



UNIVERSIDAD  
DON VASCO, A.C.

# UNIVERSIDAD DON VASCO A.C.

Incorporación No. 8727 – 15

A la Universidad Nacional Autónoma de México

Escuela de Ingeniería Civil

**VARIACIÓN DE LA CURVA DE CAPACIDAD DE ACUERDO A LA  
CONFIGURACIÓN DE FUERZAS LATERALES EN EL ANÁLISIS  
ESTÁTICO NO LINEAL.**

Tesis

para obtener el título de

Ingeniero Civil

presenta:

**Genoveva García Moreno.**

Asesor: M.I. Enrique Omar Navarro Caballero.

Uruapan, Michoacán, 7 de Marzo del 2012.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# ÍNDICE

## **Introducción.**

Antecedentes. . . . .	1
Planteamiento. . . . .	2
Objetivo general. . . . .	3
Pregunta de investigación . . . . .	3
Justificación. . . . .	4

## **Capítulo 1.- Diseño estructural.**

1.1 Concepto de diseño estructural. . . . .	5
1.2 Proceso de diseño estructural. . . . .	6
1.2.1 Estructuración. . . . .	7
1.2.2 Análisis estructural. . . . .	7
1.2.3 Dimensionamiento. . . . .	9
1.3 Criterios de diseño. . . . .	9
1.3.1 Diseño por medio de modelos. . . . .	9
1.3.2 Diseño por esfuerzos de trabajo. . . . .	10

1.3.3 Diseño por resistencia última.	11
1.3.4 Diseño al límite.	15
1.3.5 Diseño por desempeño.	16
1.3.5.1 Etapa conceptual.	17
1.3.5.1.1 Niveles de desempeño.	17
1.3.5.1.1.1 Propuesta comité VISION 2000.	17
1.3.5.1.1.2 Propuesta del ATC-40.	19
1.3.5.1.2 Movimientos sísmicos de diseño.	24
1.3.5.1.2.1 Propuesta del comité VISION 2000.	25
1.3.5.1.2.2 Propuesta ATC-40.	27
1.3.5.2 Etapa numérica.	28
1.3.5.3 Etapa de implementación.	29

## **Capítulo 2.- Análisis estático no lineal.**

2.1 Concepto de análisis estático no lineal.	31
2.2 Curva de capacidad.	36
2.2.1 Configuración de fuerzas laterales.	37

2.2.2 Trazo de la curva de capacidad. . . . .	42
2.3 Curva de demanda. . . . .	48
2.4 Curva de capacidad vs. Curva de demanda. . . . .	50

### **Capítulo 3.- Importancia de las nuevas filosofías de diseño.**

3.1 Sismos en el mundo. . . . .	53
3.2 Sismos en México. . . . .	55
3.3 Efectos de los sismos en las estructuras. . . . .	56
3.4 Deficiencias en los métodos de diseño actuales. . . . .	58
3.5 Implementación de nuevas filosofías de diseño. . . . .	58

### **Capítulo 4.- Metodología.**

4.1 Método empleado. . . . .	60
4.2 Enfoque de la investigación. . . . .	61
4.2.1 Alcance de la investigación. . . . .	61
4.3 Diseño de la investigación. . . . .	62
4.4 Instrumentos de recopilación de datos. . . . .	63

4.5 Descripción del proceso de investigación. . . . .	63
---	----

**Capítulo 5.- Análisis e interpretación de datos.**

5.1 Selección de los modelos estructurales. . . . .	65
---	----

5.1.1 Análisis elástico lineal de los modelos. . . . .	66
--	----

5.1.2 Diseño estructural de los modelos. . . . .	67
--	----

5.1.3 Selección de la configuración de fuerzas laterales para el análisis estático no lineal. . . . .	68
---	----

5.2 Análisis estático no lineal de los modelos estructurales. . . . .	68
---	----

5.3 Obtención de la curva de capacidad de los modelos estructurales. . . . .	70
--	----

5.4 Análisis e interpretación de resultados. . . . .	72
--	----

5.5 Análisis no lineal de los modelos sometidos a una aceleración en la base. . . . .	81
---	----

<b>Conclusión.. . . . .</b>	<b>87</b>
-----------------------------	-----------

<b>Bibliografía.. . . . .</b>	<b>90</b>
-------------------------------	-----------

<b>Otras fuentes de información. . . . .</b>	<b>93</b>
--	-----------

# INTRODUCCIÓN

## **Antecedentes.**

El diseño por desempeño es un criterio que consiste en evaluar el comportamiento que tendrá una estructura al ser sometida a determinadas fuerzas. Para llevarlo a cabo se puede recurrir a distintos métodos, dentro de los cuales destaca el análisis estático no lineal para el que se requiere ingresar en la curva de capacidad resistente de una estructura, la cual indica la deformación que tendrá una estructura después de someterse a determinada fuerza y en determinada posición.

La curva de capacidad de una estructura es un tema que no ha sido abordado en la Universidad Don Vasco A.C. en ninguna tesis específicamente. Sin embargo, existen algunas que estudian o mencionan el criterio de diseño por desempeño para el cual esta curva tiene gran importancia. La tesis en la que se menciona el método de diseño por desempeño está titulada “Comparativa de diseño sísmico de edificios regulares de concreto reforzado por métodos de resistencia última y por desempeño, ubicados en distintas zonas del estado de Michoacán”, elaborada por Yudith Paulina Mendoza Espinoza en el año 2008.

Esta curva de capacidad varía dependiendo de las condiciones a las que la estructura sea sometida, como son las fuerzas que actúan sobre ella, la posición en la que actúan, los materiales de los que está formada la estructura, etc.

## **Planteamiento del problema.**

Los reglamentos actuales de diseño permiten que las estructuras tengan incursiones en el intervalo inelástico durante un sismo severo. Sin embargo, dadas las enormes incertidumbres relacionadas con el comportamiento esperado, existe la posibilidad de que se presenten daños mayores a los previstos en los elementos estructurales. Es por eso que en los últimos años se han incrementado los esfuerzos por desarrollar nuevas técnicas para diseñar y construir edificaciones que tengan un comportamiento más eficiente ante la ocurrencia de estos fenómenos.

Dado que la mayoría de estas nuevas metodologías de diseño implican tener un mejor conocimiento del comportamiento inelástico de las estructuras, se hace necesaria la obtención de “curvas de capacidad” que representen dicho comportamiento.

Para la obtención de la curva de capacidad de una estructura se realiza un análisis estático no lineal, conocido también como análisis pushover, el cual consiste en aplicar fuerzas laterales en los entrepisos, incrementándolas gradualmente para ir graficando la fuerza cortante en la base contra el desplazamiento lateral en azotea. Sin embargo, se ha visto que los resultados pueden variar considerablemente en algunas estructuras, dependiendo del patrón de fuerzas laterales aplicadas.

Entonces, ¿cuál debe ser el patrón de fuerzas laterales que debe aplicarse para que las curvas de capacidad obtenidas con el análisis estático no lineal realmente represente el comportamiento inelástico de la estructura? y ¿podrá este patrón de fuerzas laterales ser aplicable a cualquier tipo de estructura?



En esta investigación se estudian las curvas de capacidad obtenidas en estructuras de diversas alturas, variando los patrones de fuerzas laterales aplicadas, con la finalidad de determinar aquel que lleve a resultados más satisfactorios en cada caso.

### **Objetivo General.**

Determinar la variación en la curva de capacidad de acuerdo a la configuración de las fuerzas laterales en el análisis estático no lineal.

Objetivos particulares:

- 1) Obtener la configuración de fuerzas laterales más apropiada para que el comportamiento de la estructura sea el más favorable para ésta.
- 2) Determinar la curva de capacidad para diferentes configuraciones de fuerzas que pueden presentarse.
- 3) Estimar la respuesta de las estructuras sometidas a diferentes configuraciones de cargas laterales.

### **Pregunta de investigación.**

¿Cuál es la variación en la curva de capacidad de acuerdo a la configuración de las fuerzas laterales en el análisis estático no lineal?

Preguntas secundarias:

¿En qué consiste el criterio de diseño por desempeño?

¿Qué es el análisis estático no lineal?

¿Cómo se forma la curva de capacidad?

¿Para qué sirve la curva de capacidad?

¿Qué es la configuración de fuerzas laterales?

### **Justificación.**

La investigación sobre el tema de la variación en la curva de capacidad según la configuración de fuerzas laterales en el análisis estático no lineal es de gran importancia, pues aportará herramientas y facilidades para la utilización de este método.

Con la realización de esta investigación los estudiantes y la escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Don Vasco contarán con una fuente de información la cual les ayudará a la aplicación del método de diseño por desempeño, la Ingeniería Civil como ciencia, pues será una aportación que facilitará el uso del mismo método, mostrando el comportamiento de la curva de capacidad según la posición de las fuerzas laterales que estén afectando a la estructura.

# CAPÍTULO 1

## DISEÑO ESTRUCTURAL

El primer capítulo del presente documento aborda el tema del diseño estructural, el concepto de este, el proceso que debe seguirse para realizarlo y los diferentes criterios que existen para llevarlo a cabo. Así mismo describe brevemente cada uno de los criterios del diseño estructural.

### **1.1 Concepto de diseño estructural.**

El diseño estructural es el conjunto de actividades y procesos que realiza un proyectista con el fin de definir las dimensiones, forma y características de una estructura. Una estructura es un sistema, esto se refiere a que se compone de varias partes las cuales son juntas u ordenadas de determinada forma para cumplir una función.

De acuerdo con Meli (1985), la función de una estructura es soportar las cargas o solicitaciones a las que esté sometida durante las distintas etapas de su existencia.

Según González Cuevas (2000), una estructura tiene que cumplir algunas características, como cumplir la función a la que está destinada con un grado de seguridad razonable y tener un buen comportamiento durante su servicio, sin salir de los parámetros de la economía y la estética.

Estos parámetros son los que hacen que el diseño estructural sea un poco más complejo, pues no hay una solución única para resolver un problema, sino que

simplemente hay soluciones razonables, y la solución va a depender totalmente de cada diseñador pues está totalmente ligada al criterio que este maneje, por lo tanto puede haber muchas soluciones para el mismo problema y a la vez todas estar correctas según el criterio de cada diseñador.

## **1.2 Proceso de diseño estructural.**

Según lo mencionado por Meli (1985) para comenzar un diseño es muy importante iniciar planteando el problema, definiendo cuál es la función que debe cumplir y cuáles son las restricciones que se tienen, una vez que se ha reunido la información sobre el problema comienza el proceso de diseño, el cual es cíclico, hasta llegar a una solución razonable.

El proceso termina plasmando los resultados en un plano el cual será la base para quienes lo van a ejecutar, por lo tanto es importante plasmarlo de una manera correcta y entendible para evitar errores.

Para facilitar un poco el diseño estructural, las estructuras se consideran sistemas las cuales son conformadas por subsistemas, este enfoque es de gran utilidad, sin embargo no deja de ser muy importante el criterio utilizado, la intuición y la capacidad creativa del proyectista.

Al estudiar una estructura es muy importante conocer la relación entre las características de los elementos de esta, las acciones a las que es sometida y las respuestas de la misma.

Se considera como acciones a las cargas o sollicitaciones a las que puede estar sometida una estructura y se considera como respuestas al comportamiento que esta tiene bajo esas acciones.

Se considera que para obtener un buen método de diseño es necesario conocer todas las posibles combinaciones de acciones, características y respuestas de una estructura, sin embargo este número de combinaciones puede ser infinito, por lo tanto es recomendable conocer las acciones más frecuentes sobre los elementos de una estructura.

Según lo mencionado por Meli (1985), el diseño estructural se divide en tres etapas: estructuración, análisis estructural y dimensionamiento.

### **1.2.1 Estructuración.**

Durante esta etapa del proceso se define el sistema estructural a utilizar, es decir, el conjunto de elementos que serán los encargados de soportar las cargas. También se determinan los materiales de los que estará formada la estructura y se lleva a cabo un dimensionamiento previo.

En esta etapa de estructuración también se lleva a cabo un análisis de cargas con el fin de obtener las distintas fuerzas a las que estará sometido cada elemento de la estructura.

### **1.2.2 Análisis estructural.**

Durante esta etapa se determinan las respuestas a las diferentes cargas y acciones a las que puede estar sometida la estructura a lo largo de su vida útil.

Cuando se está diseñando es necesario considerar las acciones de la forma más desfavorable que se puedan llegar a presentar, de este modo se puede estar un poco más seguro de que la estructura tendrá un buen comportamiento en condiciones normales de servicio.

De acuerdo con Meli (1985), para analizar una estructura es necesario idealizarla. Las acciones exteriores sobre una estructura producen acciones interiores de magnitudes desconocidas; el propósito del análisis es valorar estas acciones interiores en cada uno de los elementos de la estructura. Para lo cual se necesita saber la relación que existe entre las acciones y las respuestas de la estructura o elemento.

El análisis se conforma de los siguientes pasos:

- Modelar la estructura, es decir, idealizar la estructura como un modelo teórico y definir las propiedades de los elementos que lo formarán. Usualmente, para formar el modelo se utilizan elementos como vigas, columnas, losas, armaduras, etc., los cuales unidos o combinados forman marcos, vigas continuas, etc.
- Determinar las acciones de diseño, consiste en determinar la magnitud de las acciones que actuarán sobre la estructura. Este paso puede ser un poco complicado ya que en muchos casos estas acciones están establecidas en códigos y reglamentos, pero en otros no se cuenta con la información exacta para determinar estas magnitudes, lo cual puede llevar

a cometer errores significativos para el análisis. Por lo cual se debe tener mucho cuidado en el momento de asignar las cargas de estas acciones.

- Determinar los efectos de las acciones de diseño en el modelo de estructura elegido. Esta etapa se refiere propiamente al análisis, aquí se determinan las fuerzas internas (flexión, torsión, fuerzas axiales y cortantes), así como las deformaciones de los elementos del modelo.

### **1.2.3 Dimensionamiento.**

“Se entiende por dimensionamiento la determinación de las propiedades geométricas de los elementos estructurales y de la cantidad y posición de acero de refuerzo.” (González Cuevas; 2000: 22)

Con los elementos mecánicos actuantes, determinados en el paso anterior y un criterio de diseño fundamentado en un reglamento de construcción, se determina si las dimensiones propuestas son adecuadas para soportar las solicitaciones y se detalla tanto el refuerzo como las conexiones entre los elementos.

## **1.3 Criterios de diseño.**

Existen distintos criterios de diseño para llevar a cabo el dimensionamiento de los elementos que forman una estructura, los cuales han ido evolucionando con el paso del tiempo.

### **1.3.1 Diseño por medio de modelos.**

Este criterio consiste en crear un modelo a escala de la estructura que se desea diseñar y aplicarle las cargas que actuarán sobre la estructura, observando así

su comportamiento y deformaciones. De acuerdo al comportamiento que este modelo presente se realizan las modificaciones necesarias en los elementos que lo forman hasta obtener el comportamiento deseado.

Los resultados que se obtienen con el uso de este criterio son muy precisos, sin embargo resulta muy costoso, por lo que solo se utiliza para construcciones de gran importancia.

### **1.3.2 Diseño por esfuerzos de trabajo.**

Este método se basa en determinar los elementos mecánicos en los miembros de una estructura utilizando un análisis elástico. Una vez calculados las acciones internas o elementos mecánicos, como pueden ser fuerzas axiales, cortantes, de torsión o flexión, se procede a calcular el esfuerzo que puede soportar el material de cada elemento.

Al esfuerzo que se presenta en el elemento estructural se le conoce como esfuerzo de trabajo, y al esfuerzo que resiste el material se le conoce como esfuerzo permisible.

Este criterio señala que se debe cumplir la condición siguiente:

$$\text{Esfuerzo de trabajo} < \text{Esfuerzo permisible}$$

En el caso de que la expresión anterior no se cumpla, las dimensiones de los elementos o los materiales que los conformen deberán ser modificados hasta cumplirla.



### **1.3.3 Diseño por resistencia última.**

Actualmente el procedimiento más utilizado para dimensionar es el llamado de resistencia última o dimensionamiento plástico el cual permite obtener las dimensiones de un elemento para que tengan una resistencia determinada.

Se debe revisar que la resistencia de la estructura y de cada uno de sus elementos sea mayor a las acciones que actúan sobre ellos. Para esto se comienza por definir las acciones que actúan en la estructura (permanentes, variables y accidentales). Después se calculan los valores de las fuerzas internas (fuerzas axiales, cortantes, momentos flexionantes y de torsión). Estas se multiplican por los llamados factores de carga ( $F_c$ ) para obtener las fuerzas internas de diseño. En seguida se calculan las resistencias de diseño, las cuales se obtienen calculando las resistencias nominales de cada elemento y multiplicándolas por factores reductivos ( $F_R$ ), que tienen como objetivo cubrir los distintos rangos de incertidumbre que existen al estimar las fuerzas de resistencia de la estructura y los elementos mecánicos actuantes. Y, por último, se revisa que las resistencias de diseño sean mayores o iguales a las fuerzas internas de diseño.

El planteamiento por medio de estados límite no es más que una forma de diseño en la cual se estudian y analizan las acciones de una forma ordenada y racional, donde se toma en cuenta la probabilidad de ciertos comportamientos. Este método pretende que las características de una estructura estén dentro de ciertos límites considerados aceptables. Según la lectura, en este método “una estructura o elemento estructural deja de ser útil cuando alcanza un estado, llamado estado

límite, en el que deja de realizar su función para la cual fue diseñado.” (González Cuevas; 2000: 23)

Conforme a González Cuevas (2000), y al reglamento de construcción del Distrito Federal, los estados límite se dividen en dos tipos: los de falla y los de servicio. Los estados límite de falla se presentan cuando una estructura ya no es capaz de resistir cargas o cuando sufra daños que perjudiquen su resistencia frente a nuevas cargas que puedan llegar a presentarse. Los estados límite de servicio corresponden a los daños que impidan el buen funcionamiento de una estructura sin limitar su capacidad de carga. Como pueden ser deformaciones, agrietamientos, vibraciones, etc.

Se pueden clasificar las acciones permanentes como aquellas que presentan las intensidades máximas, excepto cuando algún elemento sea bueno para la estabilidad de la estructura, en este caso se tomará la intensidad mínima probable. Las acciones variables en cambio, toman en cuenta cuatro intensidades diferentes: intensidad máxima probable, intensidad mínima probable, intensidad media (utilizada para efectos a largo plazo) y una intensidad instantánea (utilizada como el valor de la intensidad máxima combinada con una acción accidental). Finalmente las acciones accidentales son aquellas como sismos o viento, las cuales se basan en la frecuencia con la que se presentan, no es posible saber exactamente cuando y como se presentaran, pero existen registros de acciones anteriores que muestran un tiempo promedio y la probabilidad de ser excedido.

Las fuerzas internas se determinan analizando la estructura sometida a distintas combinaciones de acciones que tienen una probabilidad no despreciable de suceder al mismo tiempo.

Los llamados factores de carga son aquellos que se multiplican por las cargas nominales máximas y mínimas para aumentarlas y así disminuir la probabilidad de que estas sean alcanzadas o no. Según el reglamento del Distrito Federal los factores de carga serán diferentes según el caso; será de 1.4 para las combinaciones de acciones permanentes y variables, excepto cuando haya probabilidad de que se acumulen muchas personas o en lugares que exista equipo muy valioso, en esos casos el factor será de 1.5; será de 1.1 en los casos de combinaciones de una acción accidental y las acciones permanentes y variables; para las acciones que sean buenas para la estabilidad de la estructura el factor será de 0.9; y para la revisión de estados límite el factor de carga será 1.

Se conoce como resistencia a la magnitud máxima de una acción sobre un elemento que produciría que este alcance su estado límite de falla. Existen diferentes métodos para calcularla y a esta resistencia calculada se le llama resistencia nominal. Las resistencias nominales deben ser multiplicadas por factores reductivos de resistencia, los cuales permiten tomar en cuenta ciertos errores que pueda haber en el material o en la colocación de este. Este factor será mayor para elementos de falla frágil que para los de falla dúctil.

Los factores de resistencia de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal sobre

Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones, tendrán los valores siguientes:

$F_R = 0.9$  para flexión.

$F_R = 0.8$  para cortante y torsión.

$F_R = 0.7$  para transmisión de flexión y cortante en losas o zapatas.

Flexocompresión:

$F_R = 0.8$  cuando el núcleo esté confinado.

$F_R = 0.8$  cuando el elemento falle en tensión;

$F_R = 0.7$  cuando el núcleo no esté confinado y la falla sea en compresión

$F_R = 0.7$  para aplastamiento.

La revisión de seguridad es la comprobación de que la resistencia de diseño es mayor que las fuerzas internas de las acciones, concluyendo así que estas no llegaran a sus estados límite. La condición final que deberá cumplirse en este método será:

$$F_R (R) > F_c (S) \quad (1.1)$$

Donde:  $F_R$  = Factor de resistencia

$F_c$  = Factor de carga

$R$  = Fuerza resistente

$S$  = Solicitación

#### **1.3.4 Diseño al límite.**

En los métodos anteriormente mencionados, las fuerzas o elementos mecánicos se obtienen por medio de un análisis elástico, sin embargo, cabe mencionar que la mayoría de los materiales utilizados en la construcción presentan un comportamiento inelástico, por lo que en dichos criterios se desprecia significativamente el valor de la resistencia real de los materiales.

Gracias a esto se propuso un método donde se utilice la resistencia máxima del material, además de considerar la interacción de los elementos que formen la estructura, ya que la mayoría de las estructuras tienen la capacidad de seguir siendo estables a pesar de que alguno de sus elementos haya alcanzado su resistencia máxima.

Este método consiste en crear un modelo matemático de la estructura en dos o tres dimensiones, en el cual se tomarán en cuenta las características inelásticas del material y el tipo de conexiones entre los elementos de la estructura. Al momento de aplicar las cargas se irán identificando los elementos que alcancen la parte inelástica del material por lo que desarrollarán articulaciones plásticas.

La carga máxima que resistirá la estructura será aquella que no ponga en riesgo la estabilidad de la estructura de acuerdo al número y configuración de articulaciones plásticas existentes.

Este proceso resulta complejo, desde el análisis inelástico de la estructura, hasta la definición de la cantidad y la ubicación de las articulaciones plásticas. Por esta razón éste método no ha tenido mucha aceptación.

### **1.3.5 Diseño por desempeño.**

Debido a los daños que se han tenido en las estructuras a causa de los sismos en las últimas décadas, los criterios de diseño han ido evolucionando hasta llegar al diseño sísmico, donde ha destacado el diseño por desempeño.

Según lo dicho por Aguilar (2001), el diseño de acuerdo al desempeño sísmico, se basa en la elección de esquemas de evaluación que permitan el dimensionamiento de forma que, para distintos niveles de movimiento del terreno los daños en la estructura no sobrepasen los estados límite.

La forma de cuantificar el desempeño de un edificio, es de acuerdo al daño que este haya sufrido a causa de un movimiento sísmico y el impacto que tengan estos daños. Este concepto se aplica no sólo para edificios, sino para cualquier estructura o elemento que la forme, inclusive si se trata de un elemento no estructural.

El desempeño de un edificio puede clasificarse en tres etapas, la primera donde se desarrolla el concepto, dentro de esta fase se distinguen diferentes conceptos como son: el nivel de desempeño, nivel de amenaza y el desempeño esperado por la edificación; la segunda es la etapa numérica y la tercera donde se construye y mantiene la estructura.

### **1.3.5.1 Etapa conceptual.**

#### **1.3.5.1.1 Niveles de desempeño.**

El nivel de desempeño representa una condición límite de acuerdo a tres aspectos fundamentales: los posibles daños físicos en los elementos estructurales y no estructurales, el riesgo y la seguridad de los ocupantes de la edificación a raíz de los daños y, por último, qué tan funcional es la edificación después del sismo.

Existen dos propuestas que establecen los niveles de desempeño: el ATC-40 y el del comité VISION 2000. La primera se enfoca al daño en los elementos estructurales y no estructurales de acuerdo al funcionamiento de la estructura. La segunda se basa en la relación de la estructura con sus ocupantes y en el deterioro o degradación de los elementos estructurales o no estructurales.

##### **1.3.5.1.1.1 Propuesta comité VISION 2000.**

Esta propuesta se concentra en puntualizar los daños en elementos estructurales y no estructurales según el funcionamiento de la edificación. Ésta define cuatro niveles de desempeño:

- Totalmente Operacional: este nivel no incluye daños significativos, la edificación continua en estado de ser habitada, es segura y no hay daños que compliquen el funcionamiento de sus instalaciones y servicios. No requiere reparaciones.
- Ocupacional: este nivel incluye daños menores, los cuales no comprometen la seguridad de la estructura, en estos casos se pueden presentar daños en elementos estructurales, sin embargo, son daños

limitados que no ponen en riesgo la seguridad de la estructura, permitiendo que esta sea ocupada inmediatamente después del sismo. Requiere reparaciones menores.

- Seguridad: este nivel incluye daños moderados en sus elementos estructurales y no estructurales. Su rigidez lateral y capacidad de resistir cargas se ven afectadas considerablemente, sin embargo la estructura se mantiene en un nivel de seguridad aceptable contra el colapso, sin embargo, no podrá ser ocupada después del sismo hasta no realizar las reparaciones necesarias, estas dependiendo de su economía.
- Próximo al colapso: en este nivel la rigidez de la estructura y su capacidad de resistir carga han disminuido en un porcentaje muy elevado, lo que significa que la estructura no es segura pues podría colapsar en cualquier momento. Sus elementos principales siguen funcionando pero esto no garantiza que la estructura pueda ser ocupada. Posiblemente su reparación sea muy costosa y no viable.



Los niveles de desempeño propuestos por el comité VISION 2000, se resumen en la tabla mostrada a continuación:

<b>Estado de daño</b>	<b>Nivel de desempeño</b>	<b>Descripción de los daños</b>
Despreciable	Totalmente operacional	Daño estructural y no estructural despreciable o nulo. Los sistemas de evacuación y todas las instalaciones continúan prestando sus servicios.
Leve	Operacional	Agrietamientos en elementos estructurales. Daño entre leve y moderado en contenidos y elementos arquitectónicos. Los sistemas de seguridad y evacuación funcionan con normalidad.
Moderado	Seguridad	Daños moderados en algunos elementos. Pérdida de resistencia y rigidez del sistema resistente de cargas laterales. El sistema permanece funcional. Algunos elementos no estructurales y contenidos pueden dañarse. Puede ser necesario cerrar el edificio temporalmente.
Severo	Pre-Colapso	Daños severos en elementos estructurales. Fallo de elementos secundarios, no estructurales y contenidos. Puede llegar a ser necesario demoler el edificio.
Completo	Colapso	Pérdida parcial o total de soporte. Colapso total o parcial. No es posible su reparación.

Tabla 1.1 Descripción de los estados de daño y niveles de desempeño (SEAOC Vision 2000 Committee, 1995)

Fuente: Aguilar, 2001

#### **1.3.5.1.1.2 Propuesta del ATC-40.**

Esta propuesta surge de una combinación de los niveles de elementos estructurales y los de elementos no estructurales, ambos establecidos de formas diferentes.

Los elementos estructurales se pueden clasificar en tres niveles: ocupación inmediata, seguridad y estabilidad estructural. Estos niveles se utilizan en el proceso

de evaluación y rehabilitación de la estructura, sin embargo, también existen otros rangos para determinar más fácilmente el nivel de desempeño de la estructura, estos rangos son: daño controlado y seguridad limitada.

Estos niveles se designan por la abreviación SP-n, donde SP son las siglas de “Structural Performance” y n es un número que varía entre 1 y 6.

SP-1. Ocupación inmediata: en este nivel los daños son mínimos, prácticamente imperceptibles, la capacidad de resistencia a cargas laterales y verticales sigue siendo la misma que antes del sismo. No se presentan pérdidas humanas, ni cambios en la funcionalidad de la estructura.

SP-2. Daño controlado: en este nivel el daño se encuentra entre los límites de ocupación inmediata y seguridad. Los ocupantes pueden verse afectados, sin embargo, su vida está fuera de peligro.

SP-3. Seguridad: dentro de este nivel los daños a la estructura no sobrepasan totalmente los límites de seguridad, sin embargo, probablemente la estructura requerirá reparaciones antes de ser ocupada nuevamente. Puede haber heridos dentro y fuera de la estructura pero el riesgo de vida de los habitantes debido a la falla de algún elemento estructural es muy bajo.

SP-4. Seguridad limitada: este nivel se encuentra entre la seguridad y la estabilidad de la estructura. Se requieren reparaciones obligatorias para garantizar la seguridad.

SP-5. Estabilidad Estructural: en este nivel la estructura corre un riesgo muy grande de sufrir un colapso ya sea total o parcial. La estructura sufre pérdida de rigidez y resistencia de cargas, y es posible que la reparación de los daños sea poco o nada factible.

SP-6. No considerado: no se considera un nivel de desempeño, pero es útil cuando se necesita una evaluación de los daños sísmicos o para realizar un reforzamiento.

Los niveles de desempeño para elementos no estructurales se dividen en cuatro y se representan con la abreviatura NP-n, donde NP son las siglas de “Nonstructural Performance” y n es una letra.

NP-A. Operacional: después de un sismo, todos los elementos no estructurales permanecen en su lugar y en perfectas condiciones para seguir funcionando. Tanto maquinarias como sistemas del edificio permanecen operables.

NP-B. Ocupación inmediata: los elementos no estructurales se encuentran en su lugar, pero pueden presentar alguna dificultad para funcionar normalmente debido a alguna falla en los servicios. El edificio puede ser ocupado normalmente.

NP-C. Seguridad: los elementos no estructurales pueden presentar daños graves. Los sistemas y maquinarias pueden no estar en buen estado para funcionar, hasta el grado de tener que repararlos o reemplazarlos. La estructura no llega al colapso ni pone en peligro la seguridad de los ocupantes, pero su funcionalidad se puede ver limitada.

NP-D. Amenaza reducida: en este nivel los elementos no estructurales presentan daños graves pero sin llegar al colapso de elementos que provoquen heridas a grupos de personas.

NP-E. No considerado: no es un nivel de desempeño, simplemente indica que los elementos no estructurales no han sido evaluados. Solo en caso de que estos elementos tengan una relación directa con la respuesta de la estructura, como lo son muros de relleno.

De acuerdo a los distintos niveles de desempeño para los elementos estructurales y no estructurales propuestos en el ATC-40, surgen combinaciones de estos niveles para obtener un nivel global del comportamiento de la estructura. Estas combinaciones se muestran en la tabla siguiente, donde además se resaltan cuatro niveles principales para la estructura, descritos a continuación.

Niveles de desempeño no estructural	Niveles de desempeño estructural					
	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP9
NP-A	<b>1-A Operacional</b>	2-A	NR	NR	NR	NR
NP-B	<b>1-B Ocupación Inmediata</b>	2-B	3-B	NR	NR	NR
NP-C	1-C	2-C	<b>3-C Seguridad</b>	4-C	5-C	6-C
NP-D	NR	2-D	3-D	4-D	5-D	6-D
NP-E	NR	NR	3-E	4-E	<b>5-E Estabilidad Estructural</b>	No Aplicable
NR: combinación No Recomendada						

Tabla 1.2 Niveles de desempeño de las estructuras (ATC, 1996).

Fuente: Aguilar, 2001

1-A Operacional: en este nivel los daños estructurales no son graves, y los daños en elementos no estructurales no causan ningún problema o complicación para que la estructura siga funcionando. Se mantiene la seguridad de los ocupantes y las reparaciones que sean necesarias no impiden el funcionamiento normal de la estructura.

1-B Ocupación inmediata: este nivel de desempeño se asocia a las estructuras importantes, que no pueden dejar de funcionar a pesar del sismo, como por ejemplo los hospitales. Puede que la estructura requiera algunas reparaciones, sin embargo, esto no compromete la seguridad de los ocupantes.

3-C Seguridad: corresponde a un nivel donde la seguridad de los ocupantes no se encuentra en riesgo, a pesar de que puede haber fallado algún elemento

estructural o no estructural. Este nivel de desempeño es el que se espera para una estructura que este bajo los códigos actuales.

5-E Estabilidad estructural: la seguridad de la estructura se encuentra al límite. Los daños en los elementos no estructurales no requieren ser evaluados debido a los grandes daños en los elementos estructurales. La estructura tiene un alto riesgo de colapso y la seguridad de los ocupantes y los peatones se encuentra comprometida, por lo que se recomienda desalojarla.

#### **1.3.5.1.2 Movimientos sísmicos de diseño.**

De acuerdo con Aguilar (2001), un sismo se considera una amenaza directa sobre una estructura, debido a que puede influir en distintas formas sobre ella, dependiendo de los efectos que el sismo haya tenido. Como pueden ser: vibración del terreno, desplazamientos de tierra, asentamientos diferenciales, así como efectos indirectos como maremotos, incendios, entre otros. La ingeniería basada en el desempeño debe tomar en cuenta todo este tipo de efectos para determinar con mayor exactitud el desempeño de una estructura en distintas circunstancias.

Los movimientos sísmicos de diseño son una serie de eventos sísmicos que se considera que pueden ocurrir y con ellos representar el desempeño deseado que tendrá una estructura.

Así como se consideraron distintos niveles de desempeño, así mismo se consideran distintos movimientos sísmicos de acuerdo al comité VISION 2000 y el ATC-40.

### 1.3.5.1.2.1 Propuesta del comité VISION 2000.

En esta propuesta el comité VISION 2000 expresa los movimientos sísmicos en base a términos de recurrencia o probabilidad de excedencia. Esto quiere decir, en términos que representen el tiempo que pasa desde que ocurren un sismo, hasta que se vuelva a repetir otro de la misma intensidad o más grande. El periodo de retorno ( $T_R$ ) o intervalo de recurrencia, se determina con la siguiente expresión:

$$T_R = \frac{t}{\ln(1 - \rho)} \quad (1.2)$$

Donde:

$T_R$  = periodo de retorno

$t$  = número de años

$\rho$  = probabilidad de excedencia

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 1.3 Movimientos sísmicos de diseño (SEAOC Vision 2000 Committee, 1995)

Fuente: Aguilar, 2001

Esta propuesta clasifica las estructuras de acuerdo a su importancia durante y después del sismo, como son: estructuras críticas que contienen materiales peligrosos que pueden significar un daño importante para un gran sector de la población, estructuras esenciales que son aquellas encargadas de las actividades

después del terremoto, como son hospitales, estaciones de bomberos, policía, etc. y por último las estructuras básicas, que son todas aquellas que no están incluidas en las clasificaciones anteriores.

<b>Movimiento sísmico de diseño</b>	<b>Nivel de desempeño de la estructura</b>			
	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. Estructuras básicas				
2. Estructuras esenciales / riesgosas				
3. Estructuras de seguridad crítica				

Tabla 1.4 Objetivos del desempeño sísmico recomendado para estructuras (SEAOC Vision 2000 Committee, 1995)

Fuente: Aguilar, 2001

<b>Movimiento sísmico de diseño</b>	<b>Nivel de desempeño mínimo</b>
Frecuente	Totalmente operacional
Ocasional	Operacional
Raro	Seguridad
Muy raro	Próximo al colapso

Tabla 1.5 Objetivos de desempeño sísmico recomendados para estructuras básicas.

Fuente: Aguilar, 2001.



#### **1.3.5.1.2.2 Propuesta ATC-40.**

Esta propuesta divide los niveles de movimiento sísmico en tres. Clasificados con las siglas S, D y M que corresponden a Servicio, Diseño y Máximo, junto con la inicial E de la palabra "Earthquake".

SE. Sismo de servicio: Se considera un sismo frecuente ya que puede aparecer más de una vez durante la vida útil de la estructura. Es un movimiento del terreno que puede ser excedido durante 50 años, con una probabilidad del 50%. O que tiene un periodo de retorno de 72 años.

DE. Sismo de diseño: es un sismo poco frecuente o raro de ocurrir, pero que toda estructura tiene la posibilidad de sufrir por lo menos una vez en su vida útil. De intensidad moderada a severa. Tiene un periodo de retorno de 475, lo que es un 10% de probabilidad de ser superado en 50 años.

ME. Sismo Máximo: este sismo sólo se utiliza en el diseño de estructuras de gran importancia. Se trata de un movimiento sísmico máximo que puede ser esperado, y tiene una probabilidad de 5% de ser superado durante 50 años, esto significa un periodo de retorno de 975 años.

Movimiento sísmico de diseño	Nivel de desempeño de la estructura			
	Operacional	Ocupación inmediata	Seguridad	Estabilidad estructural
Sismo de servicio, SE				
Sismo de diseño, DE			X	
Sismo máximo, ME				X

Tabla 1.6 Objetivos de seguridad básica para estructuras convencionales (ATC, 1996).

Fuente: Aguilar, 2001

### 1.3.5.2 Etapa numérica.

La etapa numérica del diseño por desempeño consiste en el diseño basado en la evaluación del comportamiento sísmico de acuerdo al dimensionamiento y detallado de los elementos estructurales y no estructurales de la edificación.

Para llevar a cabo la evaluación sísmica de una estructura, existen distintos tipos de análisis, como pueden ser los análisis estáticos lineales o los análisis estáticos no lineales. Para el caso del diseño por desempeño se utilizan métodos de análisis no lineal debido a que se basan en la respuesta dinámica respecto al tiempo. Este tipo de análisis puede tornarse un poco complicado, por lo que se han desarrollado métodos simplificados de análisis estático no lineal.

Algunos de los métodos más comunes de análisis estático no lineal son el método del coeficiente de desplazamiento, el método de la secante, el método del espectro capacidad-demanda, etc.

En el siguiente capítulo se describirá en qué consiste el método del espectro capacidad-demanda, mejor conocido como análisis estático no lineal o análisis “Pushover”.

### **1.3.5.3 Etapa de implementación.**

Con esta etapa se concluye el diseño por desempeño, pues consiste en realizar los procesos constructivos necesarios para pasar de un proyecto a un resultado tangible como lo es una edificación. Dentro de esta etapa de implementación también se considera el mantenimiento necesario de la estructura durante su vida útil.

Cabe mencionar que para poder obtener una estructura terminada utilizando el criterio de diseño por desempeño es necesario aplicar las tres etapas anteriormente mencionadas las cuales son:

- a) Etapa conceptual.
- b) Etapa numérica.
- c) Etapa de implementación.

## CAPÍTULO 2

### ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL

La capacidad estructural está definida por la resistencia y deformación de los elementos individuales que la forman. Para determinar esta capacidad es necesario recurrir a distintos métodos de análisis, como pueden ser métodos de análisis lineal, y métodos de análisis no lineal. En este caso se requiere utilizar métodos de análisis no lineal, puesto que, a pesar de ser más complejos, brindan una información más acertada para poder determinar las capacidades de una estructura más allá del límite elástico.

En este capítulo se definirá el concepto de análisis estático no lineal y se mencionarán algunos aspectos y pasos importantes para su realización, también se abordará la descripción de la curva de capacidad así como de la configuración de fuerzas laterales necesaria para formar esta curva, se describirán diferentes tipos de configuraciones y se explicará brevemente el proceso para trazar la curva de capacidad. Así mismo se mencionará una pequeña comparación entre la curva de capacidad y la curva de demanda.

## **2.1 Concepto de análisis estático no lineal.**

Entre los métodos simplificados de análisis no lineal, se encuentra el método del espectro capacidad-demanda, mejor conocido como análisis estático no lineal o análisis pushover, el cual permite estimar gráficamente el desempeño sísmico de una estructura utilizando el espectro de capacidad y de demanda de la misma.

De acuerdo con Aguilar (2001), el método espectro capacidad-demanda, como su nombre lo indica, consiste en identificar el desplazamiento máximo por medio de los espectros de demanda sísmica y de capacidad de la estructura. Con este desplazamiento será posible estimar la respuesta de la edificación, la cual se podrá comparar con el nivel de desempeño esperado.

El análisis pushover se lleva a cabo sometiendo la estructura a un conjunto de fuerzas laterales  $F_i$  que se van incrementando uniformemente hasta llegar a la capacidad máxima de la estructura. Así se obtendrán las fallas y agrietamientos de los elementos estructurales, los cuales definirán la curva de capacidad de la estructura.

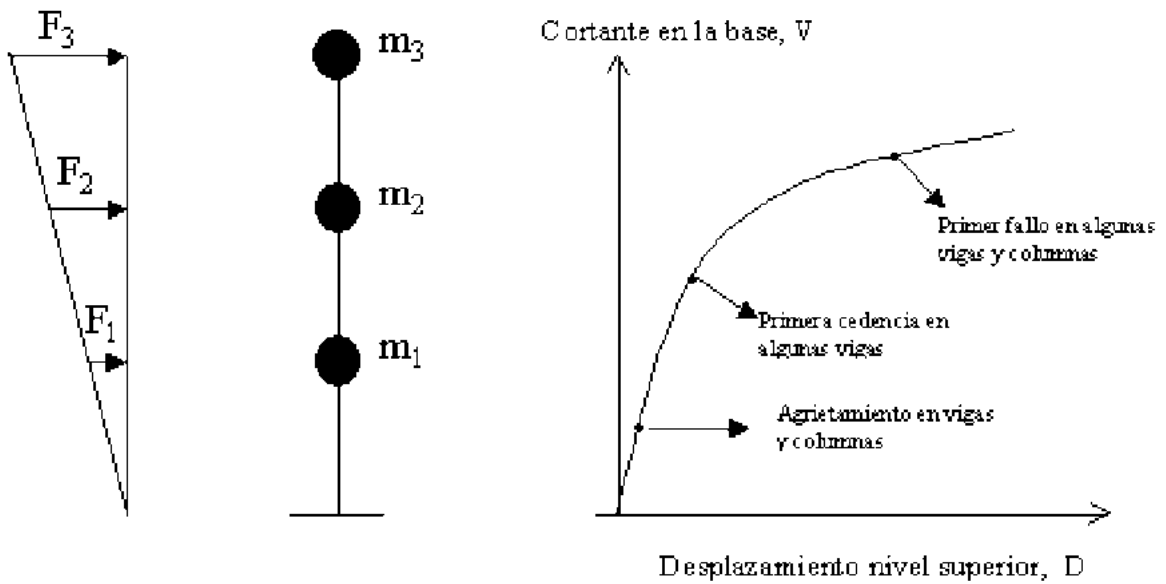


Figura 2.1: Esquema del procedimiento utilizado para el análisis pushover.

Fuente: Aguilar, 2001.

Para que el análisis estático no lineal se pueda realizar de forma directa se hace uso de algunos programas entre los cuales destacan DRAIN-2D, el IDARC-2D y el RUAUMOKO 2D.

Cuando se realiza un análisis pushover es importante tomar en cuenta algunos aspectos al momento de interpretar los resultados que este arroje. Una de las limitaciones que se debe tomar en cuenta es que el análisis pushover se basa en que el daño depende de la deformación lateral de la estructura, despreciando la energía la duración y disipación de energía acumulada; la carga sísmica vertical es ignorada y sólo se consideran las fuerzas laterales; es un análisis hecho en dos

dimensiones por lo que no considera los efectos de torsión que producen las variaciones de rigidez y resistencia.

La configuración de las fuerzas laterales aplicadas a una estructura puede variar, presentándose de forma lineal, parabólica, ascendente, constante, etc. lo cual repercute en el resultado para formar la curva de capacidad. Por lo que se recomienda realizar el análisis por lo menos con dos distribuciones de fuerzas laterales diferentes y realizar una envolvente de los resultados para obtener una curva de capacidad más acertada.

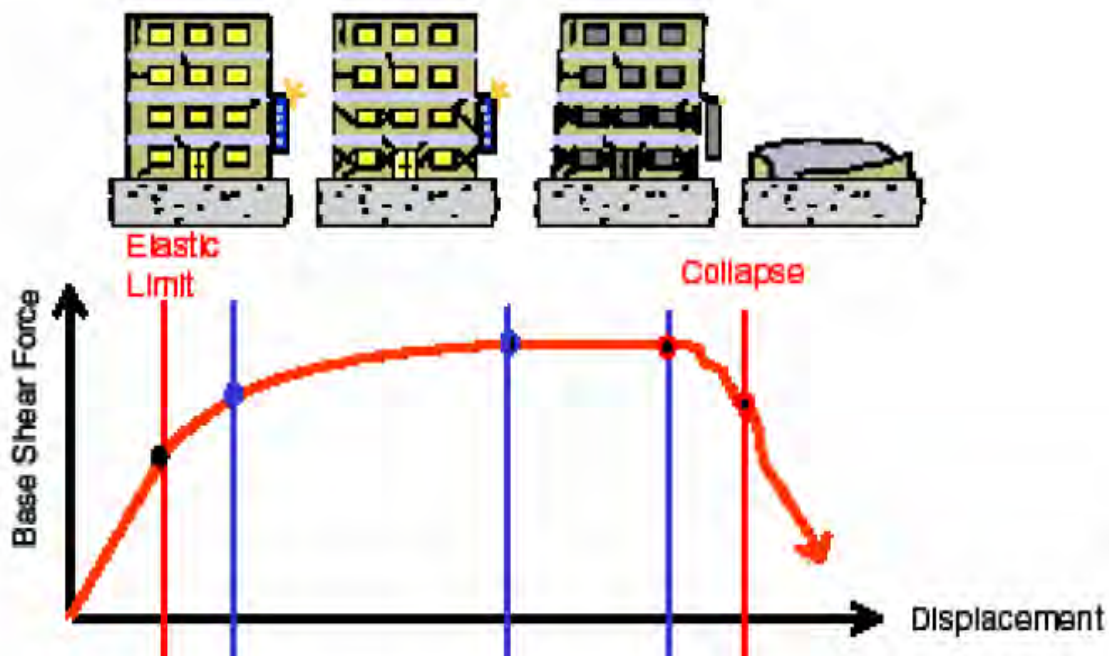


Figura 2.2: Nivel de deformación de una estructura en el análisis pushover.

Fuente: Mendoza, 2008.

La figura 2.2 que aparece anteriormente, muestra los niveles de desempeño de una estructura sometida a un análisis pushover de acuerdo a la curva de capacidad obtenida del edificio. Cuando la fuerza del cortante basal y el desplazamiento en la parte superior de la estructura no sobrepasan el límite elástico los daños en la estructura son menores y casi imperceptibles por lo que el edificio puede ser ocupado inmediatamente. Si sobrepasan el límite elástico pero la curva de capacidad sigue teniendo un incremento quiere decir que la estructura ha entrado a su estado inelástico, donde los daños no son reversibles pero pueden ser reparados, en estos casos se recomienda estudiar el edificio para realizar las reparaciones convenientes y volver a ocuparlo después. Una vez que se sobrepasa el límite elástico, los daños en la estructura pasan de ser daños reparables a ser daños severos, los cuales pueden arreglarse, pero resulta complicado o muy costoso, por lo que ya no es conveniente reparar la estructura, en estos casos el edificio queda tan dañado que ya no se considera seguro para ser ocupado, por lo que se recomienda desalojarlo antes de que ocurra un desastre. El siguiente nivel después de este estado es el colapso de la estructura. A continuación se muestra una tabla donde se especifica el nivel de desempeño requerido de acuerdo al nivel de excitación sísmica.



NIVEL DE EXITACIÓN SÍSMICA	NIVEL DE DESEMPEÑO REQUERIDO			
	Operación Permanente	Ocupación Inmediata	Seguridad de Vidas	Prevención del Colapso
Frecuente	○			
Ocasional	●	○		
Raro	□	●	○	
Muy raro		□	●	○

- Edificaciones básicas (residencias, oficinas)
- Edificaciones esenciales (hospitales, escuelas, estaciones de bomberos)
- Edificaciones de seguridad crítica (plantas hidroeléctricas, plantas nucleares)
- Edificaciones de seguridad crítica (plantas hidroeléctricas, plantas nucleares)

Tabla 2.1: Nivel de desempeño requerido.

Fuente: Mendoza, 2008.

“Existen varios criterios para definir el punto de fallo o punto de colapso de una estructura. Algunos de esos criterios consideran que el fallo en una estructura se alcanza cuando el desplazamiento lateral máximo  $D_t$  tiene un valor comprendido entre el 5 y 10% de la altura total del edificio.

Por otra parte, de acuerdo a la secuencia de formación de las articulaciones plásticas se puede establecer otros criterios de colapso: por ejemplo si las articulaciones

plásticas se forman todas en cabeza y pie de columna de un mismo piso se tiene lo que se denomina: *...mecanismo de traslación de columna...* con el colapso inevitable” (Aguilar Falconí).

## 2.2 Curva de capacidad.

La curva de capacidad es la representación gráfica del desplazamiento en la parte superior de un edificio sometido a una o varias fuerzas laterales en este caso conocidas como cortante basal. En esta curva se puede identificar el agrietamiento en elementos mecánicos, el punto de cedencia en algunas vigas y el primer fallo en algunas vigas y columnas.

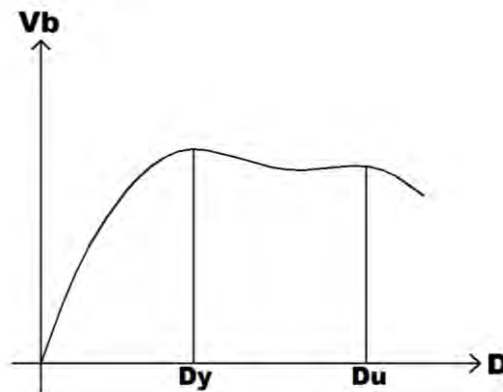


Figura 2.3: Curva de capacidad de una estructura

Fuente: Mendoza, 2008.

### **2.2.1 Configuración de fuerzas laterales.**

En el análisis estático no lineal la estructura es sometida a un conjunto de fuerzas laterales para posteriormente calcular el desplazamiento en la parte superior del edificio y tomando la magnitud de las fuerzas y del desplazamiento poder formar la curva de capacidad. Debido a que la deformación de la estructura está sujeta a las fuerzas laterales puede variar según la distribución de estas, por lo que es importante definir cuál será la forma en la que se aplicarán las fuerzas sobre la estructura siendo este un dato significativo en la variación de resultados. Las fuerzas pueden estar aplicadas de distintas maneras, posiciones y magnitudes, inclusive pueden no ser aplicadas al mismo tiempo. Resulta complicado definir la forma exacta en que se dará la distribución de las fuerzas, por lo que normalmente se recurre a idealizar la configuración de fuerzas laterales en fuerzas uniformemente repartidas o distribuidas de forma geométrica, ya sea triangular o parabólicamente.

Para el caso de los cálculos de la presente investigación fue necesario realizar el análisis estático no lineal de algunas estructuras utilizando el programa antes mencionado IDARC-2D en el que para poder realizar los cálculos necesarios según lo mencionado por Valles, Reinhorn, Li, Kunnath y Madan (1996), se debe definir la configuración de fuerzas laterales a las que se somete la estructura. Este programa permite elegir cuatro diferentes configuraciones, las cuales son:

- a) Distribución uniforme: esta configuración considera las fuerzas laterales distribuidas constantemente sobre la altura total del edificio. En cada nivel la fuerza se determina con la siguiente expresión:

$$\Delta F_i = \Delta V_b / N \quad (2.1)$$

Donde  $\Delta V_b$  es el incremento de la fuerza cortante en la base y N es el numero de niveles de la estructura.

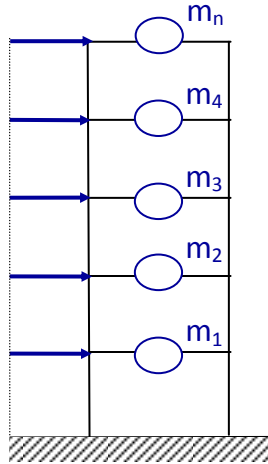


Figura 2.4: Distribución uniforme.

Fuente: Propia.

- b) Distribución triangular inversa: esta configuración consiste en distribuir linealmente las fuerzas laterales. Las fuerzas se incrementan en cada piso del edificio, el incremento es calculado de acuerdo a:

$$\Delta F_i = \frac{W_i h_i}{\sum_{i=1}^N W_i h_i} \Delta V_b \quad (2.2)$$

Donde  $W_i$  y  $h_i$  son el peso y la altura de cada nivel respectivamente, y  $\Delta V_b$  es el incremento de la fuerza cortante en la base.

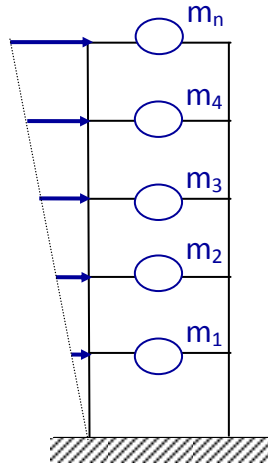


Figura 2.5: Distribución triangular.

Fuente: Propia.

c) Distribución de fuerzas generalizadas: esta configuración surgió para considerar una variación diferente de la aceleración de cada nivel con su altura. Consiste en incrementar la fuerza en cada nivel de una forma exponencial por lo que generalmente se forma una distribución de fuerzas parabólica.

$$\Delta F_i = \frac{w_i h_i^k}{\sum_{i=1}^N w_i h_i^k} \Delta V_b \quad (2.3)$$

Donde:

$k = 1.0$ , para  $T \leq 0.5$  seg

$k = 2.0$ , para  $T \geq 2.5$  seg

$k = 1 + (T - 0.5)/2$ , para cualquier otro caso

Nota-  $k = 0$  produce una variación constante de la aceleración, mientras que  $k = 1$  corresponde a una variación lineal y  $k = 2$  a una variación parabólica.

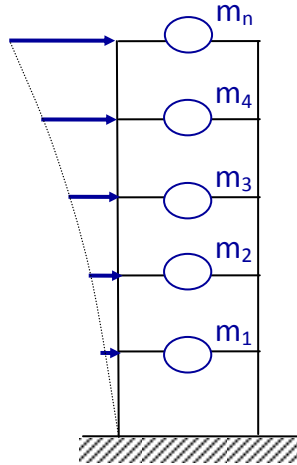


Figura 2.6: Distribución de fuerzas generalizadas (parabólica).

Fuente: Propia.

d) Distribución modal adaptada: esta distribución se caracteriza principalmente por que el incremento de las fuerzas en cada nivel no es constante.

El incremento en las fuerzas en el modo base se lleva a cabo de acuerdo a:

$$\Delta F_i = \frac{w_i \phi_{i1}}{\sum_{j=1}^N w_j \phi_{j1}} V_b - F_i^{\text{old}} \quad (2.4)$$

Donde  $\phi_{i1}$  corresponde al valor de la primera forma modal en el nivel "i",  $V_b$  es la fuerza cortante en la base de la estructura y  $F_i^{\text{old}}$  es la fuerza en el nivel "i" en el último cálculo anterior.

Sin embargo, la distribución modal adaptada puede extenderse debido a que no solo se toma en cuenta una sola forma modal, en este caso se recurre a un factor modal, donde el incremento de las fuerzas en el nivel "i" está definido por:

$$\Delta F_i = \frac{w_i \sum_{j=1}^{nm} (\phi_{ij} T_j)^2 j^{1/2}}{\sum_{i=1}^n w_i [\sum_{j=1}^{nm} (\phi_{ij} T_j)^2 j^{1/2}]} V_b - F_i^{old} \quad (2.5)$$

Donde  $\phi_{ij}$  es el valor de la forma modal "j" al nivel "i",  $T_j$  es el factor modal para el modo "j",  $V_b$  es la fuerza cortante en la base de la estructura y  $F_i^{old}$  es la fuerza en el nivel "i" en el último cálculo anterior.

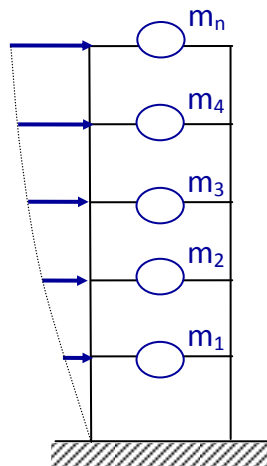


Figura 2.7: Distribución en función de las formas modales.

Fuente: Propia.

### 2.2.2 Trazo de la curva de capacidad.

Para obtener la curva de la curva de capacidad de una determinada estructura se debe aplicar un análisis estático no lineal eligiendo una cierta configuración de fuerzas laterales y posteriormente medir los desplazamientos en la azotea y la fuerza cortante en la base de la estructura. Para esto es necesario seguir el procedimiento siguiente:

Paso 1. Modelo matemático.

Realizar un esquema que represente el edificio y representar matemáticamente sus características geométricas y mecánicas.

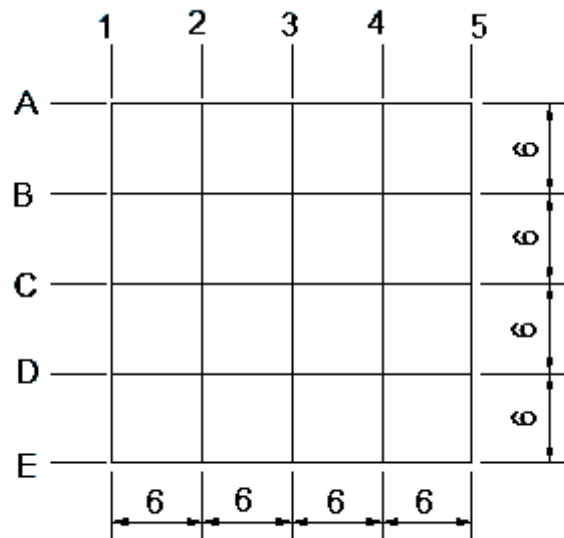


Figura2.8: Dibujo en planta del edificio.

Fuente: Propia.



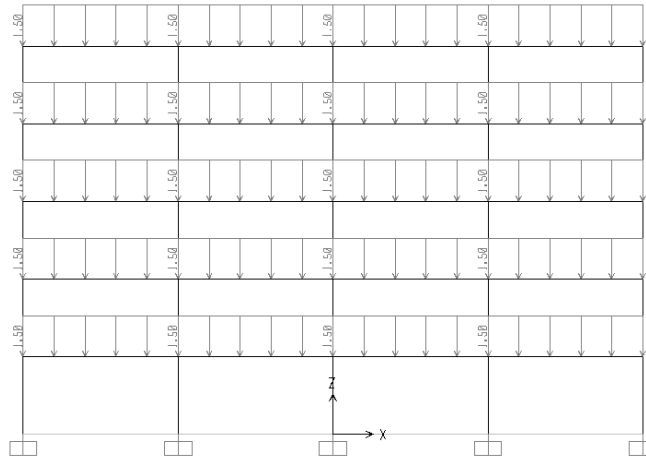


Figura 2.9: Modelo del edificio con cargas.

Fuente: Propia.

```

CONTROL DATA
5,1,1,1,0,0,0,1
ELEMENT TYPES
5,1,0,0,0,0,0,0,0
ELEMENT DATA
25,20,0,0,0,0,0,0
SYSTEM OF UNITS
2
FLOOR ELEVATIONS
3000,6000,9000,12000,15000
DESCRIPTION OF IDENTICAL FRAMES
1
PLAN CONFIGURATION
5
NODAL WEIGHTS
1,1,226.0224,226.0224,226.0224,226.0224
2,1,226.0224,226.0224,226.0224,226.0224,226.0224
3,1,226.0224,226.0224,226.0224,226.0224,226.0224
4,1,226.0224,226.0224,226.0224,226.0224,226.0224
5,1,226.0224,226.0224,226.0224,226.0224,226.0224
MATERIAL PROPERTIES
0
CONCRETE PROPERTIES SETS
1,0.024525,15.5109719,0.2,0.0024525,0.35,0.0
REINFORCEMENT PROPERTIES SETS
1,0.412,0.5768,206.01,3.4335,12
HYSTERETIC MODELING RULES (SETS)
1
1,1,200,0.01,0.01,1,1
COLUMN PROPERTIES
0
COLUMN DIMENSIONS
1
1,1,1,1130.122,3000,0,0
1,400,400,50,594,7.94,200,1
1,400,400,50,594,7.94,200,1
1

```

Figura 3: Representación matemática del edificio.

Fuente: Propia.

Paso 2. Selección de la configuración de fuerzas laterales.

Elegir la distribución de fuerzas laterales que se aplicarán sobre la estructura, la magnitud de dichas fuerzas y los incrementos de carga para cada paso del análisis.

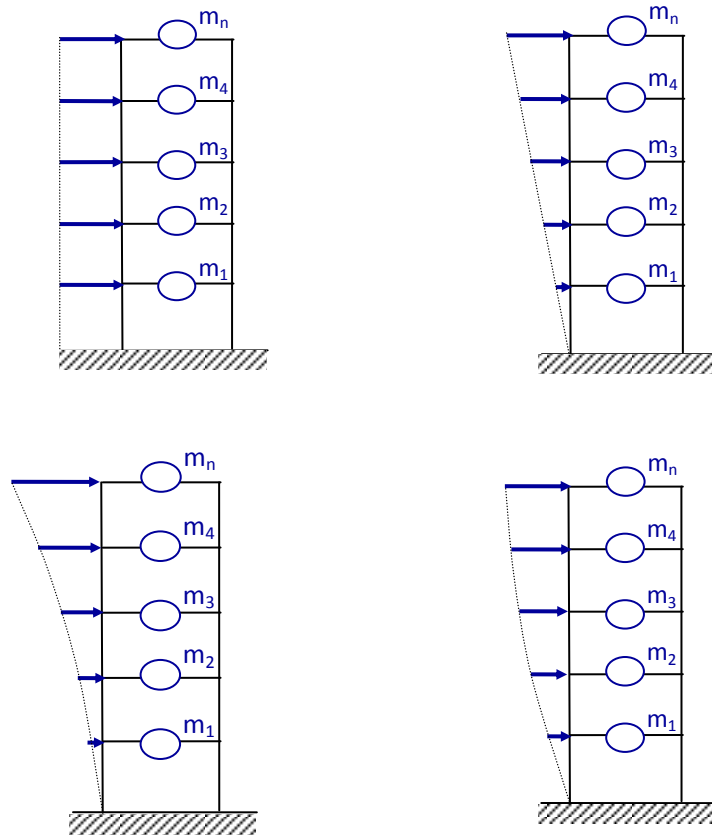


Figura 3.1: Distribución de fuerzas laterales.

Fuente: Propia.

### Paso 3. Análisis estático no lineal.

Con apoyo de un software para análisis estructural, realizar el análisis estático no lineal de la estructura, obteniendo el desplazamiento en azotea y el cortante en la base para cada paso en el análisis.

### Paso 4. Graficar los datos obtenidos en el análisis estático no lineal.

Con los datos numéricos obtenidos en el análisis estático no lineal, construir una gráfica donde en el eje de las abscisas se coloquen los desplazamientos en azotea y en el eje de las ordenadas se represente la fuerza cortante en la base de la estructura. Dicha gráfica representa la curva de capacidad de la estructura.

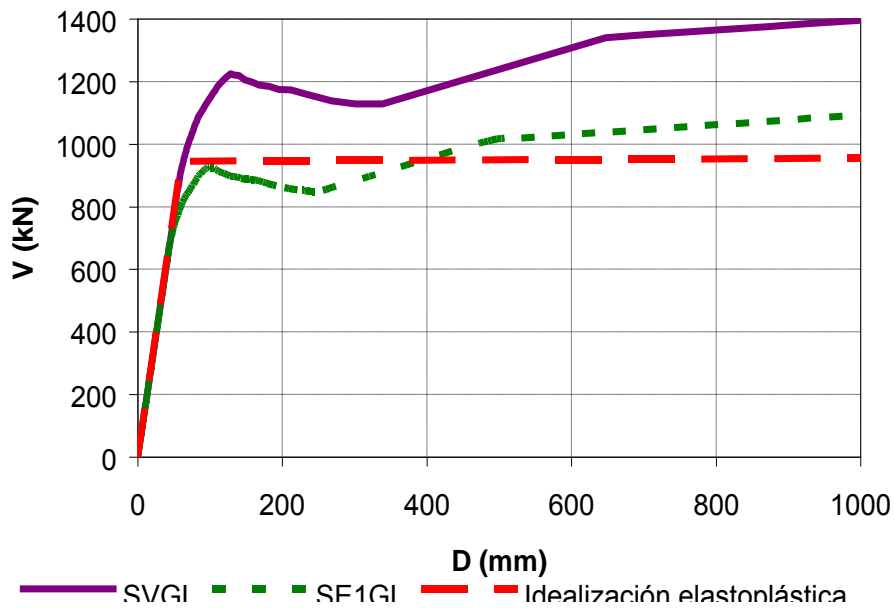


Figura 3.2: Gráfica de los datos que forman la curva de capacidad.

Fuente: Propia.

#### Paso 5. Representación bilineal de la curva de capacidad.

Con la finalidad de simplificar los resultados de la curva de capacidad y obtener datos más generales en cuanto a la pendiente de los puntos en esta curva, se propone una representación bilineal de esta curva.

Para obtener la representación bilineal de la curva de capacidad, la FEMA (Federal Emergency Management Agency) propuso un procedimiento que ha sido muy utilizado, el cual se resume en los siguientes pasos:

1. Determinar el valor del desplazamiento último ( $D_u$ ) y el valor de la fuerza cortante en la base ( $V_u$ ) que puede alcanzar una estructura antes de iniciar su colapso. Con estos valores se podrá delimitar el punto B de la Figura 2.8.
2. Utilizando algún método de integración, calcular el área bajo la curva de capacidad ( $A_{curva}$ ).
3. Evaluación del cortante basar de cedencia  $V_y^i$ . Este valor se utiliza al principio de un proceso, por lo cual requiere ser supuesto en un inicio y redefinirlo por medio de iteraciones. El proceso consiste en igualar el área bajo curva de capacidad obtenida ( $A_{curva}$ ) y la curva bilineal idealizada ( $A_{bilineal}$ ).
4. Cálculo de la pendiente inicial  $K_e^i$  de la curva bilineal. Esta corresponde a una línea recta que une el origen 0 y el punto sobre la curva de capacidad que tenga un cortante basal igual a  $0.6V_y^i$ .

- Utilizando los datos del análisis pushover, se determina el desplazamiento  $D_{0.6}^i$  correspondiente al cortante basal  $0.6V_y^i$ .

- La pendiente  $K_e^i$  representa la rigidez lateral efectiva de la estructura.

La cual es calculada con la siguiente expresión:

$$K_e^i = 0.6V_y^i / D_{0.6}^i \quad (2.6)$$

5. Cálculo del desplazamiento de cedencia  $D_y^i$ , para el que se utiliza la siguiente expresión:

$$D_y^i = V_y^i / K_e^i \quad (2.7)$$

6. Se define la curva bilineal por medio de las rectas OA y AB.

7. Se calcula el factor reductor ( $\alpha$ ) de la rigidez de la estructura después de la cedencia, utilizando la siguiente expresión:

$$\alpha^i = \frac{\frac{V_u}{V_y^i} - 1}{\frac{D_u}{D_y^i} - 1} \quad (2.8)$$

8. Calcular el área bajo la curva bilineal OAB,  $A_{bilineal}$ .

9. Determinar el error en la representación bilineal:

$$\varepsilon = \frac{A_{curva} - A_{bilineal}}{A_{curva}} * 100 \quad (2.9)$$

Si este error sobrepasa el nivel de tolerancia establecido, será necesario continuar el proceso con iteraciones:

- El cortante basal de cedencia tendrá un nuevo valor, el cual se podrá calcular con la siguiente ecuación:

$$V_y^{i+1} = V_y^i * \frac{A_{curva}}{A_{bilineal}} \quad (3)$$

- Repetir los pasos 4 a 8 con el nuevo valor  $V_y^{i+1}$

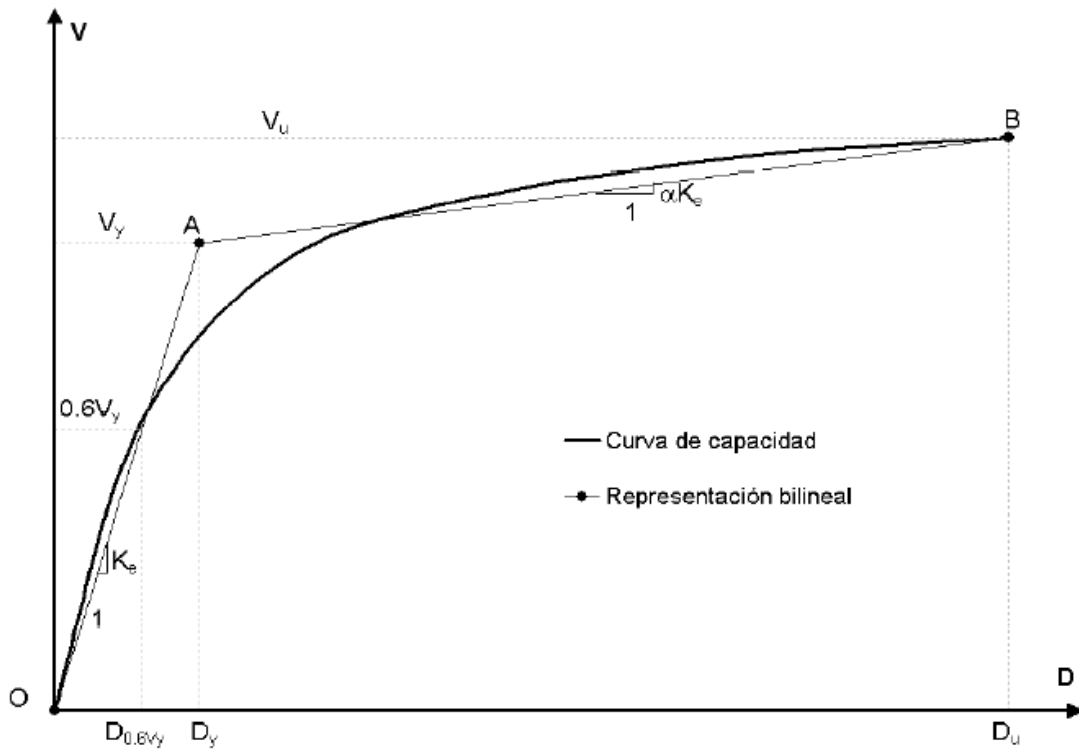


Figura 3.2: Representación bilineal de la curva de capacidad. Procedimiento empleado en FEMA-273.

Fuente: Aguilar, 2001

### 2.3 Curva de demanda.

Según lo mencionado por Aguilar (2001) la curva de demanda o espectro de demanda se utiliza para representar gráficamente la demanda sísmica a la que está sometida una estructura, por lo general esta se traduce a lo que se conoce como un espectro de respuesta elástico. Este espectro consiste en graficar en el eje de las ordenadas la aceleración espectral y en el eje de las abscisas el desplazamiento espectral.

El formato más común para presentar un espectro de respuesta para propósitos de diseño por desempeño sísmico, es el formato AD ( $S_a$  vs  $S_d$ ), debido a

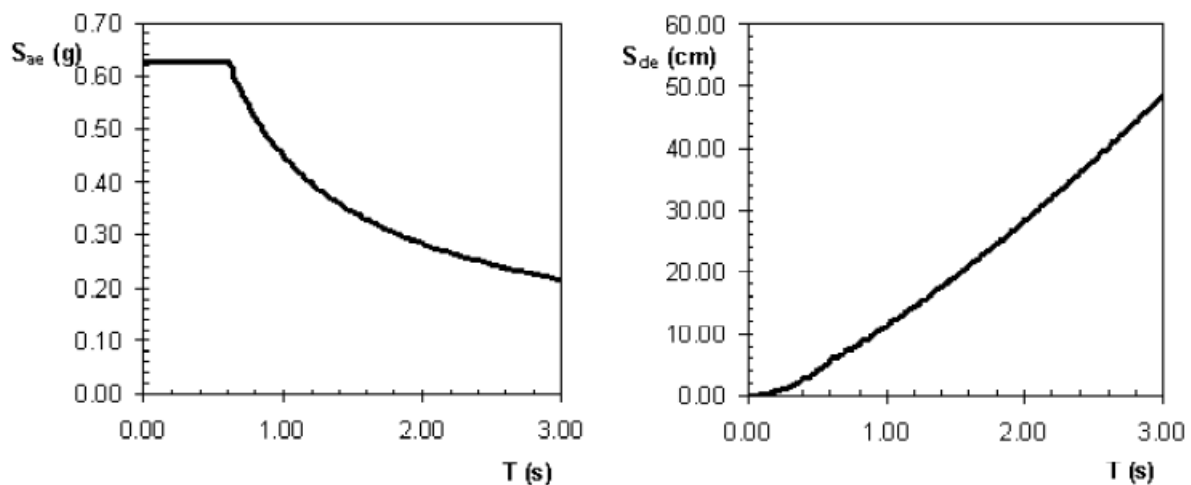
su principal ventaja que es poder graficar simultáneamente el espectro de capacidad y el espectro de demanda para así obtener una solución gráfica para el nivel de desempeño de una estructura.

Para formar una curva de demanda sísmica en el formato AD se debe seguir el siguiente procedimiento:

- Calcular el espectro elástico de aceleraciones  $S_{ae}$
- Calcular el espectro elástico de desplazamientos  $S_{de}$ , utilizando la siguiente expresión:

$$S_{de} = \frac{T^2}{4\pi^2} S_{ae} \quad (3.1)$$

- Construcción del espectro Aceleración-Desplazamiento AD ( $S_a$  vs  $S_d$ ).



F

figura 3.3: Espectros elásticos de aceleración y desplazamiento.

Fuente: Aguilar, 2001.

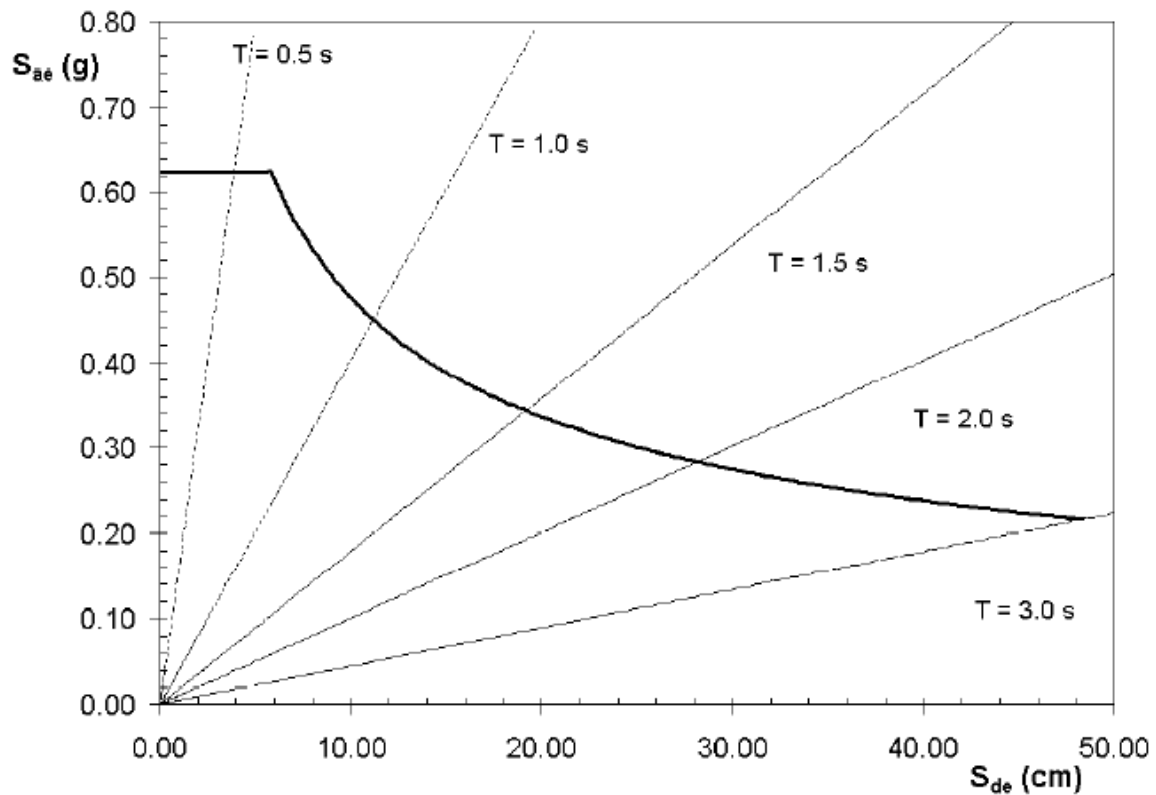


Figura 3.4: Espectro elástico de respuesta en formato AD.

Fuente: Aguilar, 2001.

## 2.4 Curva de capacidad vs. Curva de demanda.

Al terminar el análisis estático no lineal la mejor forma de apreciar los resultados es comparando el espectro de demanda con el espectro de capacidad, para lo que se sugiere sobreponerlos en los mismos ejes de coordenadas. La finalidad de hacer esto es para poder apreciar de una mejor manera cual fue la respuesta de la estructura en cuanto a desplazamientos en azotea y cortante en la



base de acuerdo a las fuerzas aplicadas y así observar con la curva de demanda la carga lateral a la que en realidad estará sometida la estructura.

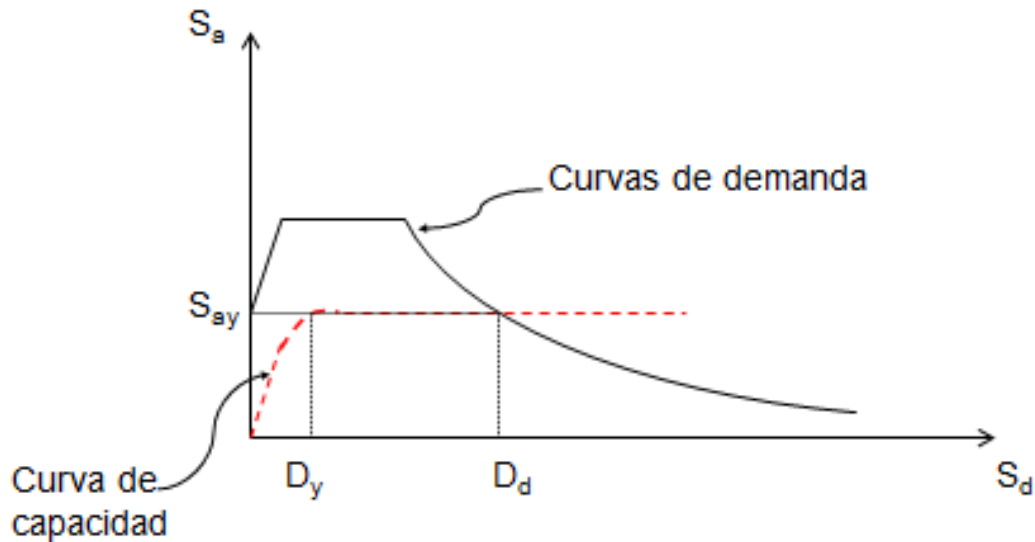


Figura 3.5: Curva de capacidad y de demanda.

Fuente: Mendoza, 2008.

La curva de demanda representa las fuerzas que se van a aplicar en la estructura y la curva de capacidad muestra el comportamiento que tendrá la estructura por lo que el punto donde se cruzan estas dos curvas indica la fuerza a la que va a estar sometida la estructura y el desplazamiento que se espera que se presente en la azotea de la estructura. En base a este desplazamiento y a la figura 2.2 se puede estimar el nivel de desempeño de la edificación para un sismo determinado.

De acuerdo a este nivel de desempeño se puede observar si el comportamiento de la estructura será satisfactorio o no, y de acuerdo a esto proponer nuevas dimensiones para obtener un comportamiento más adecuado a la demanda que estará sometida la edificación.

## CAPÍTULO 3

### IMPORTANCIA DE LAS NUEVAS FILOSOFÍAS DE DISEÑO

Este capítulo aborda el tema de los sismos en México y en el mundo y cuáles son sus efectos sobre las estructuras, así como también da una referencia de donde se pueden ubicar los resultados de la presente investigación.

#### 3.1 Sismos en el mundo.

La tierra es un planeta que en su interior está compuesto por varias capas, las cuales se caracterizan por los materiales que la componen y la temperatura a la que están elevados estos materiales.



Figura 3.1: Capas de la tierra.

Fuente: [www.google.com](http://www.google.com)

Según lo mencionado en la página de internet [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org), la capa más profunda, es decir, el centro de la tierra se le conoce como núcleo y se divide en núcleo interno y núcleo externo el cual está compuesto principalmente de Níquel (Ni) y Hierro (Fe). La siguiente capa es el manto, el cual se divide en manto interior y manto exterior, esta capa contiene materiales en estado sólido y materiales en estado plástico y viscoso. La última capa es la corteza terrestre, es la capa exterior de la tierra y está formada en varios segmentos conocidos como placas tectónicas, las cuales debido a las altas temperaturas que se tienen en el manto y a la diferencia de temperatura que se tiene con la siguiente capa que es la corteza terrestre el material viscoso está en continuo movimiento y se forman corrientes internas las cuales provocan movimientos en las placas tectónicas, estos movimientos originan el desplazamiento de las placas surgiendo así roces entre ellas y ligeros choques los cuales son el origen de los sismos.

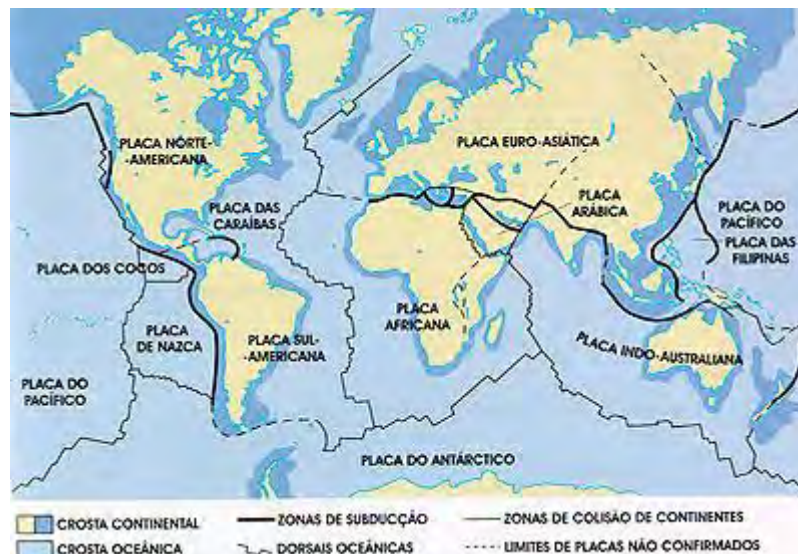


Figura 3.2: Placas tectónicas.

Fuente: [www.monografias.com](http://www.monografias.com)

A nivel mundial se registran miles de sismos constantemente, algunos son imperceptibles pero otros son de mayor magnitud los cuales llegan a causar daños sobre las estructuras. De acuerdo al acomodo de las placas tectónicas existen zonas en el mundo donde estas se encuentran más activas y es donde se registran más sismos, a esta zona se le llama cinturón de fuego y México forma parte de él, específicamente toda la costa del Pacífico, presentándose algunas fallas en el norte del país, como por ejemplo la falla de San Andrés.

### **3.2 Sismos en México.**

De acuerdo con información publicada por el Servicio Sismológico Nacional (<http://www.ssn.unam.mx>), la República Mexicana se divide en cuatro zonas sísmicas. “Estas zonas son un reflejo de que tan frecuentes son los sismos en las diversas regiones y la máxima aceleración del suelo a esperar durante un siglo. La zona A es una zona donde no se tienen registros históricos de sismos, no se han reportado sismos en los últimos 80 años y no se esperan aceleraciones del suelo mayores a un 10% de la aceleración de la gravedad a causa de temblores. La zona D es una zona donde se han reportado grandes sismos históricos, donde la ocurrencia de sismos es muy frecuente y las aceleraciones del suelo pueden sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad. Las otras dos zonas (B y C) son zonas intermedias, donde se registran sismos no tan frecuentemente o son zonas afectadas por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración

del suelo. Aunque la Ciudad de México se encuentra ubicada en la zona B, debido a las condiciones del subsuelo del valle de México, pueden esperarse altas aceleraciones.” (<http://www.ssn.unam.mx/>).



Figura 3.3 Regiones sísmicas en México.

Fuente: <http://www.ssn.unam.mx/>.

### 3.3 Efectos de los sismos en las estructuras.

Los sismos se presentan a partir de la liberación de toda la energía acumulada por el choque de las placas tectónicas, transmitiendo esta energía por medio de ondas sísmicas las cuales llegan como un movimiento en la base de los edificios el cual les ha causado distintos daños.

Los principales daños en estructuras que pasan por un sismo de baja intensidad se presentan por medio de agrietamientos ligeros, mientras más grande es la fuerza a la que se somete la estructura más grandes son los daños que esta presenta, tomando en cuenta también los materiales con los que está construida y su proceso de construcción. Estos daños comienzan en pequeñas grietas y pueden continuar hasta llegar a la falla de algún elemento estructural o en su caso al colapso de la estructura.



Figura 3.4 Daños en estructura.

Fuente: [www.obraenlinea.com](http://www.obraenlinea.com)

### **3.4 Deficiencias en los métodos de diseño actuales.**

Los daños sobre las estructuras ocasionados por efecto de los sismos prueban que los métodos con los que han sido calculados estos edificios no son adecuados y muchos de estos métodos son los que todavía aparecen en los reglamentos de construcción de algunos países. En la última década se han comenzado estudios a nivel mundial para cambiar las filosofías de diseño y establecer métodos más eficientes que proporcionen como resultado estructuras más resistentes a los movimientos sísmicos.

### **3.5 Implementación de nuevas filosofías de diseño.**

Uno de los principales errores en los métodos de diseño utilizados comúnmente es que al hacer el cálculo, el ingeniero toma las fuerzas a las que se somete la estructura como si fueran fuerzas estáticas y que el comportamiento de los materiales es elástico y lineal, cuando la realidad es que las estructuras están sometidas a fuerzas dinámicas y el comportamiento del material es un comportamiento no lineal, por lo que uno de los principales cambios en las filosofías de diseño es la necesidad de hacer un análisis no lineal de las estructuras. Sin embargo, hacer un análisis dinámico no lineal es un proceso complicado y prácticamente imposible realizarlo a mano, requiere de un software especializado que no ha sido desarrollado por la tecnología de muchos países y no es muy accesible para la mayoría de los ingenieros, por lo que se ha desarrollado alternativas como el análisis estático no lineal, a partir del cual se puede obtener una



curva que describa el comportamiento de la estructura como es la curva de capacidad. En países más desarrollados como Nueva Zelanda, Japón, Chile y algunos otros ya han cambiado sus reglamentos de diseño, obligando a utilizar estos nuevos métodos. Sin embargo, en países no tan desarrollados como lo es México este cambio no se ha podido dar por la falta de estudios que permitan respaldar una cierta metodología a utilizar. Una parte de los estudios que faltan es la observación del comportamiento de la curva de capacidad de una estructura de acuerdo a la configuración de fuerzas laterales a la que esté sometida, lo cual se pretende observar por medio de esta investigación.

## CAPÍTULO 4

### METODOLOGÍA

Dentro de este capítulo se abordará el enfoque metodológico que se empleó durante la presente investigación, la cual es consiste en el método científico y matemático, siendo esta de carácter cuantitativo.

#### **4.1 Método empleado.**

De acuerdo con Mendieta (2005), el método científico se basa en la percepción clara y precisa de un fenómeno, la cual exige orden y exactitud. Posteriormente se deben escribir y revisar varias veces las observaciones realizadas. Se crean hipótesis dentro del campo de las posibilidades las cuales podrán comprobarse o descartarse al avanzar la investigación.

“El método científico se funda estrictamente en las técnicas experimentales, las operaciones lógicas y la imaginación racional, para servir como instrumentos de la adquisición del conocimiento científico. En todo caso, el método se desarrolla en la práctica y se afina en contacto directo con la realidad”, (Mendieta, 2005:38).

El método científico puede partir de lo general a lo particular o de lo particular a lo general, es por eso que puede llamarse deductivo o inductivo.

En este caso se utiliza el método deductivo, llevándonos al método matemático el cual indica el origen del objeto, reduce todo lo existente en el mundo a

un sistema numérico y formulas matemáticas que son capaces de expresar medidas y relaciones.

Para realizar la presente investigación se utilizó el método científico y matemático, ya que se tuvo que recurrir a la observación exacta de un fenómeno y así mismo se utilizaron modelos matemáticos que lo representaban y por medio de operaciones se predijo cual sería su comportamiento.

#### **4.2 Enfoque de la investigación.**

El método utilizado en esta investigación, a su vez es cuantitativo pues se relaciona con números, hipótesis, comparativas entre los procesos, resultados y distintas comprobaciones para poder afirmar o negar algo. También implica cambios graduales, o efectos relacionados con el tiempo o periodo y la consideración de algunos factores que pueden variar.

Según lo mencionado por Hernández y Colaboradores (2008), el enfoque cuantitativo se encarga de la recopilación de datos utilizando el análisis estadístico y la medición numérica para demostrar las distintas hipótesis que se tengan, obteniendo como resultado patrones de comportamiento.

##### **4.2.1 Alcance de la investigación.**

El alcance correlacional detalla relaciones entre dos o más categorías, variables o conceptos, en un instante definido. Algunas veces, solo en términos correlacionales y otras de acuerdo a la relación causa y efecto.

El alcance de esta investigación se describe como correlacional, pues dentro de esta se llevará a cabo una comparativa de distintas gráficas que se obtendrán debido a la variación de algunos valores que influyen directamente en los resultados.

#### **4.3 Diseño de la investigación.**

Una investigación se puede clasificar de dos formas: experimental y no experimental.

De acuerdo con Hernández y Colaboradores (2008), una investigación no experimental es aquella que se basa en la observación de algún fenómeno en su ambiente natural, sin afectar ninguna de las condiciones al momento de analizarlo. Y una investigación experimental es aquella en la que se manipulan las variables intencionalmente para observar los diferentes resultados al momento de analizar el fenómeno. Para efectos de análisis existen dos variables diferentes, la variable dependiente y la independiente, la primera es la que no se modifica y es la que se utiliza como referencia para medir los efectos de la variable independiente, que es la variable que se manipula para ver los distintos efectos que esta puede tener.

El diseño de esta investigación es experimental debido a que se requirió la manipulación de distintos valores como fue la configuración de fuerzas laterales para poder apreciar las diferentes respuestas en la estructura y las distintas curvas de capacidad de la misma estructura.

#### **4.4 Instrumentos de recopilación de datos.**

Para la elaboración de la parte teórica esta investigación se recurrió a fuentes de origen documental, como fueron libros y artículos existentes. Para la otra parte se utilizaron programas de cómputo o software como Excel, SAP, IDARC 5.0 y AutoCAD. Excel es una hoja de cálculo que se utilizó para archivar los resultados obtenidos del análisis, así mismo graficarlos y obtener las curvas necesarias para realizar la comparación entre ellas. El SAP es un software de análisis y diseño estructural, el cual se utilizó para analizar los edificios propuestos. Para dibujar los planos necesarios y detalles de construcción de los edificios propuestos se utilizó el software de dibujo AutoCAD. Y finalmente se utilizó el programa de cálculo IDARC que se especializa en analizar estructuras con el método estático no lineal, el cual arroja como resultados los valores para formar la curva de capacidad de una estructura.

#### **4.5 Descripción del proceso de investigación.**

Esta investigación comenzó con la elección del modelo de estructura y las distintas alturas de este modelo que se sometería al análisis estático no lineal. Se eligió un modelo simétrico que varía solo en altura, este tuvo que ser transformado de modelo gráfico a modelo matemático (archivo numérico), para poder introducirlo al software IDARC y realizar el análisis estático no lineal. Una vez analizado el modelo con cada altura y con las diferentes configuraciones de fuerzas laterales se obtuvieron las curvas de capacidad para cada caso.

Estas curvas son la base de la investigación, una vez obtenidas se compararon todas las curvas de cada edificio con las diferentes fuerzas laterales y así se pudo observar cual fue el comportamiento de cada uno de acuerdo a cada configuración. Para así definir cuál es la distribución de fuerzas más favorable y desfavorable en cada caso.

## CAPÍTULO 5

### ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se describirán el proceso que se siguió para la obtención de la curva de capacidad, así como los resultados obtenidos y la comparación entre algunas de las curvas obtenidas.

#### **5.1 Selección de los modelos estructurales.**

Para comenzar los cálculos se requirió tener algunas propuestas sobre los modelos que se iban a trabajar, así que se decidió tomar varios edificios imaginarios de las mismas características en cuanto a dimensiones y distribución del terreno, con la variante del en número de niveles que lo conforman. Por lo que el modelo elegido fue un edificio de 24 m de ancho por 24 m de largo, cada lado dividido en ejes separados a 6 m cada uno, con lo que resulta 5 columnas en cada lado. Partiendo el primer modelo de 2 niveles, el segundo de 3 niveles, el tercero de 5 niveles, el cuarto de 10 niveles, el quinto de 15 niveles y el último modelo de 20 niveles. Las dimensiones de las columnas fueron las siguientes: para los modelos de 2, 3 y 5 niveles se tomaron columnas de 40 cm x 40 cm; para el modelo de 10 niveles se tomaron columnas de 60cm x 60 cm para los niveles del 1 al 5 y columnas de 50 cm x 50 cm para los niveles del 6 al 10; para el modelo de 15 niveles se consideraron columnas de 90 cm x 90 cm para los niveles del 1 al 5, de 70 cm x 70 cm para los niveles del 6 al 10 y columnas de 50 cm x 50 cm para los niveles del 11 al 15; así mismo, las dimensiones para el modelo de 20 niveles fueron iguales a las del modelo de 15 niveles, agregando columnas de 40 cm x 40 cm para los niveles del 16 al 20.

### 5.1.1 Análisis elástico lineal de los modelos.

Como primer paso se modelaron las diferentes estructuras propuestas en el software SAP2000, con la finalidad de realizar el análisis elástico lineal y obtener los elementos mecánicos de diseño ante cargas gravitacionales.

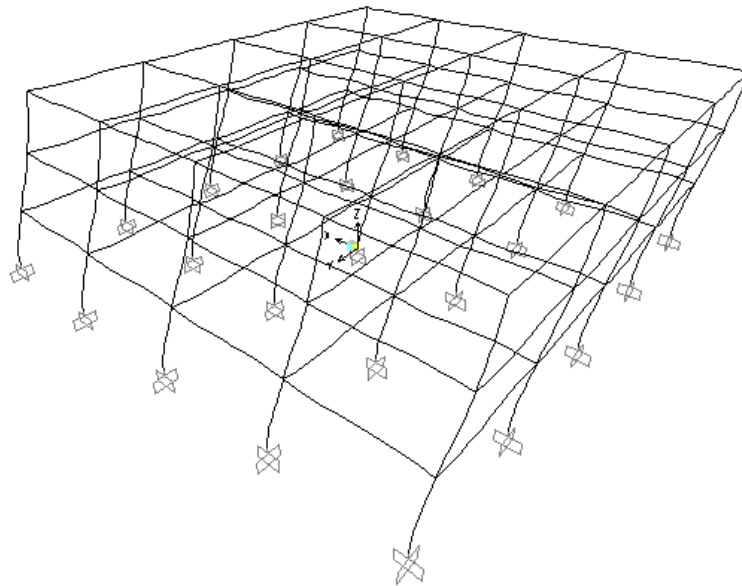


Figura 5.1: Estructura modelada en el SAP2000.

Fuente: Propia.

El tipo de concreto a utilizar en los modelos propuestos fue de un  $f'c$  de 250  $\text{kg/cm}^2$ , el cual tiene un módulo de elasticidad de 158113  $\text{kg/cm}^2$ , el acero de refuerzo que se propuso utilizar es de grado 42 y tiene un  $f_y$  de 4200  $\text{kg/cm}^2$ .



### 5.1.2 Diseño estructural de los modelos.

Con los resultados del análisis elástico se procedió a diseñar cada una de las trabes y las columnas con la ayuda del programa SAP2000, las cuales resultaron con las siguientes características en cuanto al acero de refuerzo:

Nivel	Columnas	Trabes	
		Inferior	Superior
1-3	5.94 cm <sup>2</sup>	2.85 cm <sup>2</sup>	5.94 cm <sup>2</sup>

Tabla 5.1: Modelo 3 niveles.

Fuente: Propia.

Nivel	Columnas	Trabes	
		Inferior	Superior
1-5	5.94 cm <sup>2</sup>	2.85 cm <sup>2</sup>	5.94 cm <sup>2</sup>

Tabla 5.2: Modelo 5 niveles.

Fuente: Propia.

Nivel	Columnas	Trabes	
		Inferior	Superior
1-5	15.2 cm <sup>2</sup>	2.85 cm <sup>2</sup>	5.94 cm <sup>2</sup>
6-10	11.4 cm <sup>2</sup>	2.85 cm <sup>2</sup>	5.94 cm <sup>2</sup>

Tabla 5.3: Modelo 10 niveles.

Fuente: Propia.

Nivel	Columnas	Trabes	
		Inferior	Superior
1-5	34.2 cm <sup>2</sup>	2.85 cm <sup>2</sup>	5.94 cm <sup>2</sup>
6-10	20.9 cm <sup>2</sup>	2.85 cm <sup>2</sup>	5.94 cm <sup>2</sup>
11-15	15.8 cm <sup>2</sup>	2.85 cm <sup>2</sup>	5.94 cm <sup>2</sup>

Tabla 5.4: Modelo 15 niveles.

Fuente: Propia.

Nivel	Columnas	Trabes	
		Inferior	Superior
1-5	34.2 cm <sup>2</sup>	6.5 cm <sup>2</sup>	3.8 cm <sup>2</sup>
6-10	20.9 cm <sup>2</sup>	6.5 cm <sup>2</sup>	3.8 cm <sup>2</sup>
11-15	15.8 cm <sup>2</sup>	6.5 cm <sup>2</sup>	3.8 cm <sup>2</sup>
16-20	10.1 cm <sup>2</sup>	6.5 cm <sup>2</sup>	3.8 cm <sup>2</sup>

Tabla 5.5: Modelo 20 niveles.

Fuente: Propia.

### 5.1.3 Selección de la configuración de fuerzas laterales para el análisis estático no lineal.

Como lo que se pretende en este trabajo es mostrar la comparación del comportamiento de una estructura frente a las diferentes configuraciones de fuerzas laterales a las que puede estar sometida, se eligieron cuatro de las distribuciones más comunes, las cuales fueron mencionadas anteriormente. Distribución uniforme, lineal o triangular y parabólica.

## 5.2 Análisis estático no lineal de los modelos estructurales.

Para realizar el análisis estático no lineal de las estructuras se utilizó el programa de computadora IDARC2D versión 5.5, el cual requiere modelar matemáticamente los edificios para poder analizarlos.

El modelo matemático requerido para estos casos se realizó conforme a los siguientes pasos y tomando en cuenta la siguiente información:

- Información general del edificio: número de niveles, número de marcos, número de tipos de concreto diferentes, número de propiedades diferentes

de acero de refuerzo, número de propiedades diferentes de mampostería, etc.

- Tipos de elementos estructurales: número de tipos de columnas, número de tipos de trabes, número de tipos de muros diferentes, número de tipos de apoyos distintos, etc.
- Información de elementos: número de columnas, número de trabes, número de muros, número de momentos, etc.
- Sistema de unidades: pulgadas y kips o mm y kN.
- Elevación de cada nivel.
- Descripción de marcos iguales.
- Configuración: número de ejes.
- Cargas nodales.
- Propiedades del material.
- Propiedades del acero de refuerzo.
- Modelos histeréticos.
- Propiedades de las columnas.
- Dimensiones de las columnas.
- Propiedades de las trabes.
- Dimensiones de las trabes.
- Tipo de análisis deseado.
- Cargas estáticas.
- Características del análisis estático no lineal.
- Configuración de fuerzas laterales.
- Resultados que se desea imprimir.

### 5.3 Obtención de la curva de capacidad de los modelos estructurales.

Una vez creado el modelo matemático de cada estructura se comienza el análisis con ayuda del programa IDARC2D 5.5 el cual se corre y arroja como respuesta un archivo de texto con los datos del modelo del edificio y los resultados del análisis estático no lineal. Dentro de estos resultados se encuentran relaciones numéricas del cortante basal y desplazamiento en la azotea, las cuales se grafican para poder obtener la curva de capacidad del edificio.

Por ejemplo en el caso del edificio de tres niveles para la configuración lineal de fuerzas laterales se tomaron los siguientes valores:

<b>D/H</b>	<b><math>V_b/W</math></b>
0.0512	0.0016
0.0669	0.0032
0.0929	0.0048
0.1255	0.0064
0.1837	0.008
0.2336	0.0096
0.2835	0.0112
0.3334	0.0128
0.3833	0.0144
0.4331	0.016
0.483	0.0176
0.5329	0.0192
0.5828	0.0208
0.6327	0.0224
0.6826	0.024
0.7325	0.0256
0.7824	0.0272
0.8323	0.0288
0.8822	0.0304
0.9321	0.032

0.982	0.0336
1.0319	0.0352
1.0818	0.0368
1.1317	0.0382
1.1921	0.0393
1.3033	0.0383
1.4111	0.0367
1.7478	0.0361
3.9237	0.0464
4.6565	0.048
5.3847	0.0496
6.1131	0.0512
6.8415	0.0528
7.5699	0.0544
8.2984	0.056
9.0278	0.0576
9.7584	0.0592
10.4895	0.0608
11.2699	0.0624
33.6043	0.0639

Tabla 5.6 Valores para graficar la curva de capacidad del edificio de tres niveles sometido a la configuración lineal de fuerzas laterales.

Fuente: Propia.

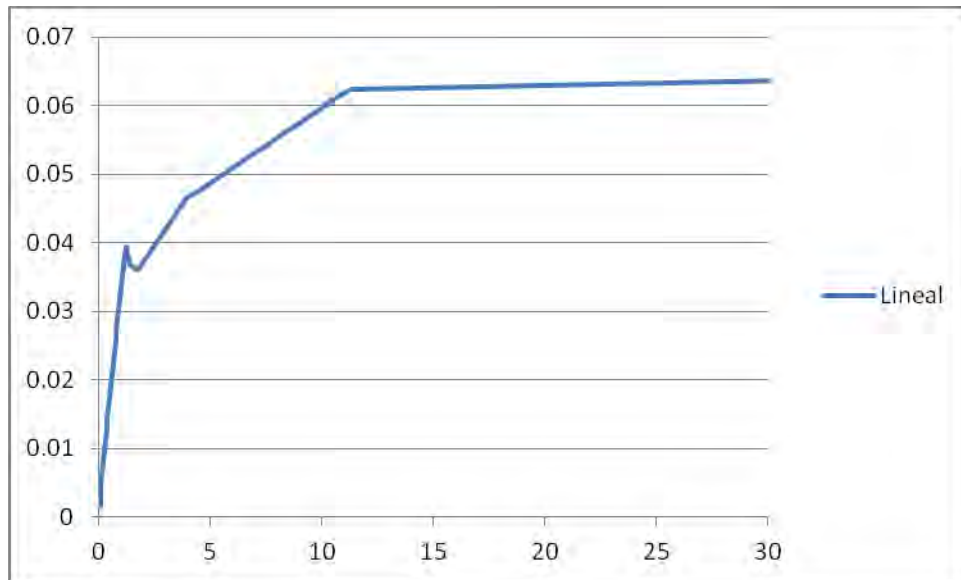


Figura 5.2 Curva de capacidad para la configuración lineal de fuerzas laterales del edificio de tres niveles.

Fuente: Propia.

#### 5.4 Análisis e interpretación de resultados.

Una vez realizado el análisis estático no lineal de todos los modelos matemáticos del edificio de tres niveles se extrajeron los datos necesarios del archivo de resultados para poder formar las curvas de capacidad, las cuales se graficaron sobre los mismos ejes para poder apreciar la variación de la curva de acuerdo a cada configuración de fuerzas laterales y se muestran a continuación:

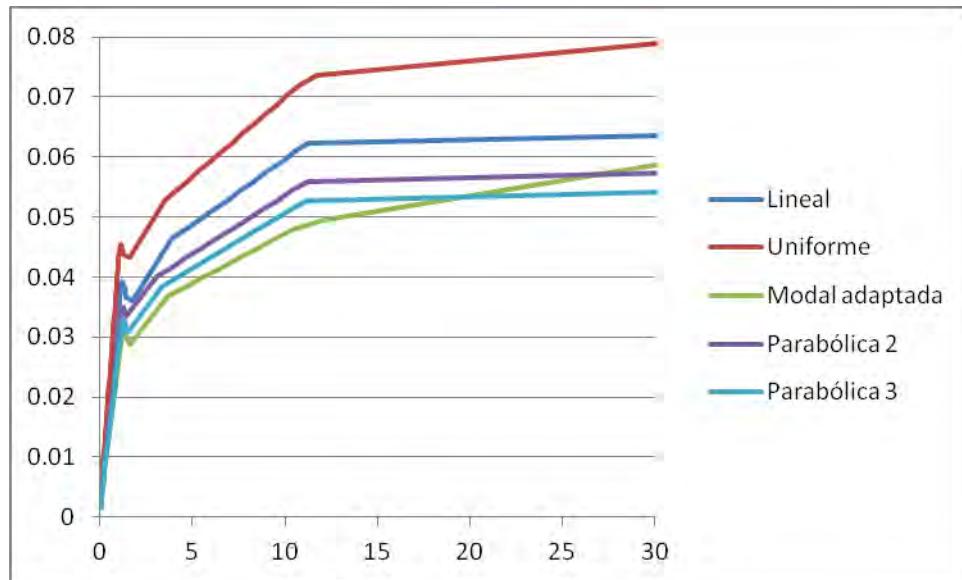


Figura 5.3 Curvas de capacidad del edificio de tres niveles con las diferentes configuraciones de fuerzas laterales.

Fuente: Propia.

El proceso utilizado para trazar las curvas de capacidad del edificio de tres niveles se repite para trazar las del edificio de cinco niveles, mostrando los siguientes resultados:

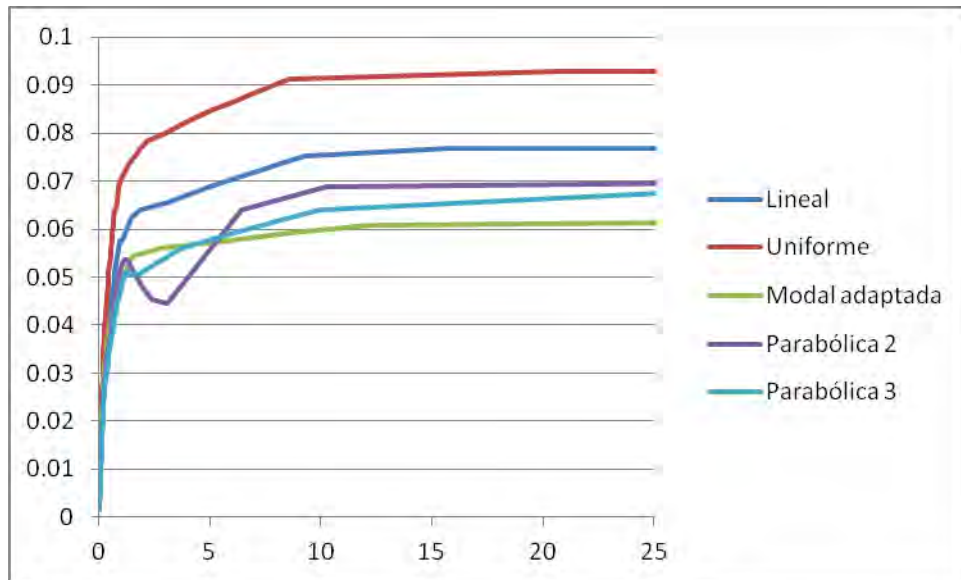


Figura 5.4 Curvas de capacidad del edificio de cinco niveles con las diferentes configuraciones de fuerzas laterales.

Fuente: Propia.

Así mismo se obtuvieron las curvas de capacidad para la estructura de diez niveles, como se muestra a continuación:

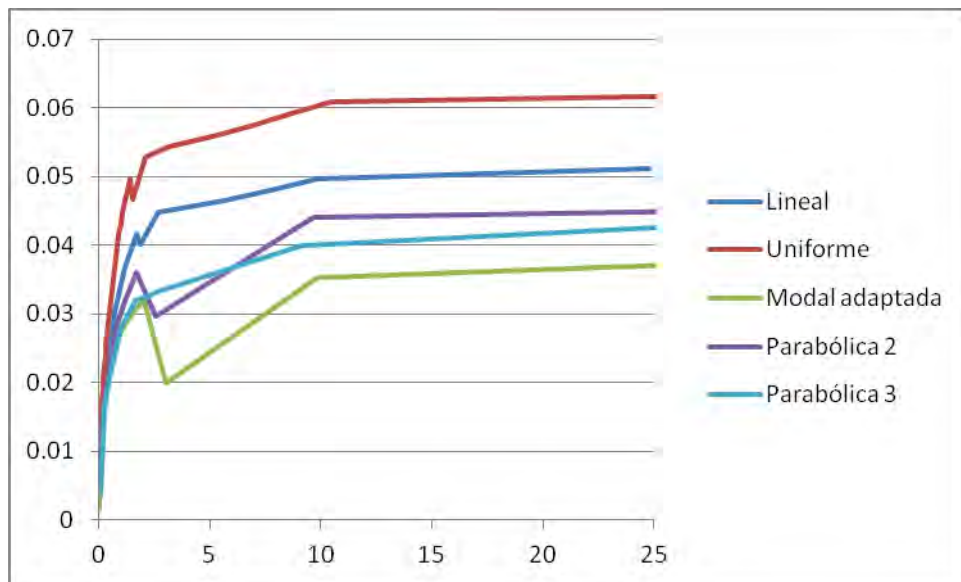


Figura 5.5 Curvas de capacidad del edificio de diez niveles con las diferentes configuraciones de fuerzas laterales.

Fuente: Propia.



Posteriormente se extrajeron los datos necesarios y se trazaron las curvas de capacidad del edificio de quince niveles, mostrando los resultados siguientes:

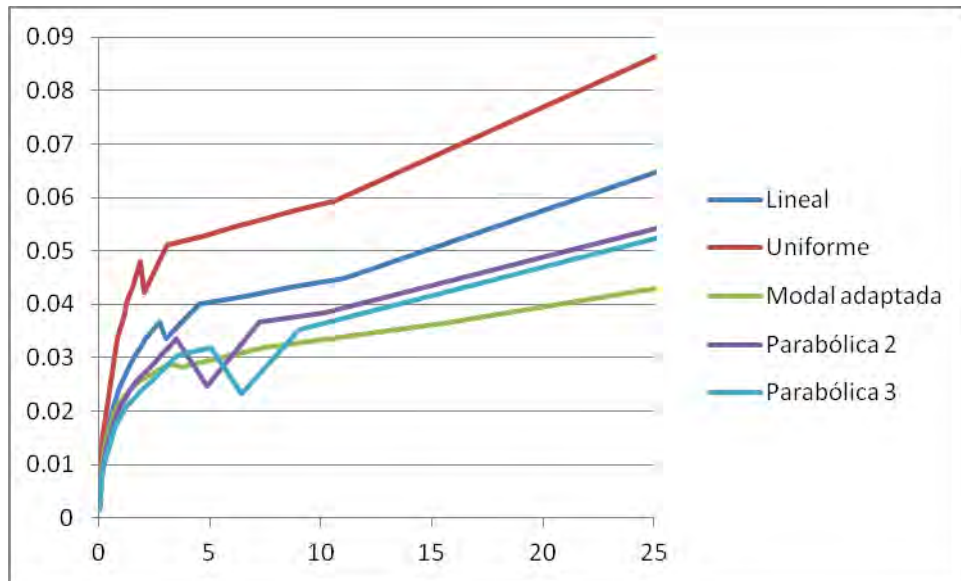


Figura 5.6 Curvas de capacidad del edificio de quince niveles con las diferentes configuraciones de fuerzas laterales.

Fuente: Propia.

Por último se graficaron los datos obtenidos del análisis estático no lineal del edificio de veinte niveles y se obtuvieron las curvas de capacidad que se muestran a continuación:

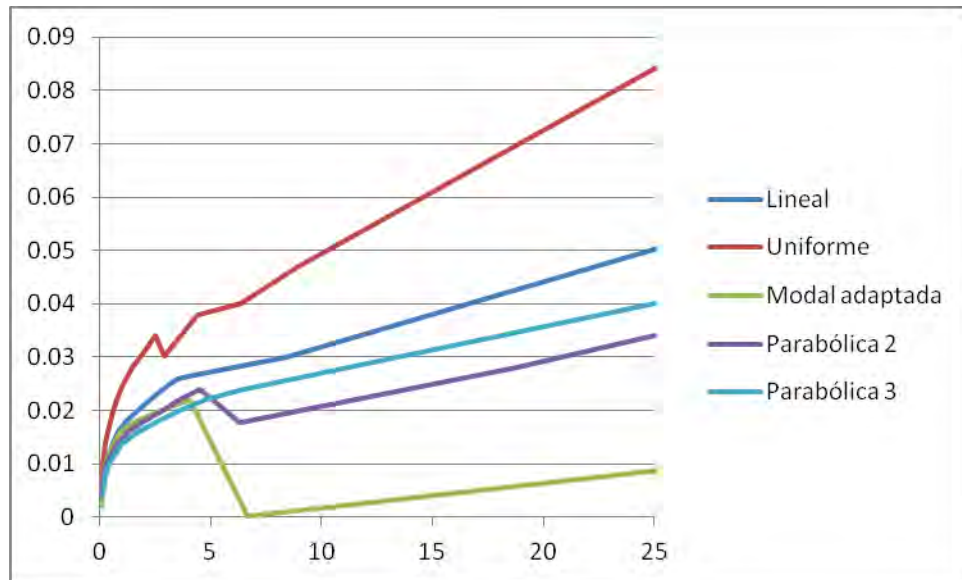


Figura 5.7 Curvas de capacidad del edificio de veinte niveles con las diferentes configuraciones de fuerzas laterales.

Fuente: Propia.

Se pudo observar que la figura 5.3 que corresponde a las curvas de capacidad del edificio de tres niveles, es la que muestra las curvas de capacidad más uniforme, en este caso no se apreció gran diferencia entre las distintas configuraciones de fuerzas laterales. Conforme se fue aumentando la altura del edificio con el número de niveles, el comportamiento respecto a las diferentes curvas de capacidad también tuvo variaciones distintas, mostrando como era de esperarse un comportamiento más desfavorable conforme al incremento de su altura.

En todos los casos se pudo observar que la configuración uniforme de fuerzas laterales (representada por la línea roja), sobreestima el comportamiento de las estructuras, arrojando como resultado una curva de capacidad donde el edificio

muestra el mejor comportamiento con respecto a todas las otras distribuciones de fuerzas laterales.

Así mismo en todos los casos se observó que la configuración modal de fuerzas laterales (representada por la línea verde), subestima el comportamiento de las estructuras, pues en todos los casos muestra una menor resistencia respecto a las otras curvas.

En el caso del edificio de veinte niveles se descartó la curva de capacidad obtenida para la configuración modal de fuerzas laterales, debido a que presenta la falla del edificio frente a pocos esfuerzos por lo que no se consideró objetivo el resultado debido a posibles errores de inestabilidad numérica por parte del programa IDARC2D 5.5.

Una vez observada la variación de la curva de capacidad de acuerdo a la configuración de fuerzas laterales en el análisis estático no lineal y teniendo ya las curvas de capacidad correspondientes a cada estructura sometida a las diferentes distribuciones de fuerzas laterales se decidió comparar el comportamiento de los edificios de distintos niveles sometidos a la misma configuración de fuerzas laterales y los resultados obtenidos fueron los que se muestran a continuación:

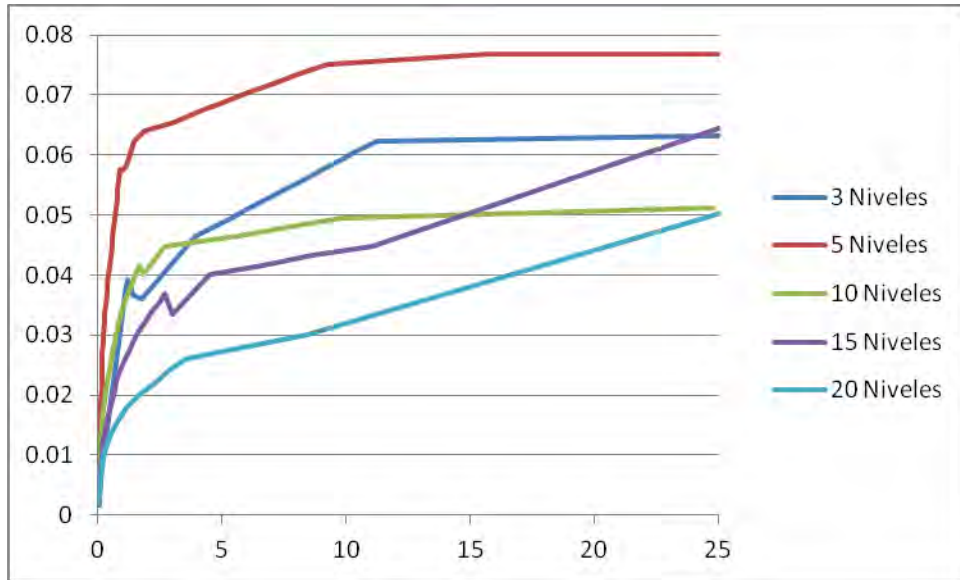


Figura 5.8 Curvas de capacidad de los distintos edificios sometidos a la configuración de fuerzas laterales lineal.

Fuente: Propia.

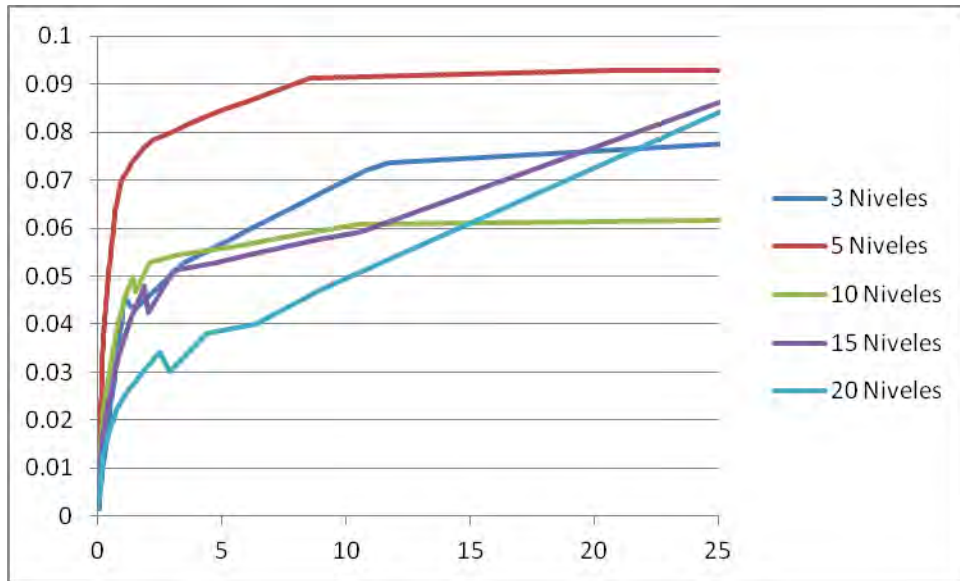


Figura 5.9 Curvas de capacidad de los distintos edificios sometidos a la configuración de fuerzas laterales uniforme.

Fuente: Propia.

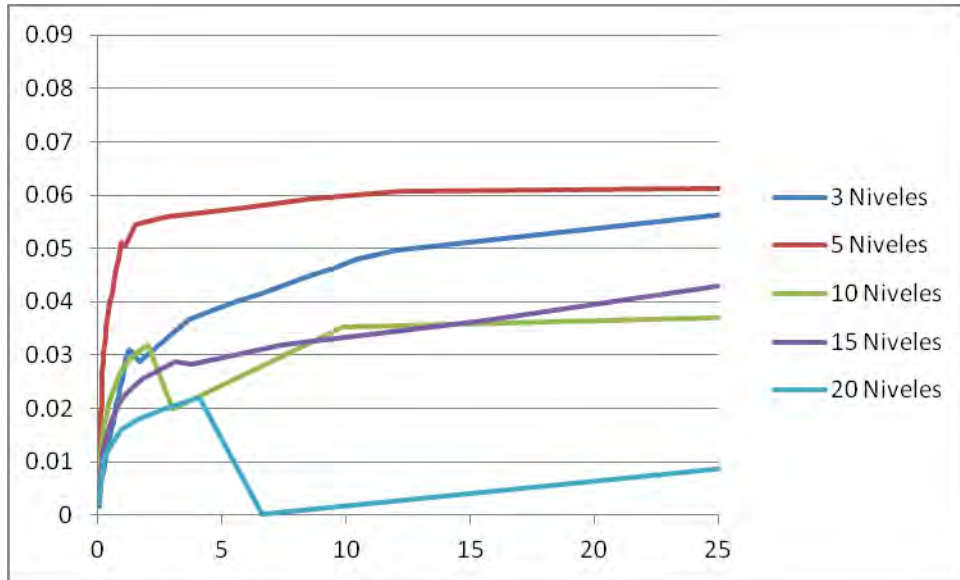


Figura 5.10 Curvas de capacidad de los distintos edificios sometidos a la configuración de fuerzas laterales modal adaptada.

Fuente: Propia.

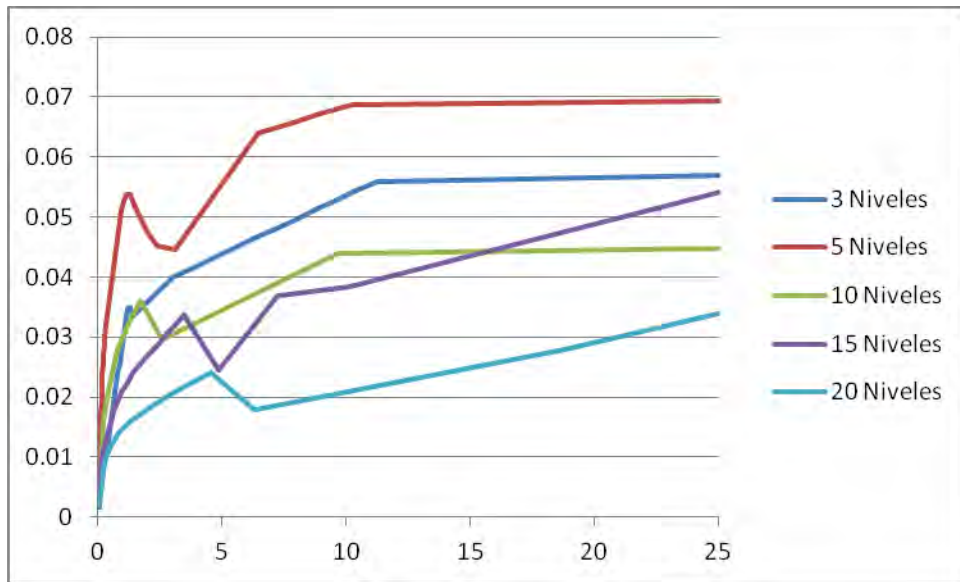


Figura 5.11 Curvas de capacidad de los distintos edificios sometidos a la configuración de fuerzas laterales parabólica de grado 2.

Fuente: Propia.

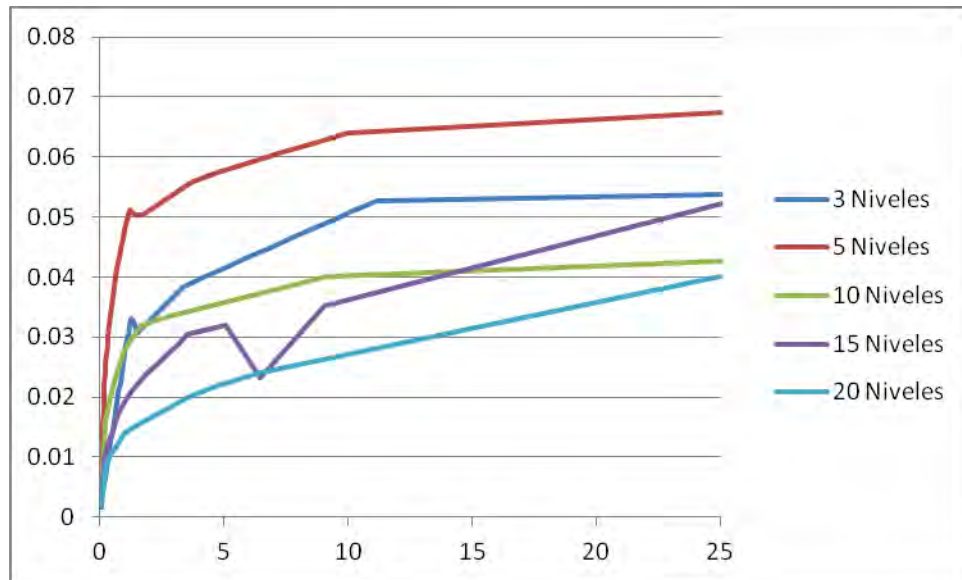


Figura 5.12 Curvas de capacidad de los distintos edificios sometidos a la configuración de fuerzas laterales parabólica de grado 3.

Fuente: Propia.

De acuerdo a las gráficas anteriores, se alcanza a observar que en todos los análisis realizados con las distintas configuraciones de fuerzas laterales el edificio de cinco niveles fue el que presento el mejor comportamiento ya que sus características son similares a las del edificio de tres niveles pero lleva mas refuerzo y así mismo en todos los casos el edificio que presento el desempeño más desfavorable fue el edificio de veinte niveles debido a que entre mayor altura los momentos de volteo debido a fuerzas laterales son mayores, lo cual genera la temprana aparición de articulaciones plásticas. También en estas comparaciones se pudo percibir que independientemente de la configuración de fuerzas laterales a la que fueron sometidas las estructuras sus curvas de capacidad se posicionaron en el mismo

orden en todos los casos, siendo este orden el edificio de cinco niveles, seguido por el de tres niveles, el de diez niveles, el edificio de quince niveles y por último el de veinte niveles, comenzando con el que tuvo el mejor comportamiento hasta terminar con el que tuvo el desempeño más crítico.

### **5.5 Análisis no lineal de los modelos sometidos a una aceleración en la base.**

Luego de obtener las curvas de capacidad requeridas de cada estructura, se realizó el análisis no lineal de cada edificio pero en este caso sometidas a las aceleraciones generadas durante un sismo real, aplicadas en la base, para trazar la gráfica que muestra los ciclos histeréticos de cada uno, obteniendo así la representación del comportamiento real del edificio frente a este sismo.

El acelerograma elegido para llevar a cabo este análisis fue el registrado en la Ciudad de México en la estación SCT durante el sismo del 19 de septiembre de 1985. Una vez que se obtuvo esta información se trazaron las graficas correspondientes a las curvas de capacidad y al ciclo histerético sobre los mismos ejes para así poder apreciar cual fue el comportamiento real de la estructura frente al comportamiento esperado de acuerdo al análisis estático no lineal con cada configuración de fuerzas laterales distintas realizados anteriormente, los resultados obtenidos se muestran a continuación:

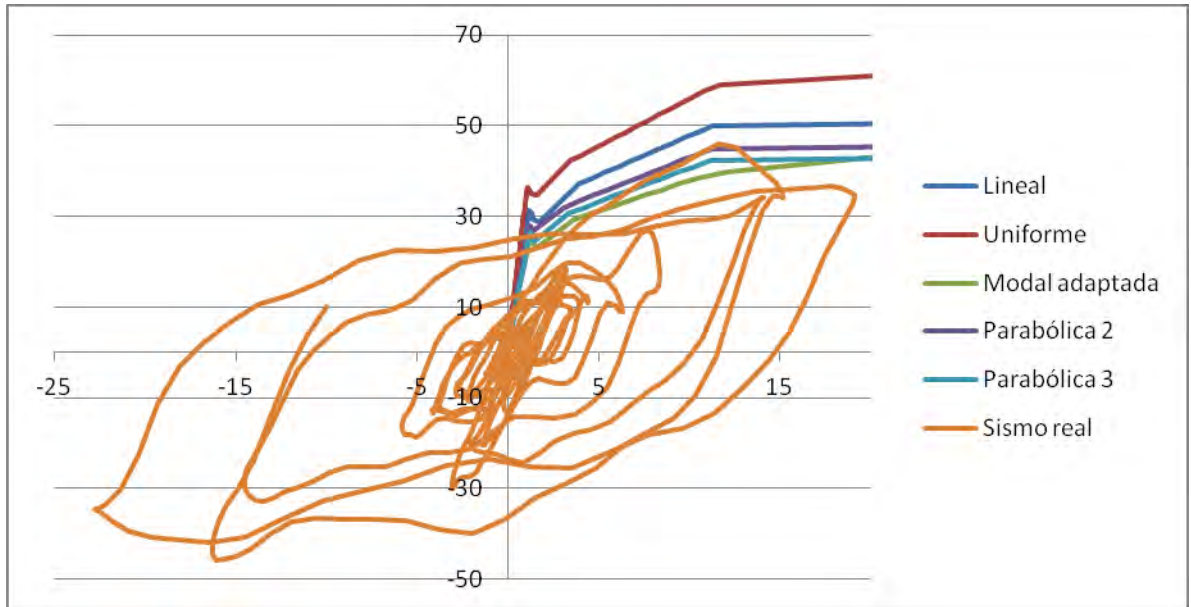


Figura 5.13 Curvas de capacidad y ciclo de histéresis del edificio de tres niveles.

Fuente: Propia.

De acuerdo a los resultados mostrados en la figura 5.13, correspondiente a las curvas del edificio de tres niveles, se pudo apreciar que la curva de capacidad obtenida con el análisis donde se aplicó la configuración de fuerzas laterales parabólica de segundo grado (Parabólica 2, línea morada), fue la curva de capacidad más acercada al desempeño real de la estructura, aun que también se puede considerar que la curva obtenida con la estructura sometida a la configuración lineal y a la parabólica de tercer grado de fuerzas laterales también tuvieron un comportamiento muy parecido al mostrado por el ciclo de histéresis de la estructura.



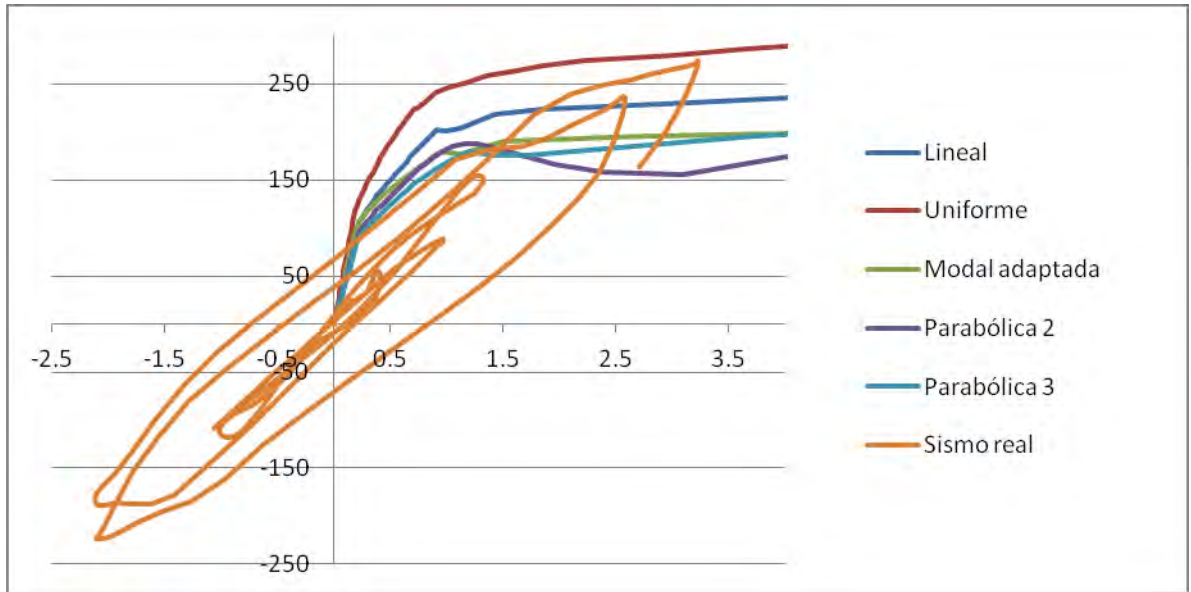


Figura 5.14 Curvas de capacidad y ciclo de histéresis del edificio de cinco niveles.

Fuente: Propia.

La figura 5.14 muestra la comparación del ciclo de histéresis del edificio de cinco niveles sometido a una fuerza de un sismo real con las curvas de capacidad obtenidas con las distintas configuraciones de fuerzas laterales. Se puede notar que este caso las curvas de capacidad obtenidas con las configuraciones de fuerzas laterales lineal, modal adaptada, parabólica de segundo grado y parabólica de tercer grado tienen un comportamiento muy similar al comportamiento del edificio en un sismo real.

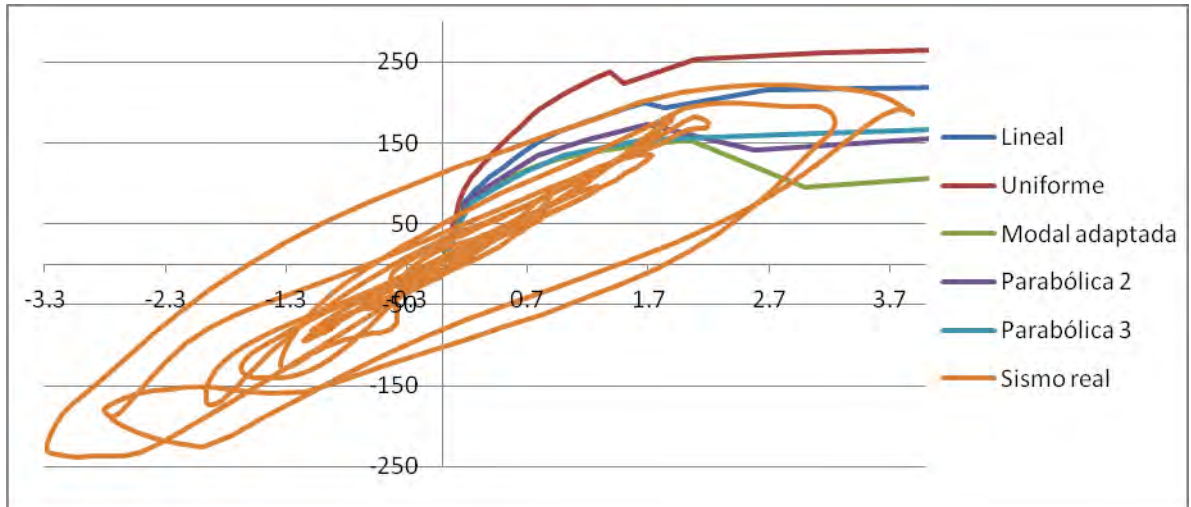


Figura 5.15 Curvas de capacidad y ciclo de histéresis del edificio de diez niveles.

Fuente: Propia.

En el caso de la estructura de diez niveles se observó que la curva de capacidad que mostró el comportamiento más aproximado al desempeño del edificio en un sismo real como lo muestra el ciclo de histéresis obtenido fue la curva de capacidad conseguida con el análisis estático no lineal de la estructura sometida a la configuración lineal de fuerzas laterales como se puede notar en la figura 5.15.

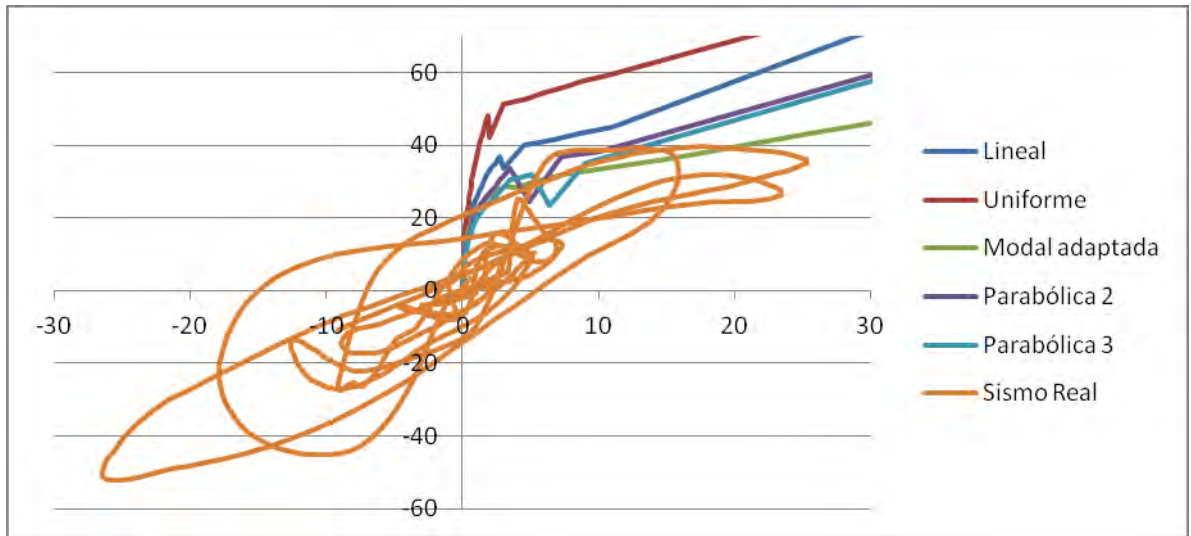


Figura 5.16 Curvas de capacidad y ciclo de histéresis del edificio de quince niveles.

Fuente: Propia.

Posteriormente se obtuvo la comparación del ciclo de histéresis y las curvas de capacidad obtenidas del edificio de quince niveles mostrada en la figura 5.16, en la cual se puede observar que la curva de capacidad obtenida con la configuración lineal de fuerzas laterales fue la que más se asemeja con el desempeño mostrado por el ciclo de histéresis.

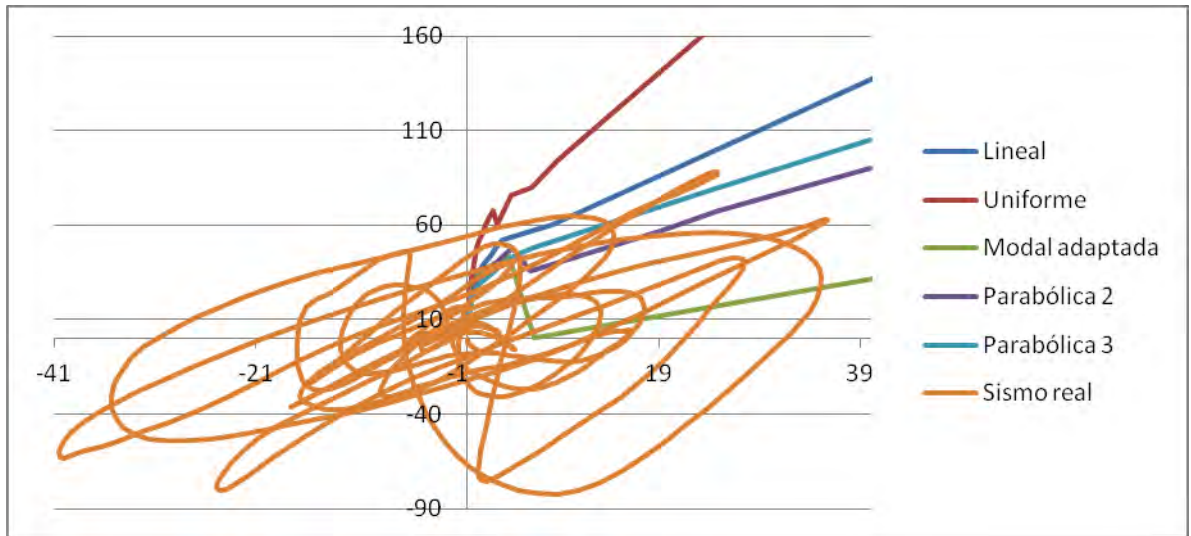


Figura 5.17 Curvas de capacidad y ciclo de histéresis del edificio de veinte niveles.

Fuente: Propia.

Para el caso del edificio de veinte niveles los resultados mostraron inestabilidad numérica por lo que no se pueden considerar totalmente correctos, sin embargo, de acuerdo a las curvas obtenidas y por lo observado en los casos de las estructuras de menos niveles, se considera que la curva de capacidad que mejor se adapta al comportamiento real del edificio es la obtenida con el análisis de la estructura sometida a la configuración lineal de fuerzas laterales.

## CONCLUSIÓN

Al inicio de esta investigación se planteó como objetivo general determinar la variación en la curva de capacidad de acuerdo a la configuración de fuerzas laterales en el análisis estático no lineal, el cual se cumplió satisfactoriamente con la realización del análisis estático no lineal de las diferentes estructuras las cuales fueron edificios de tres, cinco, diez, quince y veinte niveles, cada uno sometido a cinco configuraciones de fuerzas laterales distintas, arrojando como resultado veinticinco curvas de capacidad las cuales se pudieron comparar y así observar las variaciones que estas presentaron.

De acuerdo a lo mencionado en el capítulo de análisis e interpretación de resultados, las curvas de capacidad presentaron un comportamiento similar cuando se sometieron diferentes estructuras a la misma configuración de fuerzas laterales, no es exactamente el mismo resultado en todos los casos, pero se puede generalizar que en cada estructura de diferentes niveles se observó que es la misma configuración de fuerzas laterales la que arroja la curva de capacidad donde la estructura muestra el mejor comportamiento, así como también es la misma configuración de fuerzas laterales la que muestra como resultado la curva de capacidad con el comportamiento más desfavorable del edificio.

Durante esta investigación también se dio respuesta a la pregunta que se planteó en un inicio ¿Cuál es la variación de la curva de capacidad de acuerdo a la configuración de fuerzas laterales en el análisis estático no lineal? La cual se

respondió por medio de las gráficas presentadas en el capítulo de análisis e interpretación de resultados, donde se muestran las cinco diferentes curvas de capacidad de una estructura sometida a cinco distintas configuraciones de fuerzas laterales, pudiendo observarse así la variación entre ellas.

Se pudo comprobar como el análisis estático no lineal, entra perfectamente en los métodos para el diseño por desempeño, pues los resultados que este análisis arroja, como lo es la curva de capacidad, muestra muy aproximadamente cual será el comportamiento de una estructura sometida a ciertas fuerzas.

Algunos otros aspectos que se pudieron notar durante esta investigación fue el desempeño del software IDARC2D 5.5, utilizado para realizar análisis estático no lineal y obtener las curvas de capacidad requeridas. Se observó que algunos resultados no fueron muy satisfactorios debido a errores de inestabilidad numérica en el programa.

Posteriormente se obtuvieron los ciclos de histéresis que muestran el comportamiento de los edificios sometidos a la aceleración de un sismo real, los cuales se pudieron comparar con las curvas de capacidad anteriormente obtenidas para poder observar cuál de ellas es la que muestra el desempeño de la estructura más acercado a la realidad. Una vez realizadas estas comparaciones se llegó a la conclusión que en la mayoría de los casos el análisis realizado con la configuración lineal de fuerzas laterales fue el que arrojó las curvas de capacidad más parecidas al ciclo de histéresis de las estructuras, por lo que se considera la opción más conveniente para realizar el análisis estático no lineal de un edificio. Sin embargo,

cabe resaltar que las configuraciones de fuerzas parabólicas de segundo y tercer grado también arrojaron curvas de capacidad similares a la curva que describe el desempeño del edificio, por lo que también se consideran buena opción dentro del análisis estático no lineal.

## BIBLIOGRAFÍA

Aguilar Falconí, Roberto. (2001).

Análisis Sísmico por Desempeño.

Centro de Investigaciones Científicas Escuela Politécnica del Ejército. Ecuador.

Arnal Simón, Luis. (2004).

Gobierno del Distrito Federal.

Reglamento de Construcciones del Distrito Federal.

Ed. Trillas. México.

Mendoza Espinosa, Yudith Paulina. (2007).

Comparativa de diseño sísmico de edificios regulares de concreto reforzado por métodos de resistencia última y por desempeño, ubicados en distintas zonas sísmicas del estado de Michoacán.

Tesis inédita de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Don Vasco A. C., de la ciudad de Uruapan, Michoacán, México.



Gobierno del Distrito Federal. (2004).

Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal 2004.

Berbera Editores S.A de C.V. México.

González Cuevas, Robles. (2002).

Aspectos fundamentales del Concreto Reforzado.

Editorial Limusa, México.

Hernández Sampieri, Roberto y Colaboradores. (2004).

Metodología de la investigación.

Ed. Mc Graw Hill, México.

Mendieta Alatorre, Angeles. (2005).

Métodos de investigación y manual académico.

Ed. Porrúa, México.

Meli Piralla, Roberto. (1985).

Diseño Estructural.

Editorial Limusa, México.

R. E. Valles, A. M. Reinhorn, S. K. Kunnath, C. Li, and A. Madan. (1996).

IDARC 2D Version 4.0: A Program for the Inelastic Damage Analysis of Buildings.

National Center For Earthquake Engineering Research. Buffalo, NY.

## OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN

Aguilar Falconí, <http://publiespe.espe.edu.ec/academicas/tecnica/tecnica38/puntos-notables/puntos-notables.htm>

Capas de la tierra

<http://es.wikipedia.org/wiki/Tierra>

Daños en las estructuras

<http://portal.obraenlinea.com/2010/01/haiti-sacudido-por-un-sismo-de-7-3-gradus/>

Placas tectónicas

<http://www.monografias.com/trabajos32/placas-tectonicas/placas-tectonicas.shtml>

Zonas sísmicas

<http://www.ssn.unam.mx/>