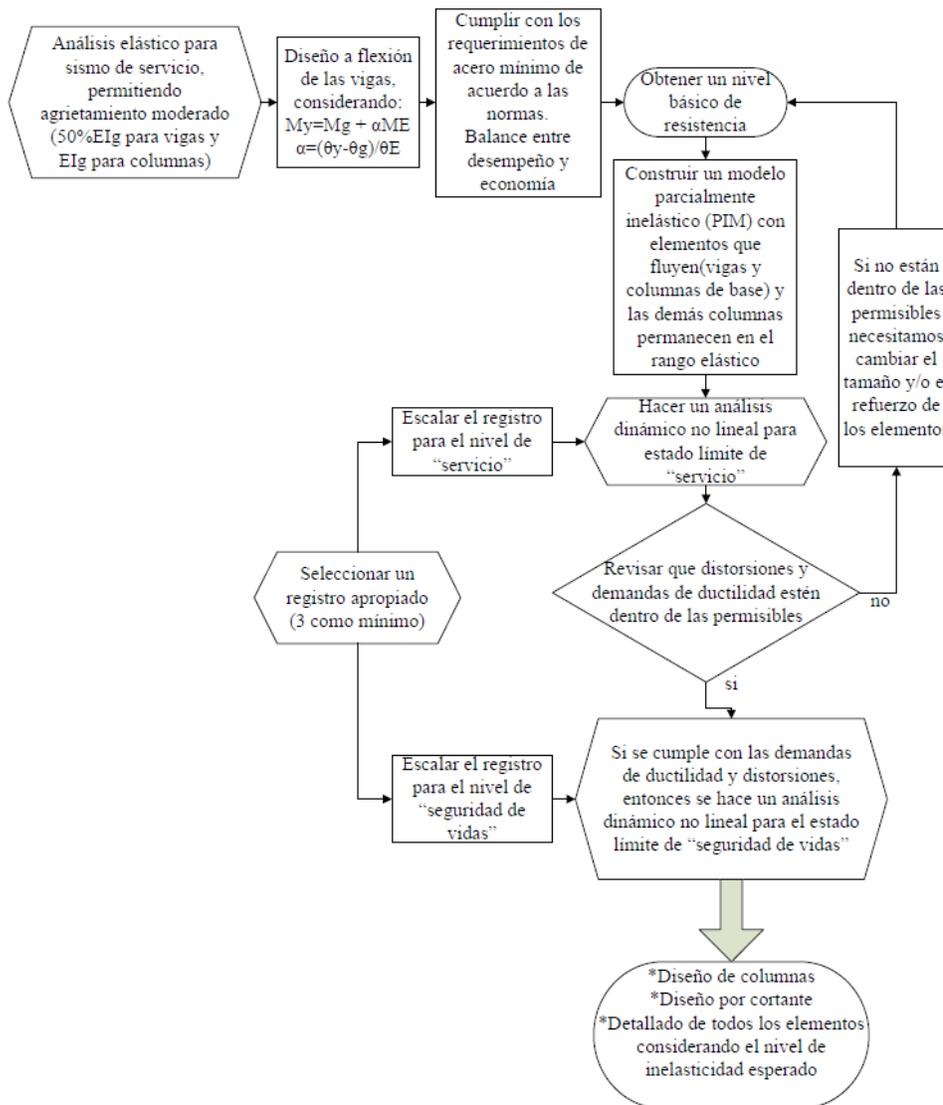


Figura 5-10. Diagrama de flujo del método de diseño sísmico basado en deformaciones directas (Kappos y Stefanidou, 2010).

5.4.3 DISEÑO SÍSMICO POR DESPLAZAMIENTOS CON CONTROL DE DAÑO (Ayala et al., 2009)

De acuerdo a López (2009), este método se basa en que la curva de capacidad de un sistema estructural de múltiples grados de libertad puede idealizarse como una curva bilineal definida al considerar la equivalencia de energía disipada con respecto a la curva real. Una vez definida, esta curva se debe transformar al espacio espectral de pseudoaceleraciones vs desplazamientos (S_a vs S_d), correspondiente al modo fundamental, denominada curva de comportamiento del sistema simplificado de referencia, la cual se puede ver en la Figura 5-11:

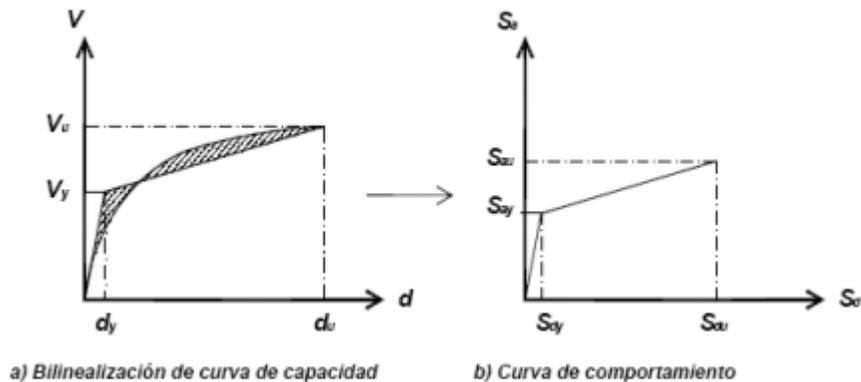


Figura 5-11. Transformación de curva de capacidad a curva de comportamiento (López, 2009)

Se usa el concepto de sistema simplificado de referencia, el cual consiste en caracterizar a una estructura de múltiples grados de libertad mediante un sistema de un grado de libertad correspondiente al modo fundamental (Ayala, 2001).

La primera rama representa la etapa elástica de la estructura y la segunda representa las propiedades de la etapa inelástica, de acuerdo con la distribución de daño asociado al desplazamiento máximo (nivel de desempeño). La pseudoaceleración de fluencia (S_{ay}) está ligada al nivel de demanda de los elementos que presentan daño y la pseudoaceleración última (S_{au}) a los elementos que se comportan elásticamente.

A continuación, se describe el procedimiento a seguir para el caso de pórticos de concreto reforzado de acuerdo con López (2009):

Paso 1: Diseño preliminar de la estructura:

Se realiza un diseño preliminar de la estructura a partir de un análisis para cargas gravitacionales y fuerzas laterales obtenidas de un diseño convencional basado en fuerzas o de una iteración previa en la aplicación de este método.

Paso 2: Análisis modal

Se lleva a cabo un análisis modal del modelo estructural generado a partir de las propiedades de las secciones obtenidas en el paso anterior (estructura elástica), de donde se obtiene el período fundamental de la estructura T_1 , con lo que se define la pendiente de la rama inicial de la curva de comportamiento bilineal idealizada del modo T_1 (Figura 5-12)

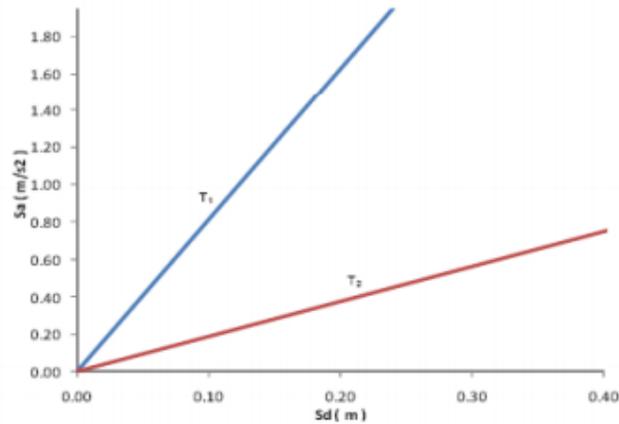


Figura 5-12. Rama elástica e inelástica de la curva de comportamiento (López, 2009)

Paso 3: Propuesta de distribución de daño

Para un nivel de desempeño definido, se propone una distribución de daño racional de acuerdo con las características de la estructura y las acciones de diseño consideradas (Figura 5-13). Con base en esto, el daño se representa en el modelo estructural mediante articulaciones en los extremos de los elementos donde se acepta se presente comportamiento inelástico. De manera similar al paso anterior, se realiza un análisis modal de esta estructura (dañada) y se obtiene el período correspondiente T_2 , que define la pendiente de la segunda rama de la curva de comportamiento bilineal idealizada del modo fundamental (Figura 5-12).

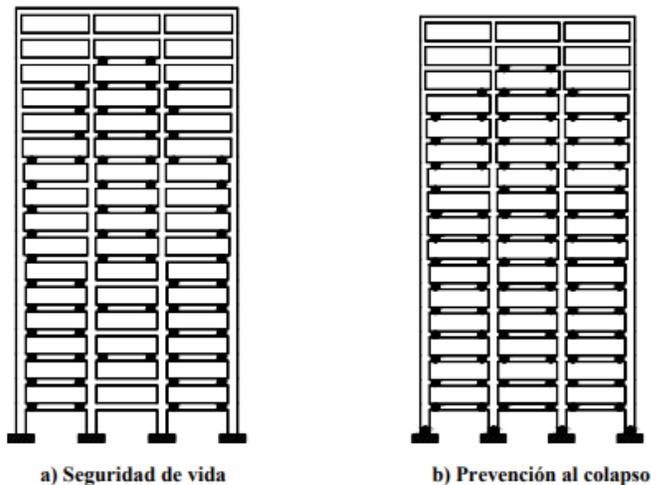


Figura 5-13. Distribución de daño para los dos estados límites en análisis

Paso 4: Relación de rigideces

Se realiza el cálculo de la relación de rigidez de postfluencia a elástica, α , mediante la siguiente expresión (Sandoval, 2000):

$$\alpha = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^2$$

Paso 5: Obtención del desplazamiento modal de fluencia

Se estima el desplazamiento modal de fluencia de azotea (d_{azy}), considerando las propiedades del modelo con daño en sus elementos estructurales, a partir del equilibrio de un nudo central del entrepiso en cuestión, suponiendo que las rotaciones en todos los nudos de dicho entrepiso y de los adyacentes son aproximadamente iguales (Figura 5-14)

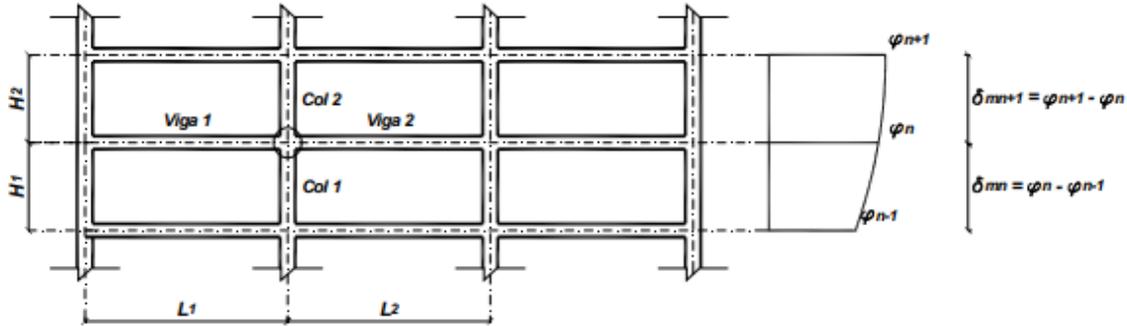


Figura 5-14. Esquema para cálculo de d_{azy}

Con la siguiente expresión se obtiene d_{azy} :

$$d_{azy} = \frac{\delta_n H_1}{\delta_{mn}}$$

$$\delta_n = \frac{0.30 \varepsilon_y L_1 \left(\frac{I_{v1}}{L_1} + \frac{I_{v2}}{L_2} + \frac{I_{c1}}{H_1} + \frac{I_{c2}}{H_2} \right)}{h_{v1} \left(\frac{I_{c1}}{H_1^2} + \gamma_o \frac{I_{c2}}{H_2^2} \right) H_1}$$

$$\gamma_o = \frac{\delta_{mn+1}}{\delta_{mn}}$$

Donde:

δ_n = Distorsión de fluencia del modo fundamental del entrepiso donde ocurre la distorsión máxima

δ_{mn} = Diferencia de formas modales, normalizadas con respecto al desplazamiento modal de azotea, del entrepiso donde ocurre la distorsión máxima

δ_{mn+1} = Diferencia de formas modales, normalizadas con respecto al desplazamiento modal de azotea, del entrepiso inmediato superior a aquel donde ocurre la distorsión máxima

γ_o = Razón entre las diferencias de las formas modales δ_{mn} y δ_{mn+1}

ϵ_y = Deformación unitaria de fluencia del acero de refuerzo

L1 = Luz central del entrepiso donde ocurre la distorsión máxima

L2 = Luz central adyacente del entrepiso donde ocurre la distorsión máxima

H1 = Altura del entrepiso donde ocurre la distorsión máxima

H2 = Altura del entrepiso inmediato inferior a aquel donde ocurre la distorsión máxima

Iv1, Iv2 = Momentos de inercia de las vigas de los claros 1 y 2 respectivamente

Ic1, Ic2 = Momentos de inercia de las columnas de los niveles 1 y 2 respectivamente

Hv1 = Peralte correspondiente a la viga de la luz 1

Paso 6: Definir el valor de d_{az}

Con base en la distorsión objetivo, δ_o , correspondiente al nivel de desempeño requerido, se define el desplazamiento objetivo de azotea, d_{azo} , mediante la siguiente ecuación:

$$d_{az} = \frac{\delta_o H_1}{\delta_{mn}}$$

Paso 7: Determinar el desplazamiento modal objetivo de azotea d_{azo}

Considerando que la configuración deformada de un pórtico plano sujeto a una carga sísmica es muy similar a la forma modal fundamental, el desplazamiento modal objetivo de azotea se estima mediante la siguiente expresión:

$$d_{azo} = d_{az} \left(\frac{d_{az-\text{mod fundamental}}}{d_{az-\text{todos los modos}}} \right)$$

Paso 8: determinar la ductilidad modal

Definidos los desplazamientos modales de fluencia y objetivo del sistema, se calcula la ductilidad modal μ :

$$\mu = \frac{d_{azo}}{d_{azy}}$$

Paso 9: Obtención del desplazamiento último del sistema

De un espectro de desplazamientos correspondiente a los valores de μ y α calculados, se obtiene el desplazamiento último correspondiente al período fundamental T1 de la estructura del prediseño d_{ESPECTRO} como se observa en la Figura 5-15

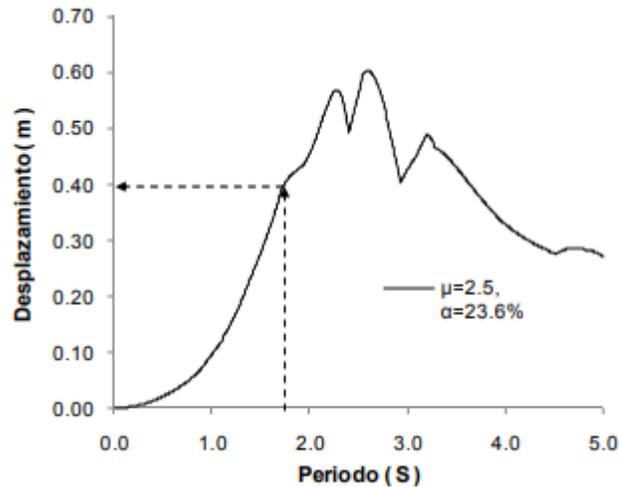


Figura 5-15. Desplazamiento último del sistema

Paso 10: Obtención del periodo requerido para alcanzar el desplazamiento objetivo

Se compara el desplazamiento último obtenido del paso anterior $d_{ESPECTRO}$ con el desplazamiento objetivo del pórtico d_{AZO} . Si el valor del desplazamiento último obtenido con la estimación de ductilidad es cercano al del desplazamiento objetivo el resultado se considera satisfactorio. En caso contrario, se modifica el período inicial de la estructura T_1 y/o la configuración de daño propuesta, y por tanto α , para alcanzar el desplazamiento objetivo (Figura 5-16). Si solo se modifica la rigidez, no se requiere un nuevo análisis modal, se pueden utilizar directamente las formas modales de la estructura y el valor de α calculados para la estructura del prediseño. La estructura modificada se denomina estructura de diseño, a partir del cual se realiza el análisis de obtención de demandas, y a su período correspondiente se denomina período de diseño o periodo requerido, $T_{REQUERIDO}$

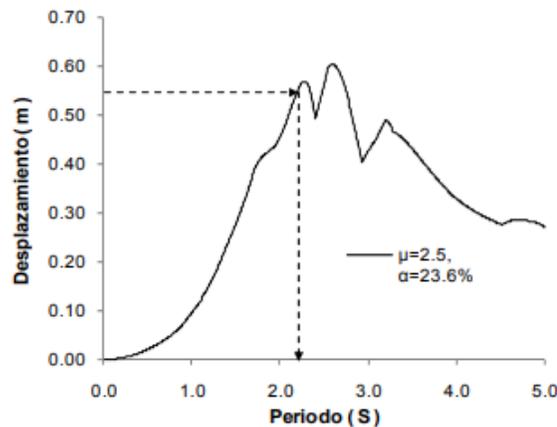


Figura 5-16. Obtención del periodo requerido para el desplazamiento objetivo.

Paso 11: Cálculo del periodo requerido

Satisfecho el desplazamiento objetivo d_{azo} de la estructura, de un espectro de diseño de resistencias correspondiente a la ductilidad modal y relación de rigidez posfluencia a inicial requerida, se obtiene la resistencia de fluencia R_y correspondiente a $T_{REQUERIDO}$. A partir de este paso $T_{REQUERIDO} = T_1$

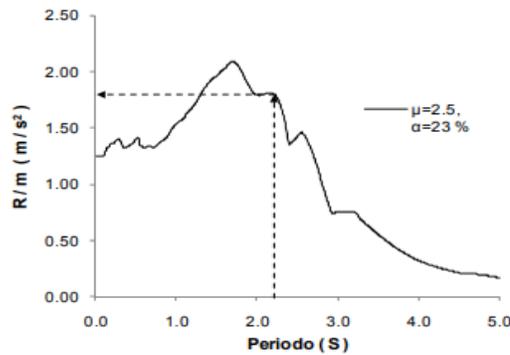


Figura 5-17. Obtención de la resistencia correspondiente a $T_1 = T_{requerido}$

Paso 12: Cálculo de la resistencia última

Cálculo de la resistencia última R_u del sistema de referencia, mediante la siguiente ecuación:

$$R_u = R_y [1 + \alpha(\mu - 1)]$$

Paso 13: Generación de curva de comportamiento del sistema de referencia

Definidos los puntos característicos de la curva de comportamiento se procede al trazo de ésta, como se muestra en la Figura 5-18

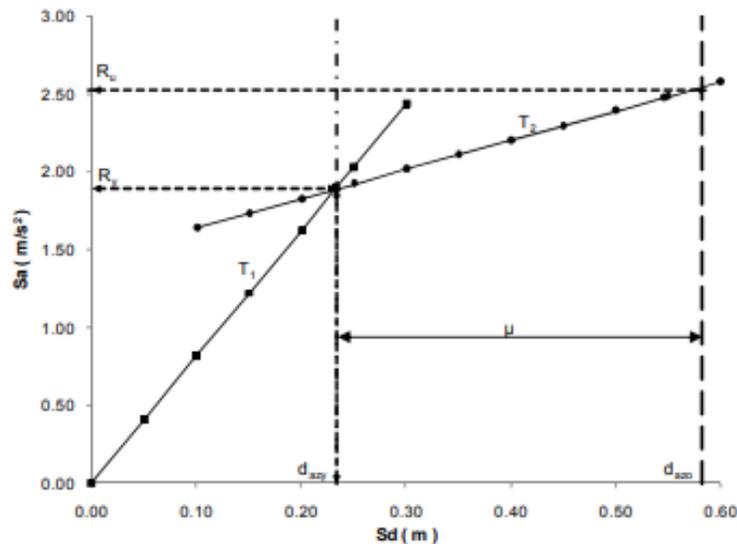


Figura 5-18. Curva de comportamiento del sistema de referencia

Paso 14: Realizar un análisis elástico para cargas gravitacionales

Con el objeto de considerar los efectos de las cargas vivas y muertas en la estructura, se realiza un análisis elástico por cargas gravitacionales de la estructura en su estado inicial.

Paso 15: Análisis modal espectral del modelo de la estructura elástica mediante espectro modificado

Análisis modal espectral del modelo de la estructura elástica. El espectro elástico de diseño se escala con el factor λ_1 , definido como la razón entre la resistencia por unidad de masa correspondiente al punto de fluencia de la curva de comportamiento y la pseudoaceleración del espectro elástico del período inicial T_1 , como se muestra en la Figura 5-19

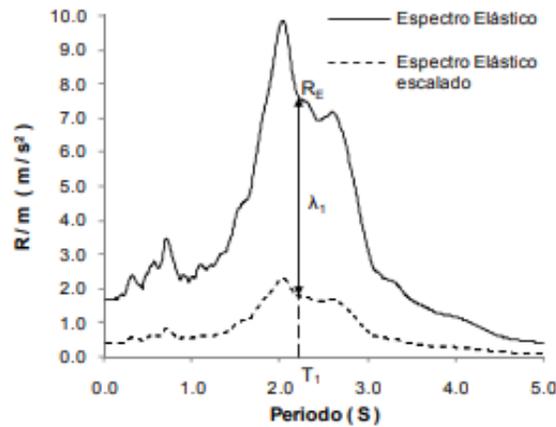


Figura 5-19. Escalamiento del espectro elástico de diseño para T_1

Paso 16: Análisis modal espectral del modelo de la estructura fallada con espectro elástico escalado

Se realiza un análisis modal espectral del modelo de la estructura con daño en sus elementos estructurales con el espectro elástico escalado con el factor λ_2 , definido como la razón entre la diferencia de resistencias por unidad de masa última y de fluencia de la curva de comportamiento y la pseudoaceleración del espectro para el período de la estructura dañada T_2 , como se muestra en la Figura 5-20

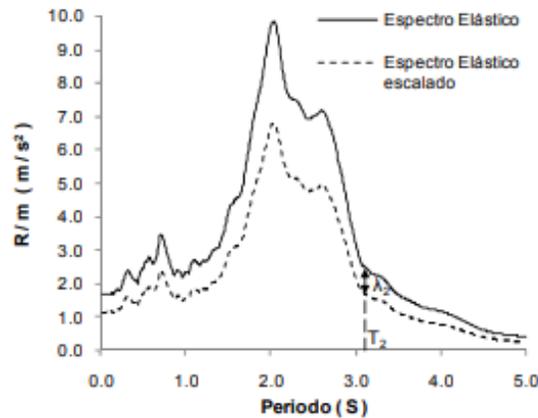


Figura 5-20. Escalamiento del espectro elástico de diseño para T_2

Paso 17: Superposición de cargas gravitacionales y de los análisis modales

Se realiza la obtención de las fuerzas en los elementos de diseño superponiendo los efectos de las cargas gravitacionales y los análisis modales de la estructura elástica y la dañada, considerando el sentido del sismo más desfavorable.

Paso 18: Diseño de elementos estructurales

Se realiza el diseño de los elementos estructurales de acuerdo al reglamento de diseño aplicable, considerando un criterio de resistencias mínimas de columnas, con el fin de asegurar un comportamiento “columna fuerte-viga débil”.

A continuación, se presenta el diagrama de flujo del método de diseño sísmico basado en desplazamientos con control de daño (López, 2009).

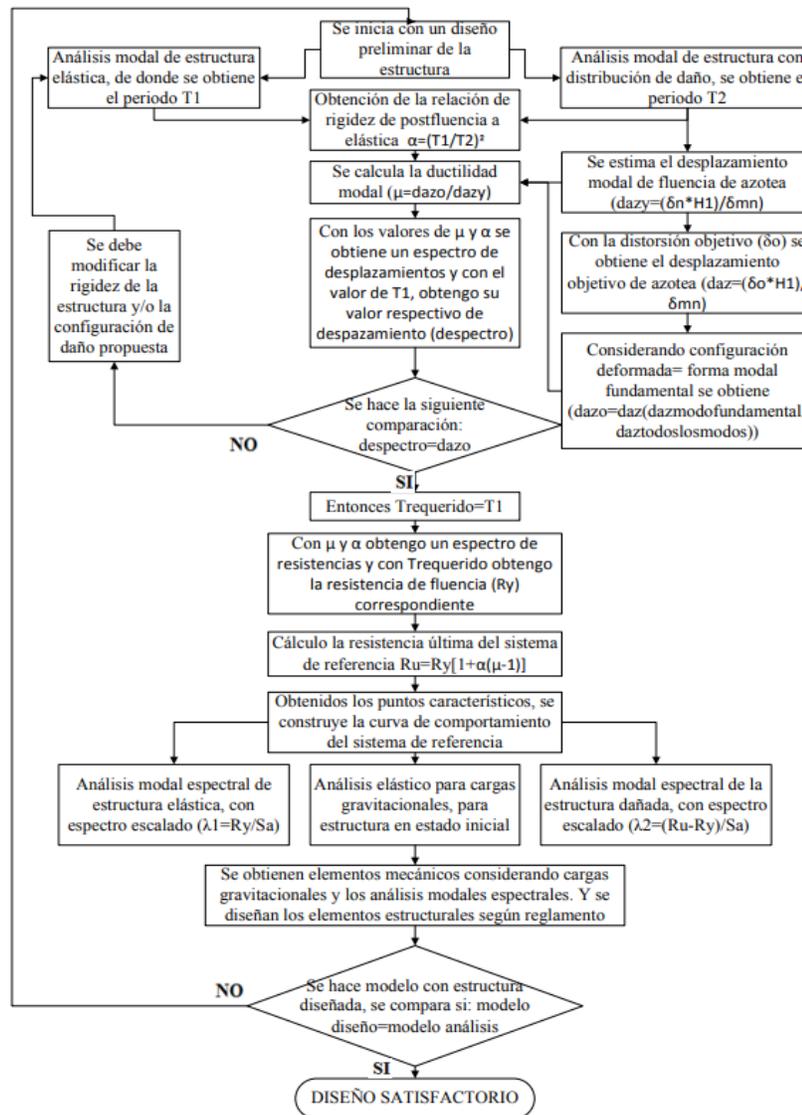


Figura 5-21. Diagrama del diseño por desplazamientos con control de daño (Ayala et al., 2009)

6 COMPARACION Y ANALISIS

Con la descripción y comparación en la sección anterior de cada uno de los métodos de diseño basados en desplazamientos, se obtiene una idea clara de sus alcances y limitaciones,

A continuación, se presentan dos tablas en las cuales se aprecian los alcances y limitaciones de cada uno de los métodos de diseño sísmico basado en desplazamientos (Tablas 5 y 6) con respecto a los siguientes criterios:

- ¿Cómo se obtiene el desplazamiento objetivo?:
 - Basado en deformación calculada (DCB)
 - Basado en cálculo iterativo de deformación (IDSB)
 - Basado en deformación directa (DDSB)
- Tipo de análisis utilizado en el proceso de diseño:
 - Modal espectral considerando rigidez inicial (ME-RI)
 - Modal espectral considerando rigidez secante (ME-RS)
 - Análisis de historia en el tiempo (T-HIST)
- Limitaciones en el tipo de estructura:
 - Estructuras con base flexible (Considerando la interacción suelo estructura)
 - Estructuras con irregularidad en planta
 - Estructuras con irregularidad vertical
- Niveles de desempeño que pueden ser aplicados:
 - Completamente operacional (CO)
 - Ocupación inmediata (OI)
 - Seguridad a la vida (SV)
 - Prevención al colapso (PC)

Tabla 5. Comparación entre los métodos de diseño por desplazamientos

Método	Función del desplazamiento	Tipo de análisis empleado	Tipos de estructura			Nivel de desempeño que se puede aplicar
			Estructuras con base flexible	Irregularidad en planta	Irregularidad en altura	
DSDBD	DDSB	ME-RS	APLICA	APLICA	APLICA	OI, PC
DSBD	DDSB	T-HIST	APLICA	APLICA	APLICA	OI, PC
DSDCD	DDSB	ME-RS	APLICA	APLICA	APLICA	SV

Después de considerar estos criterios en cada uno de los métodos de diseño sísmico por desplazamientos, para evaluar la efectividad de cada uno de ellos se consideraron las siguientes características:

- **Simplicidad:** con esta propiedad se consideran todos los métodos que son relativamente rápidos y fáciles de aplicar.
- **Versatilidad:** aquí se evalúa la capacidad que tienen todos los métodos para diseñar varios tipos de estructuras con los adecuados niveles de desempeño.
- **Desempeño:** con esta característica se considera la eficiencia de cada método, al diseñar una estructura con los parámetros de diseño adecuados.
- **Claridad:** aquí se evalúa que los métodos estudiados proporcionen la suficiente información al lector en cuanto al procedimiento y parámetros del cálculo, permitiendo así, llevar a cabo el correcto uso del método sin suposiciones del mismo.

Esta evaluación es subjetiva, ya que sólo se basa en la descripción de cada uno de los métodos dado en las anteriores secciones, pero da una opinión rápida de la pertinencia de cada método. La escala que se consideró fue bajo, medio y alto, tal como se resume en la Figura 5-22:

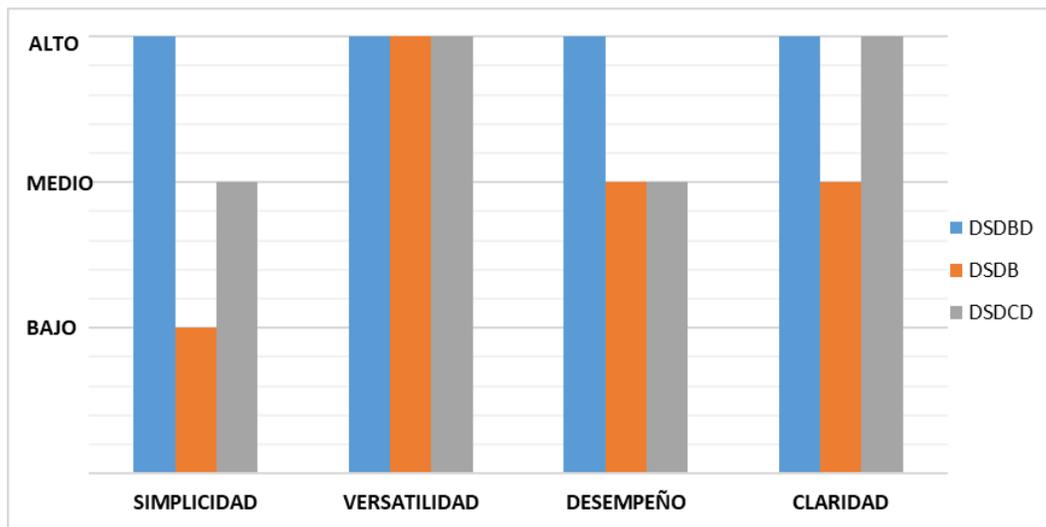


Figura 5-22. Comparación subjetiva entre los métodos analizados

7 CONCLUSIONES

- En el diseño por fuerzas las fuerzas laterales son valores iniciales, y los desplazamientos son resultados, los cuales se comparan con valores límites de la normativa (lo cual es una forma indirecta de un diseño por desplazamientos), esto lleva a realizar un ciclo iterativo de diseño y verificación. Finalmente habría que hacer un análisis no lineal, con tal de verificar los desplazamientos reales de la estructura, este proceso no es necesario hacerlo para el caso de diseño basado en desempeño, pues se parte de un desplazamiento de diseño y la estructura responde a ese desplazamiento, de tal forma que el diseñador controla el proyecto desde un inicio, indicando y detallando la forma en que la estructura responderá, de tal manera que la respuesta de la estructura ya no es una incógnita, sino que es un dato de entrada del diseño y el producto final es un detallado que lleva intrínseco el comportamiento esperado de la estructura.
- Si bien la metodología basada en fuerzas y la metodología basada en desplazamientos ofrecen diseños seguros estructuralmente, desde la filosofía del diseño sismo resistente, la metodología basada en desplazamiento ofrece un procedimiento en el cual se tiene mayor conciencia del proceso de diseño, comportamiento y desempeño de las estructuras. Los desplazamientos que experimenta la estructura son una medida directa del daño en los elementos estructurales y no estructurales, a diferencia del método tradicional en donde las magnitudes de fuerza sísmica no son un indicador del desempeño de la estructura.
- La evaluación de los desplazamientos en el método basado en fuerzas, no involucra el detallado del acero de refuerzo sino solamente la rigidez de los elementos que forman la estructura y dependiendo de la forma como se modelen las rigideces de los elementos, se pueden obtener resultados de desplazamientos y derivas muy diferentes. En contraste, la metodología de diseño basada en desplazamientos tiene en cuenta el aporte a la rigidez de las cuantías de acero de refuerzo.

8 REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Aguilar, M (2010). Diseño sísmico basado en desempeño para una edificación esencial de concreto reforzado. [Tesis de maestría, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey]. Repositorio Tecnológico de Monterrey.
- [2] Gallego, M. (2014). Diseño sísmico por desempeño en Colombia. *Revista De Ingeniería*, 0(13), 45-51.
- [3] García, L. & Naranjo, L. (2011). Diseño por desempeño de elementos estructurales de hormigón armado mediante los códigos FEMA, utilizando ETABS. [Tesis de grado, Escuela Politécnica del Ejército]. Repositorio de la Unidad de Fuerzas Armadas ESPE.
- [4] Pérez, Francisco. (2014). Diseño sísmico basado en desplazamientos. Libro recuperado de: https://www.academia.edu/37798728/DISE%C3%91O_S%C3%8DSMICO_BASADO_EN_DESPLAZAMIENTOS_DDBD
- [5] Aguiar, Roberto. (2003). Análisis Sísmico por Desempeño. Libro recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/280627456_Analisis_Sismico_por_Desempeno
- [6] Carrillo, Julián (2008). Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de estructuras utilizando un diseño por desempeño. *Dyna*, 75(155),91-102. ISSN: 0012-7353.
- [7] Bairán, Jesús & Montoya Coronado, Luis. (2017). Diseño sísmico directo basado en prestaciones de estructuras irregulares. Conferencia: VII Congreso de ACHE At: A Coruña, España
- [8] Barradas Hernández, José E., & Ayala Milián, A. Gustavo (2014). PROCEDIMIENTO DE DISEÑO SISMICO MULTINIVEL BASADO EN DESPLAZAMIENTO PARA ESTRUCTURAS A BASE DE MARCOS DE CONCRETO REFORZADO. *Revista de Ingeniería Sísmica*, (91),74-101. ISSN: 0185-092X. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=618/61835730004>
- [9] Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. NSR-10.
- [10] FEMA 356 (2000), Prestandard and Comentary for the seismic rehabilitation of buildings. Federal Emergency Management Agency, Whashington DC, USA.
- [11] SEAOC (1999), Vision 2000: Performance Based Seismic Engineering of Buildings. Structural Engineers Association of California, 1995
- [12] Kappos, Andreas & Stefanidou, Sotiria. (2010). A deformation-based seismic design method for 3D R/C irregular buildings using inelastic dynamic analysis. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 8. 875-895. 10.1007/s10518-009-9170-1.
- [13] Kappos, A. y Manafpour, A., (2001), "Seismic design of R/C buildings with the aid of advanced analytical techniques", *Engineering Structures* 23(4): 319-332.
- [14] Méndez. Tirso. (2011). Estudio comparativo de métodos de diseño sísmico basados en desplazamientos aplicados a estructuras reticulares de concreto reforzado (tesis de maestría). Instituto de Ingeniería, UNAM.
- [15] Hamburger R. O. y Moehle J. P.(2000), "State of Performance Based-Engineering in the United States" ,Second US-Japan Workshop on Performance-Based Design Methodology for Reinforced Concrete Building Structures, Sapporo, Japan.
- [16] ATC (1996) "ATC-40 Seismic evaluation and retrofit of concrete Buildings volume 1", Applied Technology Council, Report: SSC 96-01, Seismic Safety Commission, Redwood City, CA, EUA

- [17] Chopra, K. y Goel, K. (2001), "Direct Displacement-Based Design: Use of Inelastic Design Spectra vs. Elastic Design Spectra", *Earthquake Spectra*, Vol. 17, No. 1, pp. 47 – 64.
- [18] Freeman S. A. (1998), "The Capacity Spectrum Method as a Tool for Seismic Design", *Proceedings of the 11 European Conference on Earthquake Engineering*, Sept 6-11, Paris
- [19] Panagiotakos, T.B. y Fardis, M.N. (1999), "Deformation-Controlled Earthquake-Resistant Design of RC Buildings", *Journal of earthquake Engineering*, Vol. 3, No. 4, 498-518
- [20] FIB (2003), "Displacement-based seismic design of reinforced concrete buildings", *Bulletin 25 Federation Internationale de Betón*, Lausanne, Suiza.
- [21] López, S.E., Castellanos, H. y Ayala A. G. (2009), "Método de diseño sísmico por desplazamientos para marcos regulares de concreto reforzado", *XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, SMIS, Puebla, México
- [22] López, S.E. (2009), "Diseño por Desplazamientos de Estructuras de Concreto", *Tesis de Maestría en Ingeniería (Estructuras)*, Posgrado en Ingeniería, UNAM, México.
- [23] Aguilera, M.A., (2011), "Métodos de diseño sísmico basado en desplazamientos con aplicación a estructuras reticulares de concreto reforzado", *Tesis de Maestría en Ingeniería (Estructuras)*, Posgrado en Ingeniería, UNAM, México.
- [24] Ayala, A.G. (2001), "Evaluación del desempeño sísmico de estructuras, un nuevo enfoque", *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol. 17, 3, pp. 285- 303, *Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)*, Barcelona, España.
- [25] Sullivan, T. (2002), "The Current Limitations of Displacement Based Design", *A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Master Degree in Earthquake Engineering*, IUSS Press, Pavia, Italia.
- [26] Shibata, A. y Sozen, M. (1976), "Substitute Structure Method for Seismic Design in Reinforced Concrete", *Jour. Str. Div. ASCE*, 102, 6.
- [27] Priestley, M. & Calvi, G. & Kowalsky, Mervyn & Powell, Graham. (2008). *Displacement-Based Seismic Design of Structures*. *Earthquake Spectra - EARTHQ SPECTRA*. 24. 10.1193/1.2932170.