

01161



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**ASPECTOS FUNDAMENTALES EN EL CÁLCULO  
DE LA TORSIÓN SÍSMICA Y SU IMPACTO EN EL  
ANÁLISIS DE EDIFICIOS DISEÑADOS CON BASE  
EN EL RCDF Y SUS NTC'S**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN INGENIERÍA (ESTRUCTURAS)**

**P R E S E N T A**  
**FRANCISCO JAVIER POOT VEGA**

DIRIGIDA POR

M. I. OCTAVIO GARCIA DOMÍNGUEZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D. F.  
JUNIO DE 2005

m 344667



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.

## DEDICATORIA

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Francisco Javier  
Root Vega

FECHA: 25 de mayo de 2005

FIRMA: 

### *A mis padres*

Les dedico este trabajo porque desde el momento en que nací me han dado todo el amor, la comprensión, la confianza y un inmenso apoyo, sobre todo en momentos determinantes durante esta maestría en que mis fuerzas flaquearon. Los quiero mucho.

### *A mis hermanos*

Porque me han dado siempre su cariño y su apoyo. Espero que este logro que he alcanzado los motive a conseguir todas las metas que se hayan propuesto.

### *A Rosana*

Porque llegaste a darle felicidad y fortaleza a mi vida, con el cariño que me has dado desde el primer momento.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia, Poot Mugarte y Vega Pech, por su apoyo y ejemplo durante toda mi vida, sin su sacrificio y dedicación no hubiera sido posible que haya logrado mis estudios.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca que me fue otorgada durante mis estudios de maestría. A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico el patrocinio del proyecto Desarrollo de Criterios de Diseño Sísmico para Torsión (2da. Etapa) en el cual participé.

Agradezco a la DEPMI y al Instituto de Ingeniería de la UNAM las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo y la oportunidad que me brindaron para continuar mi formación profesional.

Un sincero agradecimiento para el M. en I. Octavio García Domínguez, mi director de tesis, por compartir conmigo sus sólidos conocimientos y su experiencia, por su paciencia, confianza y motivación, pero sobre todo, por la amistad y el apoyo desinteresado que siempre me ha manifestado durante el tiempo que tenemos de conocernos.

Agradezco a los profesores: Dr. Gustavo Ayala Milián, Dr. Oscar López Bátiz, Dr. Carlos Reyes Salinas y M. en I. Raúl Jean Perilliat por dedicar parte de su tiempo en revisar esta tesis, para mejorarla y enriquecerla con sus valiosas observaciones, comentarios y sugerencias.

A mis profesores de maestría.

A mis compañeros del cubículo de Estructuras de la DEPMI y a todos mis amigos, quienes siempre me apoyaron y me alentaron para seguir adelante.

## INDICE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>INTRODUCCIÓN.....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>REVISIÓN CRÍTICA DE LAS NORMAS DE TORSIÓN APLICADAS AL DISEÑO SÍSMICO DE EDIFICIOS<br/>IRREGULARES EN MÉXICO.....</b>    | <b>3</b>  |
| 2.1 Revisión Histórica.....   | 3         |
| 2.1.1 Antecedentes.....   | 3         |
| 2.1.2 Consideraciones para diseño sísmico por torsión a través de la evolución de los<br>reglamentos mexicanos.....         | 5         |
| 2.1.2.1 Código de Construcción para el Distrito Federal de 1920.....  | 5         |
| 2.1.2.2 Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal de 1942.....  | 5         |
| 2.1.2.3 Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal de 1957.....  | 6         |
| 2.1.2.4 Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal de 1966.....  | 7         |
| 2.1.2.5 Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal de 1976.....  | 9         |
| 2.1.2.6 Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal de 1987.....  | 10        |
| 2.1.2.7 Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal de 1993.....  | 15        |
| 2.1.2.8 Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal de 2004.....  | 15        |
| <b>METODOLOGÍAS PARA CONSIDERAR EFECTOS DE TORSIÓN CON BASE EN EL MÉTODO SISMICO<br/>ESTÁTICO.....</b>                      | <b>19</b> |
| 3.1 Filosofía de diseño del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y sus Normas<br>Técnicas Complementarias..... | 20        |
| 3.2 Método Sísmico Estático.....  | 21        |
| 3.2.1 Descripción del Método Sísmico Estático.....  | 21        |
| 3.2.1.1 Aplicación de la Normatividad del Diseño Sísmico por Torsión empleando el método<br>presentado por Bazán.....       | 22        |
| 3.2.2 Obtención de la matriz de rigidez global del edificio.....  | 24        |
| 3.2.2.1 Matriz de rigidez global de un edificio.....  | 25        |

---

|  |           |
|--|-----------|
| 3.2.2.2 Matriz de rigidez lateral.....   | 25        |
| 3.2.2.3 Submatrices de la matriz de rigidez global.....  | 25        |
| 3.2.2.4 Método matricial de Damy.....  | 26        |
| 3.2.3 Aplicación del método de Damy utilizando programas comerciales.....  | 29        |
| 3.2.4 Cálculo de los momentos torsionantes conforme al las NTCDS -2004.....  | 30        |
| <br>   |           |
| 3.3 Método de Goel.....  | 32        |
| 3.3.1 Descripción del Método de Goel.....  | 32        |
| 3.3.2 Desarrollo del Método de Goel.....   | 32        |
| <br>   |           |
| 3.4 Diseño simplificado por torsión sísmica estática.....  | 34        |
| 3.4.1 Procedimiento simplificado para distribuir el cortante por torsión sísmica estática.....                               | 34        |
| 3.4.2 Comentarios.....   | 37        |
| <br>   |           |
| 3.5 Ejemplo de aplicación de las metodologías para realizar el método sísmico estático.....                                  | 38        |
| 3.5.1 Descripción del Modelo.....  | 38        |
| 3.5.2 Presentación de Resultados.....  | 39        |
| 3.5.2.1 Resultados del Método de Damy.....   | 39        |
| 3.5.2.2 Resultados del Método de Goel.....   | 40        |
| <br>   |           |
| <b>INFLUENCIA DE LA INTENSIDAD Y DISTRIBUCION DE LAS CARGAS VIVAS Y MUERTAS EN EL<br/>CÁLCULO DEL CENTRO DE TORSIÓN.....</b> | <b>42</b> |
| <br>   |           |
| 4.1.1 Antecedentes.....  | 42        |
| 4.1.2 Descripción de los modelos.....  | 43        |
| 4.1.3 Cálculo de las cargas.....   | 44        |
| 4.1.4 Presentación de Resultados.....  | 47        |
| 4.1.5 Comentarios.....   | 59        |
| <br>   |           |
| 4.2 Obtención del centro de torsión de edificios de un nivel.....  | 60        |
| 4.2.1 Antecedentes.....  | 60        |
| 4.2.2 Desarrollo del planteamiento matemático.....   | 60        |

---

---

|  |           |
|--|-----------|
| 4.2.3 Observaciones.....   | 62        |
| 4.3 Efectos de torsión en los niveles superiores de edificios..... | 63        |
| 4.3.1 Antecedentes.....  | 63        |
| 4.3.2 Descripción del Modelo.....                                  | 63        |
| 4.3.3 Desarrollo.....  | 64        |
| 4.3.4 Presentación de Resultados.....                              | 65        |
| 4.3.5 Comentarios.....   | 66        |
| <b>CONCLUSIONES .....</b>  | <b>67</b> |
| Conclusiones.....  | 67        |
| Recomendaciones.....   | 69        |
| <b>REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA .....</b>                            | <b>70</b> |
| Referencias .....  | 70        |
| Bibliografía .....   | 71        |

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.

Para realizar el diseño estructural de un edificio asimétrico, una etapa previa que resulta ser muy importante es la del análisis, ya que en esta se determinan los efectos de las acciones de diseño, siendo la torsión que experimentan sus niveles o entresijos uno de los que más daño causan. Las estadísticas de daño en sismos pasados indican que un alto porcentaje de estos daños se produjo por la existencia de configuraciones asimétricas en planta y elevación, así como distribución de rigidez y resistencia marcadamente asimétrica, como ocurrió en la Ciudad de México durante el sismo de septiembre de 1985.

A partir de esa fecha, se han realizado diferentes investigaciones en el país, para estudiar el efecto de la torsión basándose en las características de asimetría de las estructuras. De acuerdo con la normatividad vigente, el nivel de asimetría de una estructura se mide en función de la excentricidad estática o estructural, la cual depende de las rigideces de los elementos de entresijo y la posición del centro de cortante.

El presente trabajo tiene los siguientes objetivos:

Hacer una revisión histórica de la normatividad por torsión en los diferentes códigos que han existido en México desde principios del siglo pasado para entender su filosofía y mejorar la comprensión del fenómeno.

Revisar algunas metodologías mediante las cuales se puede hacer la distribución de fuerzas cortantes conforme a lo establecido en la normatividad por torsión vigente y emitir algún comentario acerca de cual es la más adecuada. Estas metodologías parten del conocimiento de las fuerzas sísmicas aplicadas en la estructura, obtenidas mediante métodos estáticos o dinámicos.

Estudiar la influencia de la magnitud y distribución de las cargas muerta y viva en la variación del centro de torsión de entresijo, con la finalidad de identificar distribuciones espaciales de carga que pudieran propiciar el incremento en el nivel de asimetría estructural y por ende producir efectos de torsión críticos en edificios. Como caso



particular, se buscó determinar la influencia que tiene el peso del nivel de azotea en la ubicación del CT, ya que estudios previos han detectado una situación crítica en los últimos entresijos, que modifica el sentido de los momentos torsionantes.

La tesis está compuesta por cinco capítulos, cuyo contenido se describe brevemente a continuación.

El capítulo 1 presenta los antecedentes de la torsión sísmica de edificios.

En el capítulo 2, se presenta una revisión histórica del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal en lo referente a la normatividad para diseño por torsión sísmica en edificios. Se realiza además un análisis de la literatura encontrada, donde se discuten algunos aspectos importantes y se realizan algunas observaciones, teniendo como fin, mejorar la comprensión del fenómeno y dejar clara la filosofía de estas normas.

En el Capítulo 3, se presentan y comentan algunos aspectos relevantes de tres metodologías para hacer la distribución de las fuerzas cortantes obtenidas con el método sísmico estático, considerando el efecto de torsión de acuerdo a la normatividad vigente. Esto con el fin de determinar que metodología es más adecuada para calcular los valores de los elementos mecánicos que se requieren para realizar el diseño sísmico de edificios asimétricos. Para este fin, se estudió un edificio al cual se le aplicaron estas metodologías.

En el capítulo 4, se evalúa la influencia de la magnitud y distribución de las cargas vivas y muertas en el cálculo del centro de torsión, mediante estudios realizados a diferentes edificios, con el fin de identificar distribuciones espaciales de carga que pudieran favorecer el incremento en el nivel de asimetría estructural y por ende producir efectos de torsión críticos en edificios.

Finalmente en el capítulo 5, se presentan las conclusiones, comentarios y recomendaciones que se derivan de este trabajo.

## **CAPÍTULO II. REVISIÓN CRÍTICA DE LAS NORMAS DE TORSIÓN APLICADAS AL DISEÑO SÍSMICO DE EDIFICIOS IRREGULARES EN MÉXICO.**

Este capítulo tiene como objetivo presentar una revisión histórica del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal en lo referente a la normatividad para diseño por torsión sísmica en edificios. Para ello se realizó un análisis detallado del contenido de los diferentes documentos encontrados para después discutir algunos aspectos y hacer algunas observaciones con el fin de mejorar la comprensión del fenómeno y dejar clara la filosofía de estas normas.

### **2.1 Revisión Histórica.**

#### **2.1.1 Antecedentes**

Los daños provocados sobre las estructuras por causa de los terremotos, así como la revisión de las normas y los reglamentos sísmicos que redundan en mayores niveles de capacidad sismo – resistente, son la causa de que muchas de las estructuras existentes tengan que ser reforzadas. En muchos casos, el reforzamiento de las estructuras es solicitado para cubrir los nuevos requisitos de diseño, por lo que resulta conveniente recordar como es que se dieron las bases y la evolución del Reglamento de Construcción del Distrito Federal (RCDF) vigente.

Algunos de los cambios más significativos que presenta el RCDF de 1987, fueron debidos a los graves daños ocurridos en los edificios de la Ciudad de México durante el sismo del 19 de septiembre de 1985. Sin duda, uno de los efectos más evidentes estuvo asociado a la torsión de las estructuras debido a distribuciones asimétricas de masas, rigideces y/o resistencias en planta. La normatividad actual en este tema, derivada principalmente de estudios realizados en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, está basada en resultados de modelos simples con comportamiento elástico lineal, situación que es incongruente con la filosofía que establece las normas, al aceptar la incursión de los edificios en el rango no lineal de comportamiento. A partir de 1985 se

han realizado investigaciones considerando la naturaleza inelástica del fenómeno, por lo cual, se considera de interés para este trabajo, hacer una breve reseña de la evolución de la normatividad de diseño sísmico por torsión que permita tener un panorama más completo por la problemática y su impacto en el desarrollo de la ingeniería estructural nacional.

Se comenta a continuación una breve reseña y comentarios de los códigos de construcción de nuestro país, dando especial énfasis a la evolución de la norma por torsión.

- I. Reglamento de Construcciones del Distrito Federal de 1920.
- II. Reglamento de Construcciones del Distrito Federal de 1942.
- III. Reglamento de Construcciones del Distrito Federal de 1957.
- IV. Reglamento de Construcciones del Distrito Federal de 1966.
- V. Reglamento de Construcciones del Distrito Federal de 1976..
- VI. Reglamento de Construcciones del Distrito Federal de 1987.
- VII. Reglamento de Construcciones del Distrito Federal de 1993.
- VIII. Reglamento de Construcciones del Distrito Federal de 2004.

## **2.1.2 Consideraciones para diseño sísmico por torsión a través de la evolución de los reglamentos mexicanos.**

### **2.1.2.1 Código de Construcción para el Distrito Federal de 1920.**

En 1920 se publicó el Código de Construcción el cual solo aplicaba al D. F. y abarcaba únicamente recomendaciones sobre los tipos de materiales de construcción a emplear. Este documento se complementaba con algunos boletines y folletos de divulgación del Instituto Geológico de México (1903-1922).

#### **Comentarios**

En este código el efecto sísmico no era considerado aún, además de que presentaba poca información para poder construir edificaciones seguras.

### **2.1.2.2 Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal de 1942.**

En 1942 se promulgó el primer reglamento, en el cual se consideró al efecto sísmico como una sollicitación importante; este código exigía coeficientes de cortante en la base que podían llegar a 0.1g, dependiendo de la importancia de la estructura; además se permitían incrementos en 33% de los esfuerzos permisibles para la superposición de cargas verticales. Se especificaba una distribución uniforme de fuerzas laterales para representar la acción de los sismos en los edificios.

#### **Comentarios**

En este primer reglamento, aún cuando ya se consideraba el efecto sísmico, todavía el estado de conocimiento del fenómeno sísmico era limitado, por lo tanto los valores de los coeficientes sísmicos resultaban ser bajos y no tomaban en cuenta las características del suelo en el sitio de la construcción. La distribución lateral de cargas no representaba de manera realista el efecto del sismo en los edificios.

### 2.1.2.3 Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal de 1957.

El sismo del 28 de julio de 1957, forzó a la instauración de un reglamento de emergencia de aplicación inmediata, a solo cuatro semanas después del suceso. En este se consideraron las condiciones locales del suelo y la ciudad se dividió en tres zonas: suelo blando, de transición y firme. Los coeficientes sísmicos para el cálculo del cortante en la base variaron de 0.05 a 0.10, para edificios ordinarios de acuerdo a su ubicación, y se consideró como hipótesis una variación lineal de las aceleraciones con la altura del edificio. Se consideró por primera vez el efecto de torsión en donde los momentos torsionantes debían calcularse con base a excentricidades obtenidas factorizando un valor estático por un coeficiente que intentaba cubrir efectos dinámicos e incertidumbres en las rigideces relativas y distribución de cargas. La rigidez suministrada por muros de mampostería debía ser explícitamente incorporada en los cálculos de torsión. Se especificaba un límite superior de 0.002 de la altura de entrepiso como desplazamiento admisible entre niveles.

#### Comentarios

En esta versión del reglamento se consideró formalmente el diseño sísmico por torsión en los reglamentos mexicanos, que incluían aspectos como la incertidumbre en las propiedades de los elementos estructurales y distribución de masas en función de lo que ahora se conoce como excentricidad accidental. Además se reconocían las diferencias entre los resultados de un análisis estático y dinámico mediante la factorización de la excentricidad.

Aún cuando se propuso una división de la ciudad por zonas, dependiendo de las características del suelo, la información instrumental era inexistente y por lo tanto los coeficientes sísmicos involucrados en el análisis y diseño sísmico eran relativamente bajos.

Un aspecto importante fue la introducción de la filosofía de restringir los desplazamientos laterales de entrepiso de los edificios para minimizar los posibles daños .

#### **2.1.2.4 Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal de 1966.**

En este Reglamento se trató de simplificar la microzonificación, incorporando la zona de transición a la zona blanda; se inicia además la tipificación de estructuras de acuerdo al uso y características estructurales. Por primera vez se especificaron espectros de aceleración para diseño en suelo firme y blando.

A continuación se presenta un resumen referente al análisis sísmico estático y dinámico establecidos en el reglamento en cuestión.

##### **1. Análisis Estático.**

La excentricidad torsional calculada en cada nivel se tomará como la distancia entre el centro de torsión del nivel correspondiente y la fuerza cortante en dicho nivel.

Para el diseño de cada miembro estructural se supondrá que la excentricidad tiene el valor más desfavorable de los siguientes:

- I. 1.5 veces el valor calculado de  $e_s$  más 0.05 veces la máxima dimensión del piso que se analiza (excentricidad accidental) medida en la dirección normal a la fuerza cortante.
- II. El valor calculado menos la excentricidad accidental.

##### **2. Análisis Dinámico.**

Será permisible el empleo de cualquier procedimiento de análisis dinámico compatible con las características de los temblores y el comportamiento del subsuelo y de las estructuras, siempre que se satisfagan las restricciones del presente artículo (Art. 274).

Si se usa el análisis modal, podrán despreciarse aquellos modos naturales de vibración, cuyo efecto combinado no modifique los esfuerzos de diseño sísmico en más de 10%.

En esta fase del análisis puede también despreciarse el efecto dinámico torsional que resulte de excentricidades, calculadas estáticamente, no mayores del 5% de la dimensión del piso, medida en la misma dirección que la excentricidad. El efecto de dichas excentricidades y de la excentricidad accidental se tomará en cuenta como lo especifica el artículo correspondiente al análisis estático (Art. 273).

### **Comentarios**

Se puede apreciar que existió un avance en el estudio del fenómeno sísmico, lo que dio como resultado la presentación de expresiones que tenían como objetivo considerar los efectos derivados de dicho fenómeno, sin embargo como se comenta más adelante aún presentaba ciertas limitaciones. Un aspecto relevante fue la consideración en el diseño de la importancia de la estructura en función del uso que se le diera, característica que se mantiene hasta nuestros días.

En la definición de excentricidad torsional se presentaba una confusión en el manejo de la terminología ya que en el nivel se supone que actúan fuerzas sísmicas y no fuerzas cortantes; estas últimas se considera que actúan en el entrepiso. Asimismo el valor que se dio a la excentricidad accidental resultaba ser más bajo que el actual.

Un aspecto importante a considerar son los valores de las cargas vivas que se le asignaban a los edificios de acuerdo con la ocupación que tendrían al entrar en servicio, las cuales resultan ser bajas.

### 2.1.2.5 Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal de 1976.

En esta versión del reglamento se trata de definir de forma explícita y abierta las ideas sobre seguridad estructural y comportamiento sísmico. El factor de reducción  $Q$  definido como la relación entre la máxima ordenada del espectro de respuesta correspondiente a un estado lineal y la que corresponde al no lineal, se hizo depender del tipo de estructura, materiales y detallado en el diseño y construcción, tomando valores que van desde  $Q= 2$  para inmuebles edificados a base de mampostería confinada y marcos de concreto, hasta el  $Q= 6$  para estructuras cuyas características tratan de proporcionar una gran ductilidad a la estructura (que pueden disipar una mayor cantidad de energía) intentando prevenir la falla frágil en caso de sismo.

A continuación se presenta un resumen de los métodos de análisis sísmico estático y dinámico propuestos en esta versión.

#### 1. Análisis Estático.

Este reglamento establece que para el análisis estático hay que considerar que el momento torsionante se deberá tomar igual a la fuerza cortante de entrepiso multiplicada por la excentricidad que para cada marco resulte más desfavorable de las siguientes:

$$1.5e_s + 0.1 b, \quad \text{ó} \quad e_s - 0.1b,$$

donde  $e_s$  es la excentricidad estructural calculada en el entrepiso considerado y  $b$  es la máxima dimensión en planta de dicho entrepiso, medida perpendicularmente a la dirección del movimiento del terreno que se esté analizando (el artículo 240, párrafo VII).

En el artículo 237 se estipulaba que las estructuras se analizarían bajo la acción de dos componentes horizontales ortogonales del movimiento del terreno, y que cada sección crítica debía considerar la suma vectorial del 100% de los efectos (desplazamientos y fuerzas internas) de un componente de movimiento del terreno más el 30% de los efectos del otro, en adición a los efectos de fuerzas gravitatorias.



## 2. Análisis Dinámico

En cuanto al análisis dinámico, en este reglamento no se menciona ningún momento adicional debido a la excentricidad accidental.

### **Comentarios**

En esta versión del reglamento se sobreestima la capacidad de las estructuras para obtener un comportamiento con gran ductilidad, por lo tanto, el valor que se le dio al factor de reducción resultó ser alto.

Para esta versión del reglamento ya se consideran explícitamente combinaciones de cargas dinámicas (sismo) y gravitacionales.

Los valores asignados a las cargas vivas que se debían utilizar para el diseño sísmico y al coeficiente de la excentricidad accidental no cambiaron respecto a la versión anterior del reglamento.

Las recomendaciones de diseño por torsión cuando se realiza un análisis estático adoptaron la forma que poseen actualmente, estableciendo claramente las expresiones para el cálculo de las excentricidades de diseño; en esta se observa un mayor valor de excentricidad accidental (10% de la dimensión máxima de la planta).

### **2.1.2.6 Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal de 1987.**

Después de la acción de los sismos de 1985 de inmediato se integró un comité para actualizar el reglamento de construcción, lo cual sucedió en dos etapas: una a largo plazo (aproximadamente en un año) y otra prácticamente inmediata, emitiendo un código de emergencia, cuyas conclusiones se basaron en el análisis de los daños ocurridos. En estas se establece la obligatoriedad de reparar las construcciones que sufrieron daños estructurales de importancia de modo que se cumplieran los nuevos requisitos.

Teniendo en cuenta la gran cantidad de daños observados y los numerosos casos de comportamiento poco satisfactorio, los coeficientes sísmicos de cortante en la base fueron incrementados, se adoptaron restricciones sumamente drásticas para los valores de la adherencia entre el suelo y los pilotes de fricción. En algunos casos como los edificios de oficina se elevaron los valores de las cargas vivas de diseño.

La posibilidad de adoptar valores de reducción por ductilidad de  $Q=6$  se eliminó y el valor máximo permitido fue  $Q=4$ , para el cual los requisitos de detallado de las estructuras de concreto fueron aún más estrictos que los marcados para el anterior  $Q=6$ , con esto último se buscó mejorar el trabajo y el confinamiento del concreto con el acero de refuerzo.

#### 1. Análisis Estático.

El Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal de 1987, establece que “la excentricidad torsional de rigideces calculada en cada entrepiso,  $e_s$ , se tomará como la distancia entre el centro de torsión (CT) del nivel correspondiente y la posición de la fuerza cortante en dicho nivel (CC)”.

“Se define la excentricidad de resistencia al corte,  $e_r$ , como la distancia entre el centroide de las resistencias (CR) de todos los elementos resistentes ante fuerza cortante en el entrepiso que se considera y la línea de acción de la fuerza cortante en ese nivel”.

En estructuras para las que el factor de comportamiento sísmico,  $Q$ , sea igual a 3 se establece lo siguiente: “se suministrarán resistencias tales que el CR se halle del mismo lado de la fuerza cortante que el CT y  $e_r$  no sea menor que  $e_s - 0.2 b$ ”; si  $Q$  excede de 3 se menciona lo siguiente: “se suministrarán resistencias tales que el CR se halle del mismo lado de la fuerza cortante que el CT y  $e_r$  no sea menor que  $e_s - 0.1 b$ ”, en donde  $b$  es la dimensión de la planta que se considera medida en la dirección de  $e_r$  y  $e_s$ .

Para fines de diseño, el momento torsionante en el entrepiso se tomará por lo menos igual a la fuerza cortante de entrepiso multiplicada por la excentricidad de diseño que para cada marco o muro resulte más desfavorable de las siguientes:

$$1.5 e_s + 0.1 b \quad \text{ó} \quad e_s - 0.1b.$$

Además, la excentricidad de diseño en cada sentido no se tomará menor que la mitad del máximo valor de  $e_s$  calculado para los entrepisos que se hallan abajo del que se considera, ni se tomará el momento torsionante de ese entrepiso menor que la mitad del máximo calculado para los entrepisos que están arriba del considerado.

## 2. Análisis Dinámico.

Para el análisis dinámico se establece que "Si se usa el análisis modal, deberá incluirse el efecto de todos los modos naturales de vibración con período mayor o igual a 0.4 seg, pero en ningún caso podrán considerarse menos que los tres primeros modos de traslación en cada dirección de análisis. Puede despreciarse el efecto dinámico torsional de excentricidades estáticas. En tal caso, el efecto de dichas excentricidades y de la excentricidad accidental se calculará como lo especifica el artículo correspondiente al análisis estático. Las respuestas modales  $S_i$  (donde  $S_i$  puede ser fuerza cortante, desplazamiento lateral, momento de volteo, etc.), se combinarán para calcular las respuestas totales  $S$  de acuerdo con la expresión:

$$S = \sqrt{\sum S_i^2}$$

Siempre que los períodos de los modos naturales en cuestión difieran al menos 10% entre sí. Para las respuestas en modos naturales que no cumplen esta condición se tendrá en cuenta el acoplamiento entre ellos".

## Comentarios

En la definición de excentricidad estática se presenta una confusión en el manejo de la terminología ya que en el nivel se supone que actúan fuerzas sísmicas y no fuerzas cortantes.

Otra confusión notable es la redacción para considerar  $e_r$  relativa a la ubicación que debe tener el CR y sus valores mínimos correspondientes para  $Q=3$  y  $Q=4$ ; esta recomendación tiene como objetivo localizar al CR, entre el CT y el CC; las expresiones que se proponen para el valor de  $e_r$  pretenden acercar el CR al CT, lo cual implicaría que se tengan distribuciones de resistencias al corte, semejantes a las de rigideces. Otra característica de estas ecuaciones es que para estructuras de mayor ductilidad ( $Q=4$ ), el CR se debe localizar todavía más cercana al CT que estructuras menos dúctiles ( $Q=3$ ).

En las fig. 5.1 se presenta la variación de la  $e_r$  respecto a  $e_s$  normalizadas respecto a la dimensión de la planta perpendicular a la dirección sísmica; el caso 1 corresponde a una excentricidad estática positiva y  $Q=4$ , el caso 2 corresponde a una excentricidad estática negativa y  $Q=4$  con valor absoluto de  $e_r/b$ , el caso 3 corresponde a una excentricidad estática positiva y  $Q=3$ , finalmente el caso 4 corresponde a una excentricidad estática negativa y  $Q=3$  con valor absoluto de  $e_r/b$ . De esta figura se aprecia que para modelos simétricos en rigideces, se exige una distribución no simétrica en resistencias, lo cual es incongruente. Tampoco se establece convención de signos alguna que permita considerar valores positivos o negativos de  $e_s$ , lo cual debería suceder si se cambia la ubicación del centro de torsión hacia el extremo contrario de la planta, en donde si se considera que ahora  $e_s$  es negativo, podrían encontrarse valores de  $e_r$  localizados fuera de la planta (Ver fig. 5.2). Es importante comentar que esta discusión se basa en el hecho de que los edificios poseen distribuciones simétricas en masas, es decir el centro de masas (CM) y por tanto el centro de cortante (CC) se localizan en el centro geométrico de la planta.

En la parte correspondiente al análisis dinámico no indica de que manera se van a considerar en este tipo de análisis las excentricidades accidentales y propone de manera alternativa que se proceda como lo hace el análisis estático.

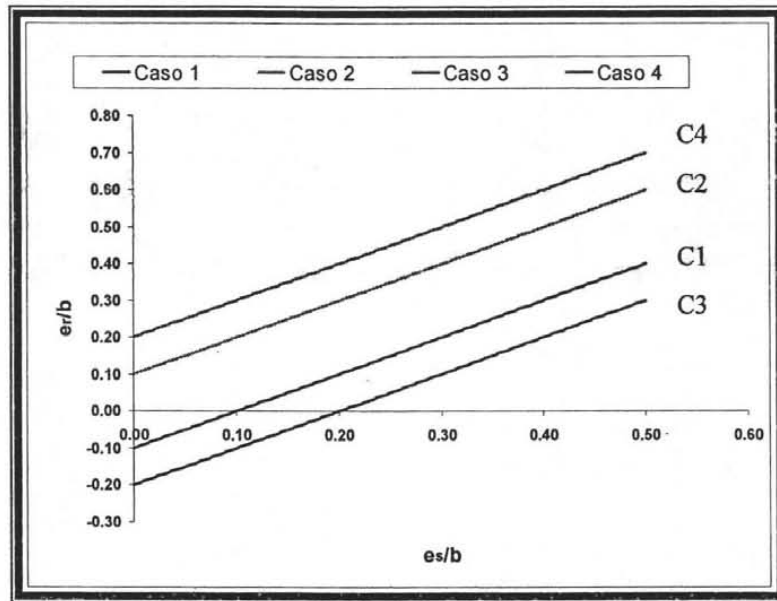


Fig. 5.1 Excentricidad estática ( $e_s$ ) vs. Mínimo valor de Excentricidad resistente al corte ( $e_r$ )

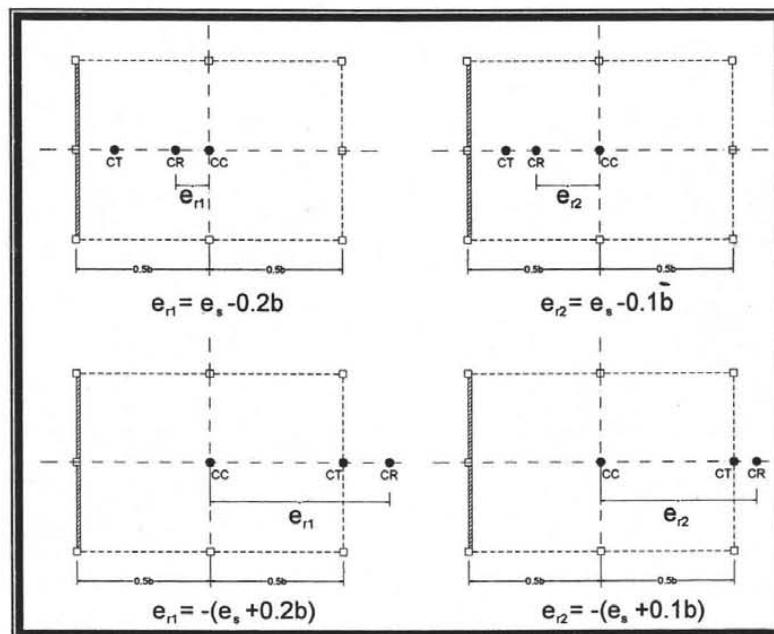


Fig. 5.2 Ubicación del centro de resistencias al corte (CR).

### **2.1.2.7 Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal de 1993.**

Los aspectos esenciales de este reglamento de construcción no tienen modificaciones relevantes con respecto al promulgado en 1987.

### **2.1.2.8 Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal de 2004.**

En la parte correspondiente al diseño por sismo de esta versión del reglamento, se decidió realizar algunos cambios importantes con el fin de representar de manera realista el comportamiento sísmico del suelo donde se sitúan los edificios. La zona III que se manejaba en el anterior reglamento se subdividió en cuatro subzonas, lo que trajo como consecuencia que cambien los valores de los parámetros para calcular los espectros de aceleraciones. Debido a que ahora se tienen más subzonas, se modificaron las expresiones para calcular los espectros de diseño sísmico, el factor de reducción y se implementó el factor de sobrerresistencia. Además se restringió el uso del método sísmico estático a estructuras regulares con alturas no mayores de 30 m y a estructuras irregulares con alturas no mayores de 20 m, para la zona I las limitaciones se amplían a 40 m y 30 m respectivamente.

En el análisis dinámico se intentó considerar de manera más clara la excentricidad accidental, recomendada como un 10% de la dimensión de la base, donde a diferencia del reglamento anterior, solo se mencionaba que se debe calculara como en el análisis estático. En el análisis estático ahora se aplica una restricción al valor de la excentricidad estática, la cual no debe exceder del 20% de la dimensión de la base para estructuras dúctiles ( $Q > 3$ ).

Otro valor restringido es el de la resistencia mínima que deben tener los elementos estructurales, cuyo valor no deberá ser menor al que debe resistir debido a la fuerza cortante directa, ya que al aplicar las excentricidades de diseño, a los elementos más alejados del centro de cortante se suma el cortante debida a la torsión al valor del

cortante directo y en los elementos más cercanos se le resta el valor del cortante debida a la torsión al cortante directo.

Otro cambio significativo se dió en el análisis estático y en el análisis dinámico cuando se consideran los efectos de interacción suelo – estructura. En el análisis estático se establecen expresiones para el cálculo de la fuerza cortante basal, y de los desplazamientos laterales, corregidos por interacción con el suelo. De manera similar para el análisis dinámico modal se establecen expresiones para el cálculo de la fuerza cortante basal corregida por efectos de interacción con el suelo, del período y amortiguamiento efectivo del sistema acoplado suelo estructura. Asimismo se cambiaron las expresiones para el cálculo de las rigideces y amortiguamientos de las cimentaciones someras y de las cimentaciones con pilotes.

A continuación se presenta un resumen de los métodos de análisis sísmico estático y dinámico descritos en el presente reglamento.

### 1. Análisis Estático.

El Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal de 2004, establece para el análisis estático que “la excentricidad torsional de rigideces calculada en cada entrepiso,  $e_s$ , se tomará como la distancia entre el centro de torsión del nivel correspondiente y el punto de aplicación de la fuerza cortante en dicho nivel”.

Para fines de diseño, el momento torsionante se tomará por lo menos igual a la fuerza cortante de entrepiso multiplicada por la excentricidad de diseño que para cada marco o muro resulte más desfavorable de las siguientes:

$$1.5e_s+0.1b \quad \text{ó} \quad e_s-0.1b;$$

donde  $b$  es la dimensión de la planta que se considera, medida perpendicularmente a la acción sísmica.

Además la excentricidad de diseño en cada sentido no se tomará menor que la mitad del máximo valor de  $e_s$  calculado para los entrepisos que se hallan abajo del que se

considera, ni se tomará el momento torsionante de ese entrepiso menor que la mitad del máximo calculado para los entrepisos que están arriba del considerado.

En estructuras para las que el factor de comportamiento sísmico sea mayor o igual a 3, en ningún entrepiso la excentricidad estructural calculada estáticamente deberá exceder de  $0.2b$ .

Ningún elemento estructural tendrá una resistencia menor que la necesaria para resistir la fuerza cortante directa.

## 2. Análisis Dinámico.

Para el análisis dinámico, el efecto de la torsión accidental se tendrá en cuenta trasladando transversalmente  $\pm 0.1b$  las fuerzas sísmicas resultantes para cada dirección de análisis, considerando el mismo signo en todos los niveles.

Las respuestas modales  $S_i$  (donde  $S_i$  puede ser fuerza cortante, desplazamiento lateral, momento de volteo, etc.), se combinarán para calcular las respuestas totales  $S$  de acuerdo con la expresión

$$S = \sqrt{\sum S_i^2}$$

Siempre que los períodos de los modos naturales en cuestión difieran al menos 10% entre sí. Para las respuestas en modos naturales que no cumplen esta condición se tendrá en cuenta el acoplamiento entre ellos.

Los desplazamientos laterales así calculados, y multiplicados por el factor de comportamiento sísmico  $Q$ , se utilizarán para determinar los efectos de segundo orden y para verificar que la estructura no excede los desplazamientos máximos establecidos en el presente reglamento.



## **Comentarios**

En la definición de excentricidad torsional sigue existiendo una confusión en el manejo de la terminología ya que en el nivel se supone que actúan fuerzas sísmicas y no fuerzas cortantes, ya que estas actúan en el entrepiso.

Para esta versión se trata de simplificar la manera como se debe considerar el efecto de la torsión accidental en el análisis dinámico, pero no establece de manera clara el signo que se debe utilizar en el análisis, tampoco considera el realizar análisis donde se trasladen de manera simultánea las fuerzas sísmicas en las dos direcciones de análisis para determinar el más desfavorable. Asimismo, una vez calculados los modos y sus respectivas respuestas, al realizar la combinación modal mediante la raíz de la sumatoria de los cuadrados, el efecto provocado por la torsión accidental se pierde en la respuesta total.

### **CAPÍTULO III. METODOLOGÍAS PARA CONSIDERAR EFECTOS DE TORSIÓN CON BASE EN EL MÉTODO SISMICO ESTÁTICO.**

En este capítulo se presentan y comentan algunos aspectos relevantes de tres métodos estáticos para el análisis sísmico y distribución de fuerzas cortantes considerando los efectos de torsión que se especifican en el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias para diseño por sismo (RCDF-NTCS-2004), con el fin de determinar que metodología podría ser más adecuada para cumplir con estas normas, además se presenta como un antecedente de estos tres métodos la metodología presentada por Bazán para edificios con sistemas resistentes ortogonales. Se considera el uso de programas comerciales ó la posibilidad de implementarlos en un programa de cómputo.

El primer método presentado es el propuesto por el Ing. Julio Damy (Alcocer, 1986), el cual se basa en la sistematización de los principios del análisis estructural matricial a la normatividad vigente, mediante algoritmos numéricos simples que permiten obtener el nivel de asimetría de una estructura.

El segundo método presentado es el propuesto por Goel (Zárate, 2002) , basado en una combinación lineal de varias condiciones de análisis (traslación y rotación), en el cual es posible incluir la normatividad debida a los efectos de torsión, sin necesidad de calcular el nivel de asimetría.

Finalmente se comenta un tercer método llamado Procedimiento Simplificado de Diseño (PSD), desarrollado por Escobar, Mendoza y Gómez (2004). Este método calcula las fuerzas de diseño de los elementos con un solo análisis de la estructura tridimensional. La aplicación de la normatividad se lleva acabo con algunos parámetros derivados de la distribución de fuerzas cortantes resultantes de este análisis.

### 3.1 Filosofía de diseño del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias para diseño por sismo.

El RCDF-NTCS-2004, permite diseñar estructuras que, al ser sometidas a sismos intensos, deberán resistir deformaciones inelásticas significativas sin perder su capacidad de carga. Para edificios asimétricos, las deformaciones provienen de la traslación y rotación de sus entrepisos y no deben exceder los límites establecidos para los desplazamientos laterales, a saber  $0.006$  de  $\Delta/h$  y  $0.012$  de  $\Delta/h$ , donde  $\Delta$  es el desplazamiento lateral relativo entre los dos niveles que limitan el entrepiso considerado y  $h$  la altura del entrepiso, según las condiciones de estructuración y/o separación de elementos no estructurales del sistema principal.

Una respuesta inelástica satisfactoria de un edificio ante la acción de un sismo intenso, depende en gran parte del buen comportamiento que tengan los elementos que lo componen, los cuales deben estar adecuadamente unidos al sistema. Debido a lo anterior, el RCDF emite lineamientos muy estrictos para el diseño de las conexiones, con objeto de que las estructuras obtengan la mayor ductilidad posible. Con base en lo anterior, el RCDF permite reducir las fuerzas elásticas de diseño mediante factores de comportamiento sísmico  $Q$ , conforme se aumenta la capacidad del sistema estructural para deformarse inelásticamente ante fuerzas laterales alternantes sin perder su capacidad de carga. El factor  $Q$  depende del tipo de sistema estructural que suministra la resistencia a fuerzas laterales y del detallado del acero de refuerzo que se realice; estos valores de  $Q$  van de 1 para estructuras poco dúctiles, hasta 4 para las estructuras con gran ductilidad.

## 3.2 Método Sísmico Estático.

### 3.2.1 Descripción del Método Sísmico Estático.

El modelado de edificios convencionales sometidos a la acción de cargas laterales acepta como una hipótesis importante que las losas de los niveles consideren como diafragmas de piso infinitamente rígidos en su plano, cuyo comportamiento puede ser estudiado, con razonable precisión, en función de tres grados de libertad: dos traslaciones en el plano del nivel ( $u$  y  $v$ ) y una rotación alrededor de un eje vertical ( $\theta$ ), asociados al movimiento de un nudo maestro sobre el cual se concentra toda la masa del nivel (centro de masa del nivel, CM).

El método sísmico estático, es un procedimiento simplificado de análisis que considera la acción de fuerzas laterales sobre una estructura, equivalentes a las fuerzas de inercia que se generan por efectos dinámicos en los edificios. La distribución de cargas laterales que emplea el método sísmico estático, se asemeja a la producida por el primer modo de vibrar. Esta consideración hace necesario que las estructuras o edificios que se analicen con este método, estén gobernados dinámicamente por este primer modo de vibrar. Para ello se requiere que las estructuras posean características de regularidad tanto en planta como en elevación y particularmente el RCDF-NTCS-2004 estipula que no deben rebasar una altura de 30 m y 20 m para estructuras irregulares; adicionalmente se requiere que la masa esté uniformemente distribuida en el nivel.

Las fuerzas laterales que propone el método sísmico estático, se calculan mediante la siguiente expresión:

$$F_i = \frac{cW(w_i h_i)}{Q' \sum (w_i h_i)} \quad \text{ec. 3.1}$$

Donde:

- $c$  es la ordenada máxima del espectro de diseño para la zona donde se ubique la estructura.
- $Q'$  es el factor de comportamiento sísmico que permite reducir las fuerzas sísmicas en función de la capacidad de deformación del sistema estructural propuesto.
- $W$  el peso total de la estructura.
- $w_i$  el peso de cada nivel.
- $h_i$  es la altura del nivel con respecto a la base.

El análisis estático presenta diferencias respecto al análisis dinámico tridimensional, dichas diferencias se deben principalmente a una amplificación dinámica de los momentos torsionantes en los niveles. Para considerar este efecto, el análisis estático incluye un factor de amplificación de la excentricidad estática, que incrementa el momento y por tanto el valor de las fuerzas de diseño. Por otro lado, en ambos métodos se deben incluir las torsiones denominadas accidentales, resultantes de las incertidumbres que pueden ocasionar efectos de torsión no considerados en el análisis. Entre las incertidumbres más comentadas en la literatura especializada están la asociada a la distribución de masas y rigideces que se tienen cuando se realiza el diseño y otras fuentes de torsión difíciles de tomar en cuenta, como son las rotaciones en la base producidas por la variación espacial del movimiento del terreno, entre otras.

### **3.2.1.1 Aplicación de la Normatividad del Diseño Sísmico por torsión empleando el método presentado por Bazán.**

La aplicación de la normatividad de diseño por torsión, empleando el método estático, para definir la distribución de fuerzas cortantes en los elementos resistentes de un edificio con marcos ortogonales, puede realizarse mediante el desacoplamiento de los efectos de traslación y torsión, de acuerdo a la metodología propuesta por Bazán (Bazán y Meli, 2001). Los primeros generan fuerzas cortantes proporcionales a las

rigideces de los elementos del entrepiso. Por otro lado, el cortante debido a la torsión sísmica (natural), se produce por un momento que es función de la fuerza sísmica aplicada en el nivel y de la excentricidad estática en cada nivel.

La fuerza cortante total sobre un elemento resistente es igual a la suma de los dos efectos, el debido al cortante directo y el causado por el momento torsionante.

$$V_i = V_d + V_t \quad \text{ec. 3.2}$$

Para los elementos resistentes x, el cortante directo se calcula por estática con la siguiente expresión:

$$V_{dx} = \frac{V_x R_{jx}}{\sum R_{jx}} \quad \text{ec. 3.3}$$

Para los elementos resistentes x, el cortante debido al efecto de torsión se calcula con la siguiente expresión:

$$V_{tx} = \frac{M_t R_{jx} y_{jt}}{\left( \sum R_{jx} y_{jt}^2 + \sum R_{jy} x_{jt}^2 \right)} \quad \text{ec. 3.4}$$

donde:

- $M_t$  es el momento torsionante de diseño.
- $R_{jx}$  son las rigideces de entrepiso
- $V_x$  es el cortante en el entrepiso considerado en la dirección X
- $(X_{jt}, y_{jt})$  son las distancias del elemento resistente j al respectivo centro de torsión

El momento torsionante resulta del producto de la fuerza cortante por la excentricidad estructural ( $e_s$ ), que se define como la distancia entre el Centro de Torsión, CT ( $X_{CTj}, Y_{CTj}$ ), y el punto por donde pasa la fuerza cortante sísmica en el entrepiso,  $V_i$ , a éste último se le conoce como Centro de Cortante, CC ( $X_{CCj}, Y_{CCj}$ ). El RCDF-NTCS-2004 estipula que el momento torsionante se calcule utilizando excentricidades de diseño obtenidas con las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} ed_1 &= \alpha e_s + \beta b \\ ed_2 &= \delta e_s - \beta b \end{aligned} \quad \text{ec. 3.5}$$

Donde:

- $\alpha$  y  $\delta$ , son factores que modifican a la excentricidad estructural y son calibrados de tal modo que se obtenga una concordancia razonable entre el análisis estático equivalente especificado por el código y un análisis dinámico. También se les conoce como factor de amplificación dinámica.
- $e_s$ , es la excentricidad estática o estructural dada como la diferencia entre el centro de torsión y el punto de aplicación de la fuerza lateral.
- $\beta$ , es el coeficiente de torsión accidental que trata de tomar en cuenta la certidumbre en resistencias y rigideces de los elementos, rotaciones en la base, etc.
- $b$ , es la dimensión mayor de la planta del edificio medida en dirección perpendicular a la dirección del sismo considerado.

Para el caso de las NTCS-2004, los factores  $\alpha$ ,  $\delta$  y  $\beta$  tienen valores de 1.5, 1.0 y 0.1 respectivamente.

### 3.2.2 Obtención de la matriz de rigidez global del edificio.

El análisis estructural de un sistema complejo como el caso de un edificio tiene su base en las mismas hipótesis que se emplean para el análisis de sistemas simples, es decir, se parte de los tres principios fundamentales: Continuidad, Ley de Hooke y Equilibrio. Por lo tanto, la relación entre las fuerzas sísmicas  $\{F\}$  y los desplazamientos de los niveles de un edificio  $\{d\}$ , se expresa mediante la ecuación de equilibrio lateral (Islas, 2003).

$$\{F\} = [K_G]\{d\} \quad \text{ec. 4.1}$$

Donde  $[K_G]$  es la matriz de rigidez general o global del edificio.

### 3.2.2.1 Matriz de rigidez global de un edificio.

La matriz de rigidez global de un edificio se obtiene de manera similar a como se hace para el caso de sistemas estructurales simples (armaduras, marcos, etc.), es decir, se realiza la siguiente metodología (Islas, 2003):

- 1 Se aplican desplazamientos unitarios independientes en dirección de los grados de libertad existentes o considerados.
- 2 Para cada desplazamiento aplicado se obtienen las fuerzas o rigideces en todos los elementos estructurales del sistema.
- 3 Se proyectan las fuerzas de todos los elementos en las direcciones de los grados de libertad.

### 3.2.2.2 Matriz de rigidez lateral

Los desplazamientos unitarios de la losa son aplicados en dirección de  $u$ ,  $v$ ,  $\theta$ , lo que nos permite obtener las deformaciones inducidas sobre los marcos al proyectarlos sobre sus ejes. Conocida la deformación que sufre el marco en sus niveles y su respectiva matriz de rigidez lateral  $[K_D]$ , es posible calcular las fuerzas originadas por estos desplazamientos unitarios. Para obtener su participación a la matriz de rigidez global de la estructura, es necesario proyectar la fuerza obtenida en cada marco, en dirección de cada uno de los grados de libertad del nivel (Islas, 2003).

### 3.2.2.3 Submatrices de la matriz de rigidez global.

La matriz de rigidez global del edificio  $[K_G]$ , se puede dividir en una serie de submatrices que muestran la relación que existe entre las fuerzas sísmicas y los desplazamientos de la losa en una dirección particular, es decir:



$$[K_G] = \begin{bmatrix} [K_{xx}] & [K_{xy}] & [K_{x\theta}] \\ [K_{yx}] & [K_{yy}] & [K_{y\theta}] \\ [K_{\theta x}] & [K_{\theta y}] & [K_{\theta\theta}] \end{bmatrix} \quad \text{ec. 3.7}$$

Si los desplazamientos  $u$ ,  $v$ ,  $\theta$  que se aplican son unitarios, siguiendo el procedimiento descrito podemos determinar cada una de las submatrices que forman  $[K_G]$ .

De lo descrito anteriormente podemos obtener cada submatriz con las siguientes expresiones:

$$[K_{xx}] = \sum [K_D]_j \cos^2 \beta_j \quad \text{ec. 3.8}$$

$$[K_{xy}] = [K_{yx}]^T = \sum [K_D]_j \cos \beta_j \text{sen} \beta_j \quad \text{ec. 3.9}$$

$$[K_{x\theta}] = [K_{\theta x}]^T = \sum [K_D]_j \cos \beta_j r_j \quad \text{ec. 3.10}$$

$$[K_{yy}] = \sum [K_D]_j \text{sen}^2 \beta_j \quad \text{ec. 3.11}$$

$$[K_{y\theta}] = [K_{\theta y}]^T = \sum [K_D]_j \text{sen} \beta_j r_j \quad \text{ec. 3.12}$$

$$[K_{\theta\theta}] = \sum [K_D]_j r_j^2 \quad \text{ec. 3.13}$$

$$r_j = X_j * \text{sen} \beta_j - Y_j * \cos \beta_j \quad \text{ec. 3.14}$$

Donde:

$(X_j, Y_j)$  son las coordenadas de un punto del marco.

$\beta$  es el ángulo del marco con respecto al eje X global.

### 3.2.2.4 Método matricial de Damy.

El Método matricial de Damy (Alcocer, 1986), se basa en la hipótesis de que no existe rotación en los niveles del edificio, además de la utilización de la ecuación de equilibrio

lateral de la estructura. Se realizan análisis independientes en dos direcciones ortogonales para obtener las coordenadas del Centro de Rigidez en el nivel (CR).

Para un sismo en x:

$$\{F\} = \{F_x\}; \{F_y\} = \{0\}; \theta = 0 \quad \text{ec. 3.15}$$

De igual manera, para un sismo en y:

$$\{F\} = \{F_y\}; \{F_x\} = \{0\}; \theta = 0 \quad \text{ec. 3.16}$$

De esta forma, al aplicar un estado de carga lateral cualquiera en la dirección "X", la ecuación de equilibrio lateral nos queda de la siguiente manera.

$$\begin{bmatrix} [K_{xx}] & [K_{xy}] & [K_{x\theta}] \\ [K_{yx}] & [K_{yy}] & [K_{y\theta}] \\ [K_{\theta x}] & [K_{\theta y}] & [K_{\theta\theta}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{u\} \\ \{v\} \\ \{\theta = 0\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{F_x\} \\ \{F_y = 0\} \\ \{M\} = \{-F_x Y_{CR}\} \end{bmatrix} \quad \text{ec. 3.17}$$

Donde,  $\{F_x\}$  es el vector de fuerzas laterales en los niveles.

Al desarrollar los productos matricialmente, se obtiene:

$$\left. \begin{aligned} [K_{xx}]\{u\} + [K_{xy}]\{v\} &= \{F_x\} \\ [K_{yx}]\{u\} + [K_{yy}]\{v\} &= \{0\} \\ [K_{\theta x}]\{u\} + [K_{\theta y}]\{v\} &= [-F_x]\{Y_{CR}\} = \{M\} \end{aligned} \right\} \quad \text{ec. 3.18}$$

Al resolver el sistema de ecuaciones formado por las dos primeras ecuaciones, logramos obtener los vectores de desplazamientos  $\{u\}$  y  $\{v\}$ . Por otra parte sabemos que la ecuación para obtener el vector de momentos es:

$$\{M\} = [K_{\theta x}]\{u\} + [K_{\theta y}]\{v\} \quad \text{ec. 3.19}$$

Por estática sabemos también que  $M_{O_i} = -F_{x_i} Y_{CRi}$ .

Por lo tanto:

$$Y_{CRi} = \frac{-M_{O_i}}{F_{x_i}} \quad \text{ec. 3.20}$$

De manera análoga:

$$X_{CRi} = \frac{M_{O_i}}{F_{y_i}} \quad \text{ec. 3.21}$$

De esta manera logramos obtener cada uno de los centros de rigidez en los niveles de todo el edificio. Una vez calculados los CR en los niveles del edificio ( $X_{CRi}$ ,  $Y_{CRi}$ ), por estática podemos obtener los centros de torsión de los entresijos (CT), al aplicar las siguientes expresiones.

$$X_{CTi} = \frac{\sum_{i=1}^{\text{No. Niveles}} (F_i * X_{CRi})}{V_i} \quad \text{ec. 3.22}$$

$$Y_{CTi} = \frac{\sum_{i=1}^{\text{No. Niveles}} -(F_i * Y_{CRi})}{V_i} \quad \text{ec. 3.23}$$

En cualquier edificio se puede demostrar que este punto definido en el nivel o entresijo es el centro de torsión, si al aplicar las fuerzas laterales en dicho punto, el edificio solamente experimenta desplazamientos traslacionales.

### 3.2.3 Cálculo del centro de torsión utilizando programas comerciales.

Una vez obtenida la distribución de fuerzas en los niveles del edificio mediante el método sísmico estático, para aplicar las normas por torsión, se realiza ahora un análisis de la estructura utilizando programas de análisis, los cuales no calculan de forma directa los centros de torsión, por lo tanto se requiere aplicar una metodología detallada tomando direcciones independientes de análisis (Miranda, (2004), como se describe enseguida:

- a) Siguiendo la hipótesis del método sísmico estático (MSE), los sistemas de piso del edificio se modelan como diafragmas infinitamente rígidos en su plano. Luego se analiza la estructura con el vector de fuerzas sísmicas laterales calculadas con el MSE, permitiendo solo la traslación. Es importante mencionar que si los marcos no son ortogonales en planta, la traslación de los niveles podrá presentarse en dos direcciones horizontales perpendiculares.
- b) La respuesta que interesa del análisis realizado es la fuerza cortante de los elementos estructurales del entrepiso para poder obtener la fuerza cortante total de cada plano de resistencia.
- c) Ahora se calcula el momento que genera cada plano resistente del entrepiso que esté ubicado en dirección paralela al del análisis, tomando preferentemente como punto de referencia el origen de coordenadas. Finalmente, para cada entrepiso, se divide el momento total del entrepiso y se divide entre la fuerza cortante total que actúa en el entrepiso para obtener la posición del centro de torsión en el entrepiso correspondiente.

### 3.2.4 Cálculo de los momentos torsionantes conforme a las NTCDS - 2004.

Los efectos de torsión en el análisis sísmico estático de un edificio, tal y como lo establecen las NTCDS 2004, requieren del cálculo de un momento torsionante en el entrepiso. A continuación se presenta una metodología para el cálculo del momento torsionante en el entrepiso, tomando como ejemplo la aplicación de la fuerza sísmica en dirección Y. Se utiliza esta misma metodología cuando se aplica para la fuerza sísmica en dirección X (Miranda, 2004).

1 ) Se calcula la excentricidad estructural utilizando las siguiente expresión:

$$e_s = X_{CC} - X_{CT} \quad \text{ec. 3.24}$$

donde:

$X_{CC}$  es el punto de aplicación de la fuerza cortante sísmica.

$X_{CT}$  es la ordenada del centro de torsión en el entrepiso.

2 ) Se calculan las 2 excentricidades de diseño utilizando las ecuaciones

$$e_{d1} = 1.50e_s + 0.10b \quad \text{ec. 3.25}$$

$$e_{d2} = e_s - 0.10 b \quad \text{ec. 3.26}$$

3 ) Se calculan las nuevas posiciones del centro de cortante (CC) para cada entrepiso, aplicando las ecs.:

$$X_{CC1} = X_{CT} \pm e_{d1} \quad \text{ec. 3.27}$$

$$X_{CC2} = X_{CT} \pm e_{d2} \quad \text{ec. 3.28}$$

4 ) Posteriormente, se evalúa la magnitud del momento torsionante de diseño, M, en cada entrepiso, para lo cual, es conveniente calcular dicho momento referido al origen de coordenadas:

$$M_{1 \text{ entrepiso}} = (V_y) ( X_{CC1} ) \quad \text{ec. 3.29}$$

$$M_{2 \text{ entrepiso}} = (V_y) ( X_{CC2} ) \quad \text{ec. 3.30}$$

Se requiere ahora transportar hacia los niveles los momentos de diseño obtenidos en los entrepisos j; y de ésta manera, obtener las nuevas coordenadas de los CM de los

niveles  $i$  del edificio. El procedimiento descrito se debe efectuar para las excentricidades de diseño  $e_{d1}$  y  $e_{d2}$ , así como de forma independiente, para cada dirección principal de análisis.

5 ) Se calculan los momentos de diseño en el  $i$ -ésimo nivel:

$$M_{1 \text{ nivel } i} = M_{1 \text{ entrepiso } j} - M_{1 \text{ entrepiso } j+1} \quad \text{ec. 3.31}$$

$$M_{2 \text{ nivel } i} = M_{2 \text{ entrepiso } j} - M_{2 \text{ entrepiso } j+1} \quad \text{ec. 3.32}$$

Para el análisis de la estructura, se puede sustituir el valor del momento aplicado en un nivel, por el movimiento de la fuerza sísmica a una distancia  $X_v$ , ver fig. 3.1.

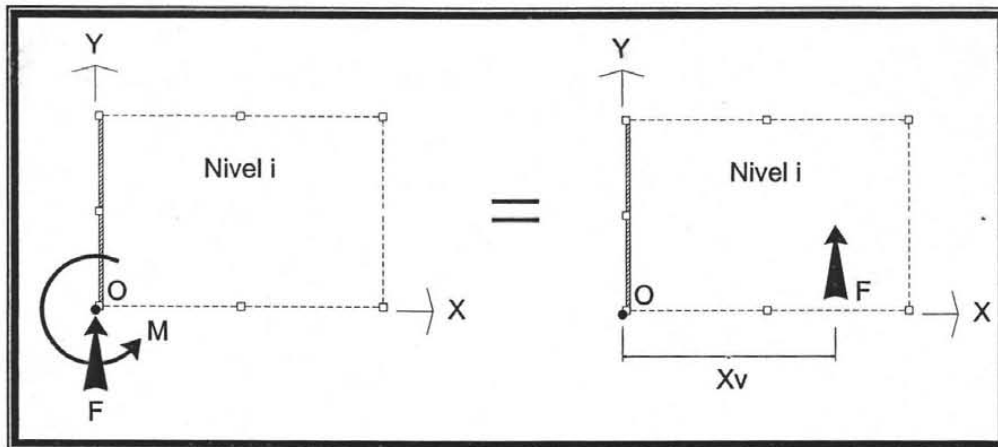


Fig. 3.1 Sistemas estáticamente equivalentes.

El análisis de la normatividad por torsión del RCDF-NTCS 2004. cuando se emplea el método sísmico estático se hace en el entrepiso, sin embargo, se puede demostrar por estática que, se obtienen los mismos resultados si se hacen directamente en los niveles utilizando las coordenadas del centro de rigidez (CR) y del centro de masa (CM) en el nivel. Los momentos efectivos en los niveles son los mismos que los obtenidos haciendo el análisis en el entrepiso.

Es común que en la práctica no se llegue a determinar y sea prácticamente imposible identificar cual es la condición de momentos torsionantes más desfavorable tomando en cuenta el gran número de combinaciones que podrían presentarse en función de las excentricidades de diseño en todos los entrepisos.

### 3.3 Método de Goel

#### 3.3.1 Descripción del Método de Goel.

A diferencia del método anterior, este método está basado en la combinación lineal de respuestas, obtenidas de la realización de tres análisis estáticos con diferentes condiciones de carga y grados de libertad de los centros de masas. La principal ventaja que ofrece la utilización de este método es que se pueden calcular las fuerzas de diseño considerando la normatividad por torsión vigente, sin calcular los centros de rigideces del nivel, sin embargo, no es posible evaluar algunos aspectos complementarios de las NTCS-2004, referentes al nivel de asimetría y/o distribución y comparación de momentos en niveles consecutivos.

#### 3.3.2 Desarrollo del Método de Goel.

Como se mencionó en el párrafo anterior, se requiere realizar tres análisis estáticos para cada una de sus direcciones ortogonales, las características de cada análisis se describen a continuación:

Para el primer análisis es necesario que las fuerzas laterales ( $F_j$ ), se apliquen en el centro de masa de cada nivel, permitiendo únicamente movimiento de traslación en la dirección de carga (A). En el segundo análisis se debe aplicar la carga ( $F_j$ ), en el centro de masas de cada nivel, permitiendo traslación y rotación de los niveles (B). Para el tercer y último análisis se aplica un momento debido a la excentricidad accidental ( $M_i = 0.1bF_j$ ) en el centro de masas del nivel (C). Una vez obtenidas las respuestas de los tres análisis descritos anteriormente, se procede a combinarlas utilizando la siguiente expresión:

$$R = A + \gamma(B - A) \pm C \quad \text{ec. 3.33}$$

Donde  $\gamma$  es el coeficiente de amplificación dinámica, que de acuerdo con el Reglamento de Construcciones del DF (2004), tiene dos valores (1.5 y 1.0), por lo tanto la ecuación anterior queda como sigue:

$$R_1 = A + 1.5(B - A) \pm C \quad \text{ec. 3.34}$$

$$R_2 = A + (B - A) \pm C \quad \text{ec. 3.35}$$

Se deberá considerar el signo a utilizar para la respuesta C (que incluye la excentricidad accidental), de acuerdo con los siguientes lineamientos:

Si  $A < B$ , entonces, el signo de C será el que incremente la suma de los primeros dos términos en  $R_1$  y que reduzca la suma de los primeros dos términos  $R_2$ .

Si  $A > B$ , entonces, el signo de C será el que incremente la suma de los dos primeros términos en  $R_2$  y que reduzca  $R_1$ .

Finalmente se tomará como la respuesta necesaria para el diseño del edificio a la que presenta mayores valores entre  $R_1$  y  $R_2$  (Zárate, 2002).



### 3.4 Diseño simplificado por torsión sísmica estática.

Se presenta el Procedimiento Simplificado de Diseño (PSD), propuesto por Escobar, Mendoza y Gómez (2004), para el cálculo de las respuestas en los elementos estructurales considerando los efectos de torsión de acuerdo a la normatividad vigente. El PSD se basa en la hipótesis de considerar el efecto torsionante en las fuerzas de diseño de los elementos estructurales, mediante la multiplicación de los valores de las fuerzas en los elementos estructurales, producidas por los cortantes directos en los elementos estructurales, por un Factor de Amplificación por Torsión (FAT). Para lograr lo anterior el método solamente ocupa un análisis de la estructura tridimensional en cada una de sus direcciones ortogonales, por lo cual se reducen los cálculos en el diseño por torsión sísmica de edificios.

#### 3.4.1 Procedimiento simplificado para distribuir el cortante por torsión sísmica estática.

Para este procedimiento, es necesario la obtención del Centro de Torsión de entrepiso (CT) mediante la aplicación de la metodología de Damy utilizando programas comerciales descrita en el tema 3.2.3 del presente trabajo.

Una vez obtenidas las coordenadas del CT de cada entrepiso y conociendo las coordenadas del Centro de Cortante de entrepiso (CC) se calcula la excentricidad estructural con la ec. 3.17:

$$e_s = X_{CC} - X_{CT} \quad \text{ec. 3.36}$$

Para los fines de aplicación del método se puede utilizar el valor absoluto de  $e_s$ , ya que los elementos resistentes se clasifican en flexibles si se encuentran del mismo lado del CC si tomamos como frontera las coordenadas del CT, y se consideran como rígidos en el caso contrario, esto con el fin de determinar la formula para hallar el Factor de Amplificación por Torsión a utilizar para cada plano resistente.

Las expresiones para hallar el Factor de Amplificación por Torsión (FAT), de cada elemento resistente de acuerdo a la clasificación descrita en el párrafo anterior son:

Para elementos flexibles:

$$FATf_i = 1 + \frac{\zeta_i}{\rho^2} (0.1 + 1.5e_s) \quad \text{ec. 3.37}$$

Para elementos rígidos:

$$FATr_i = 1 + \frac{\zeta_i}{\rho^2} (0.1 - e_s) \quad \text{ec. 3.38}$$

Donde:

- $\zeta$  es la distancia que hay del elemento resistente hasta el CT ( $x_i$ ,  $y_i$ ), normalizada con respecto a la base del edificio perpendicular a la dirección del análisis (b).

$$\zeta_i = \frac{x_i}{b} \text{ o } \zeta_i = \frac{y_i}{b} \quad \text{ec. 3.39}$$

- $\rho$  es el radio de giro normalizado, se calcula con la siguiente expresión.

$$\rho = \frac{1}{b} \sqrt{\frac{K_\theta}{\sum k_i}} \quad \text{ec. 3.40}$$

- $K_\theta$  es la rigidez torsional de entrepiso, se calcula con la siguiente expresión.

$$K_\theta = \sum x^2 k_i + \sum y^2 k_i \quad \text{ec. 3.41}$$

- $(x_i, y_i)$  son las coordenadas de i-ésimo elemento estructural, con respecto al centro de torsión en las direcciones ortogonales X, Y respectivamente.
- $k_i$  es la rigidez de los elementos en cada una de las direcciones ortogonales del sistema estructural.

Cabe mencionar que cuando no se tienen los datos para el cálculo de la rigidez torsional de entrepiso, se puede calcular el valor del radio de giro normalizado a partir de los cortantes directos y los desplazamientos correspondientes de entrepiso, obtenidos del análisis estructural realizado para el cálculo del CT. El radio de giro normalizado para cada uno de los ejes ortogonales, X e Y del j-ésimo entrepiso de la estructura se obtiene con las siguientes expresiones.

$$\rho_{xj} = \frac{1}{b_{xj}} \sqrt{\frac{\sum V_{dyi} x_i^2 / dy_j + \sum V_{dxi} y_i^2 / dx_j}{\sum V_{dxi} / dx_j}} \quad \text{ec. 3.42}$$

$$\rho_{yj} = \frac{1}{b_{yj}} \sqrt{\frac{\sum V_{dyi} x_i^2 / dy_j + \sum V_{dxi} y_i^2 / dx_j}{\sum V_{dyi} / dy_j}} \quad \text{ec. 3.43}$$

Donde:

- $b_{xj}$  y  $b_{yj}$  son las dimensiones máximas en planta del entrepiso, perpendiculares a la dirección de excitación sísmica.
- $V_{dxi}$  y  $V_{dyi}$  son los cortantes directos del i-ésimo elemento resistente, obtenidos del análisis estructural estático realizado para obtener los cortantes directos en los elementos estructurales en la aplicación del método de Damy utilizando programas comerciales.
- $dx_j$  y  $dy_j$  son los desplazamientos relativos de entrepiso correspondiente, obtenidos del análisis estructural estático realizado para obtener los cortantes directos en los elementos estructurales en la aplicación del método de Damy utilizando programas comerciales.

Finalmente se obtienen las fuerzas de diseño de los elementos estructurales, multiplicando las fuerzas de los elementos estructurales producidas por los cortantes directos calculados en la obtención del CT, por los correspondientes FAT calculados.

### 3.4.2 Comentarios.

De acuerdo con los resultados presentados por los autores del método (Escobar, Mendoza y Gómez, 2004), la metodología del PSD arroja resultados muy aproximados a los obtenidos mediante la metodología descrita en el tema 3.2, por lo que se puede considerar su utilización al momento de diseñar un edificio.

A pesar de que con este método solo se realiza un análisis estructural para obtener el cortante directo, con el que se calculan las coordenadas del CT de cada entrepiso, tiene el inconveniente de que se realizan demasiados cálculos, tanto para la obtención del radio de giro normalizado de los entrepisos, como para la obtención del FAT para cada elemento, por lo que se pierde la facilidad de uso de este método.

### 3.5 Ejemplo de aplicación de las metodologías para realizar el método sísmico estático.

#### 3.5.1 Descripción del Modelo.

El modelo estudiado es un edificio de oficinas de cuatro niveles, localizado en la zona III ( $c = 0.40$ ), definida de acuerdo a la zonificación geotécnica de la ciudad de México. Este edificio se encuentra estructurado a base de marcos de concreto reforzado ( $Q = 4$ ), con una losa apoyada perimetralmente sobre vigas. Su planta es cuadrada y consta de tres crujeías de 5 metros cada una, en ambas direcciones, tal y como se muestra en la fig. 3.1. Las secciones de las trabes son: 50 x 25 cm. Las columnas tienen dos tipos de secciones, 40 x 40 cm. y 60 x 60 cm., las cuales se mantienen constantes en toda la elevación del edificio. El peso también es constante en todos los niveles con un valor de  $W = 0.80 \text{ ton/m}^2$ .

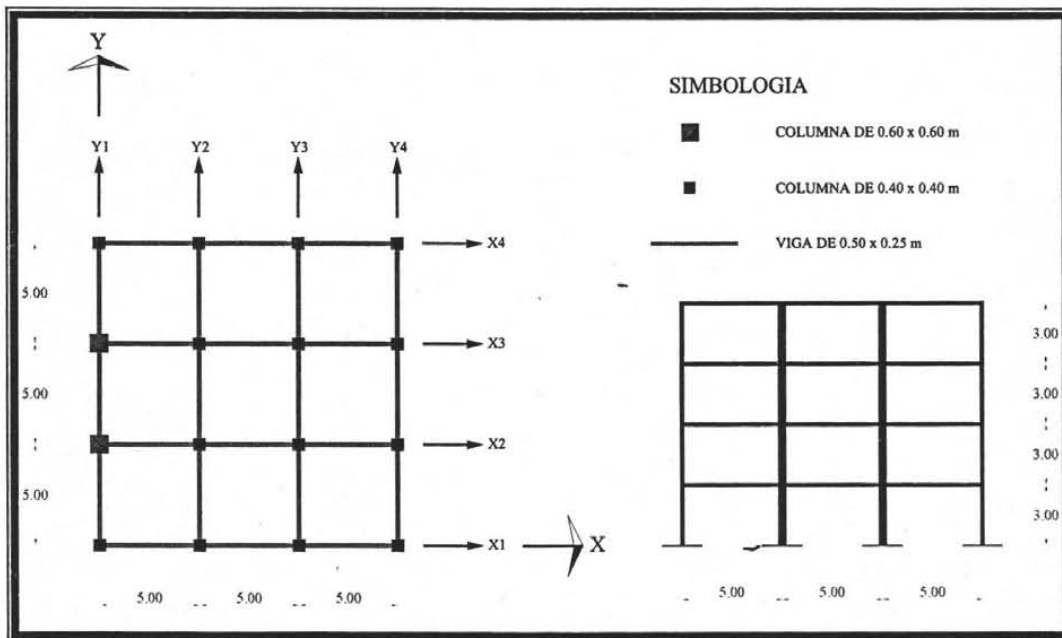


Fig. 3.2 Planta y elevación del modelo utilizado

### 3.5.2 Presentación de Resultados.

#### 3.5.2.1 Resultados del Método de Damy.

Después de realizar el análisis para la obtención del centro de torsión en los entrepisos siguiendo el método de Damy utilizando el programa SAP90, se calcularon los momentos torsionantes en el entrepiso con las excentricidades de diseño de las NTCS-2004.

| Edificio de 15 niveles |               |                   |                |       |       |     |      |      |       |     |      |      |        |        |
|------------------------|---------------|-------------------|----------------|-------|-------|-----|------|------|-------|-----|------|------|--------|--------|
| Nivel                  | Pesos p/nivel | Fuerzas Laterales | CT (Entrepiso) |       | b=    | 15  | Xccj | Θs   | Θd1   | Θd2 | X1   | X2   | Mo1    | Mo2    |
|                        |               |                   | X              | Y     |       |     |      |      |       |     |      |      |        |        |
| 4                      | 180           | 28.80             |                |       |       |     |      |      |       |     |      |      |        |        |
|                        |               |                   | 28.80          | 7.295 | 7.500 | 7.5 | 0.21 | 1.81 | -1.29 |     | 9.10 | 6.00 | 262.16 | 172.80 |
| 3                      | 180           | 21.60             |                |       |       |     |      |      |       |     |      |      |        |        |
|                        |               |                   | 50.40          | 6.787 | 7.500 | 7.5 | 0.71 | 2.57 | -0.79 |     | 9.36 | 6.00 | 471.56 | 302.40 |
| 2                      | 180           | 14.40             |                |       |       |     |      |      |       |     |      |      |        |        |
|                        |               |                   | 64.80          | 6.784 | 7.500 | 7.5 | 0.72 | 2.57 | -0.78 |     | 9.38 | 6.00 | 606.39 | 388.80 |
| 1                      | 180           | 7.20              |                |       |       |     |      |      |       |     |      |      |        |        |
|                        |               |                   | 72.00          | 5.647 | 7.500 | 7.5 | 1.65 | 3.98 | 0.15  |     | 9.83 | 6.00 | 707.51 | 432.00 |

Tabla 3.1 Cálculo de momentos torsionantes aplicando el reglamento.

Si consideramos que los planos flexibles son aquellos a los cuales se le suma el cortante generado por la torsión y planos rígidos a los cuales se les resta este cortante, se determina que el momento más desfavorable para los planos flexibles es el debido a la excentricidad de diseño 1 ( $1.5e_s + 0.1 b$ ), mientras que para los planos rígidos, el momento que produce los cortantes más desfavorables se calculará con la excentricidad de diseño 2 ( $e_s - 0.1b$ ). En la tabla 3.2 se indica la distribución final de fuerzas cortantes para la dirección de análisis "Y".

| Marco de 4 niveles con asimetría de rigideces                            |        |        |        |          |        |        |        |          |        |      |        |          |        |        |    |
|--|--------|--------|--------|----------|--------|--------|--------|----------|--------|------|--------|----------|--------|--------|----|
| Calculo de las fuerzas en los planos resistentes de una estructura en 3D |        |        |        |          |        |        |        |          |        |      |        |          |        |        |    |
| Excentricidad E1   |        |        |        |          |        |        |        |          |        |      |        |          |        |        |    |
| Nivel 1  |        |        |        | y1       | y2     | y3     | y4     | Nivel 2  |        |      |        | y1       | y2     | y3     | y4 |
| x4   | 2.167  | 2.921  | 3.780  | 4.657    | x4     | 2.217  | 2.536  | 3.044    | 3.586  | x3   | 5.563  | 4.223    | 5.152  | 6.079  |    |
| x3   | 7.713  | 3.818  | 4.921  | 6.022    | x2     | 5.563  | 4.223  | 5.152    | 6.079  | x1   | 2.217  | 2.536    | 3.044  | 3.586  |    |
| x2   | 7.713  | 3.818  | 4.921  | 6.022    | Suma   | 19.760 | 13.478 | 17.402   | 21.358 | Suma | 15.560 | 13.518   | 16.392 | 19.330 |    |
| x1   | 2.167  | 2.921  | 3.780  | 4.657    |        |        |        |          |        |      |        |          |        |        |    |
| Suma   | 19.760 | 13.478 | 17.402 | 21.358   |        |        |        |          |        |      |        |          |        |        |    |
| Nivel 3  |        |        |        | y1       | y2     | y3     | y4     | Nivel 4  |        |      |        | y1       | y2     | y3     | y4 |
| x4   | 1.723  | 1.985  | 2.379  | 2.797    | x4     | 1.107  | 1.126  | 1.278    | 1.456  | x3   | 2.039  | 2.116    | 2.462  | 2.815  |    |
| x3   | 4.277  | 3.332  | 4.011  | 4.695    | x2     | 2.039  | 2.116  | 2.462    | 2.815  | x1   | 1.107  | 1.126    | 1.278  | 1.456  |    |
| x2   | 4.277  | 3.332  | 4.011  | 4.695    | Suma   | 6.292  | 6.484  | 7.480    | 8.542  |      |        |          |        |        |    |
| x1   | 1.723  | 1.985  | 2.379  | 2.797    |        |        |        |          |        |      |        |          |        |        |    |
| Suma   | 12.000 | 10.634 | 12.780 | 14.984   |        |        |        |          |        |      |        |          |        |        |    |
| Marco y1   |        |        |        | Marco y2 |        |        |        | Marco y3 |        |      |        | Marco y4 |        |        |    |
| n4   | 6.292  |        |        | n4       | 6.484  |        |        | n4       | 7.480  |      |        | n4       | 8.542  |        |    |
| n3   | 12.000 |        |        | n3       | 10.634 |        |        | n3       | 12.780 |      |        | n3       | 14.984 |        |    |
| n2   | 15.560 |        |        | n2       | 13.518 |        |        | n2       | 16.392 |      |        | n2       | 19.330 |        |    |
| n1   | 19.760 |        |        | n1       | 13.478 |        |        | n1       | 17.402 |      |        | n1       | 21.358 |        |    |

Tabla 3.2 Fuerzas cortantes por nivel obtenidas con el método de Damy.

### 3.5.2.2 Resultados del Método de Goel.

En la tabla 3.3 se presentan los resultados obtenidos con el Método de Goel, en donde se indican por separado los cortantes obtenidos en dirección “Y”.

| Cálculo de cortantes de planos resistentes por el Método de Goel |        |        |        |         |        |          |        |        |        |         |        |
|--|--------|--------|--------|---------|--------|----------|--------|--------|--------|---------|--------|
| Marco Y1   |        |        |        |         |        | Marco Y2 |        |        |        |         |        |
|  | r1     | r2     | r3     | (r2-r1) | r      |          | r1     | r2     | r3     | (r2-r1) | r      |
| n4   | 7.840  | 7.720  | -1.358 | -0.120  | 6.302  | n4       | 6.964  | 6.860  | -0.338 | -0.104  | 6.470  |
| n3   | 16.198 | 14.952 | -2.586 | -1.246  | 11.743 | n3       | 11.374 | 11.160 | -0.462 | -0.214  | 10.591 |
| n2   | 21.054 | 19.486 | -3.384 | -1.568  | 15.318 | n2       | 14.548 | 14.182 | -0.570 | -0.366  | 13.429 |
| n1   | 29.644 | 24.902 | -4.274 | -4.742  | 18.257 | n1       | 14.100 | 13.848 | -0.312 | -0.252  | 13.410 |
| Marco Y3   |        |        |        |         |        | Marco Y4 |        |        |        |         |        |
|  | r1     | r2     | r3     | (r2-r1) | r      |          | r1     | r2     | r3     | (r2-r1) | r      |
| n4   | 6.998  | 7.028  | 0.432  | 0.030   | 7.475  | n4       | 6.998  | 7.192  | 1.268  | 0.194   | 8.557  |
| n3   | 11.414 | 11.820 | 0.840  | 0.406   | 12.863 | n3       | 11.414 | 12.466 | 2.208  | 1.052   | 15.200 |
| n2   | 14.600 | 15.110 | 1.106  | 0.510   | 16.471 | n2       | 14.600 | 16.022 | 2.848  | 1.422   | 19.581 |
| n1   | 14.130 | 15.700 | 1.414  | 1.570   | 17.899 | n1       | 14.130 | 17.548 | 3.172  | 3.418   | 22.429 |

Tabla 3.3 Fuerzas cortantes por nivel obtenidas con el método de Goel.

### 3.5.2.3 Comentarios.

Como se aprecia en los resultados obtenidos, utilizando los dos métodos descritos, los valores de los cortantes en cada plano de resistencia son prácticamente iguales, la diferencia existente se debe al redondeo aplicado en cada cálculo, por lo que se puede decir que el método propuesto por Goel es válido para el cálculo de respuestas que consideran la aplicación de la normatividad por torsión del RCDF-NTCS-2004. Sin embargo, a pesar de que no se tienen que realizar los cálculos para hallar los centros de torsión de los entrepisos, se requiere realizar mucha manipulación de los valores de las respuestas obtenidas de cada análisis para poder llegar a las respuestas de diseño, por lo tanto se pierde la facilidad y rapidez de uso que se pretendía al utilizar esta metodología. Por otra parte, el reglamento vigente especifica requisitos adicionales por torsión para estructuras cuyo factor de comportamiento sísmico  $Q$  sea mayor o igual a 3, donde la excentricidad estructural calculada estáticamente no deberá exceder de  $0.2b$  en ningún entrepiso, mientras que para los demás edificios en ningún entrepiso la excentricidad torsional calculada estáticamente,  $e_s$ , excede del 10% de la dimensión en

planta de ese entrepiso medida paralelamente a la excentricidad mencionada. Además, la excentricidad de diseño en cada sentido no se tomará menor que la mitad del máximo valor de es calculado para los entrepisos que se hallan abajo del que se considera, ni se tomará el momento torsionante de ese entrepiso menor que la mitad del máximo calculado para los entrepisos que están arriba del considerado.

## Conclusiones

Los dos métodos utilizados nos entregan resultados muy aproximados entre si, basándose en la normatividad por torsión vigente, por lo que cualquiera de los dos se puede utilizar para el diseño sísmico estático de edificios. Sin embargo, de acuerdo a lo observado en el desarrollo de este capítulo y tomando en consideración la cantidad de datos a procesar y la facilidad del cálculo para hallar las fuerzas de diseño de los elementos estructurales, se considera que la metodología de cálculo utilizando programas comerciales pasando por la obtención del CT es la más recomendable para aplicar la norma por torsión, sobre todo si se requiere verificar los requisitos adicionales a la aplicación de las excentricidades de diseño, los cuales ya se mencionaron. El método de Goel parecería ser más simple sin embargo, tiene la desventaja de que se tienen que realizar múltiples análisis para considerar los efectos de traslación y torsión, cosa que no se hace con el método recomendado.



## **CAPÍTULO IV. INFLUENCIA DE LA INTENSIDAD Y DISTRIBUCION DE LAS CARGAS VIVAS Y MUERTAS EN EL CÁLCULO DEL CENTRO DE TORSIÓN.**

### **4.1.1 Antecedentes.**

Se ha demostrado que el nivel de asimetría de un edificio no solo es función de las rigideces de los elementos resistentes de entrepiso, sino también de la distribución lateral de cargas aplicadas, las cuales a su vez dependen, entre otros factores, del peso de los niveles (Carga Muerta + Carga Viva). Con base en lo anterior, el objetivo de este capítulo es determinar la influencia de la magnitud y distribución de las cargas muerta y viva en la variación del centro de torsión de entrepiso, con la finalidad de identificar distribuciones espaciales de carga que pudieran favorecer el incremento en el nivel de asimetría estructural y por ende producir efectos de torsión críticos en edificios.

Para cumplir con el objetivo planteado, se decidió estudiar cuatro edificios regulares de 4, 6, 10 y 15 niveles cuyo uso está destinado a oficinas, con una distribución uniforme de la masa en los niveles y con asimetría en rigideces. Dadas las características de regularidad en planta y elevación, para obtener la distribución de cargas laterales se utilizó el método sísmico estático y para la obtención del centro de torsión, se empleó el método matricial propuesto por Damy con el apoyo de un programa desarrollado para tal propósito, llamado TOR3D (Islas, 2003).

Con la finalidad de modificar la distribución de fuerzas laterales, se colocaron diferentes distribuciones de cargas gravitacionales en los niveles, asumiendo que en un edificio pueden existir estas variaciones dependiendo del uso que tengan sus plantas. Para los edificios estudiados se seleccionó un uso de oficinas, sin embargo, dentro de este se consideró la posible existencia de plantas con gran densidad de archivos en diferentes niveles como se presentan más adelante. Las cargas gravitacionales propuestas se tomaron del Reglamento de Construcción del D. F. vigente.

#### 4.1.2 Descripción de los modelos.

En la fig. 4.1 se muestra la planta de los edificios estudiados, los cuales se estructuraron a base de vigas y columnas. Para poder cumplir con las condiciones de regularidad que establece el reglamento, en cuanto a la relación altura /base, se decidió utilizar dos diferentes plantas, ya que para el edificio de 15 niveles necesitaba mayor área en la base.

La planta tipo No. 1 tiene columnas de sección transversal de 0.90 x 0.90 m y de 0.40 x 0.40 m; las vigas son de 0.50 x 0.30 m y las crujiás son de 5 m de longitud. La planta tipo No. 2 tiene columnas de sección transversal de 1.50 x 1.50 m y de 0.90 x 0.90 m; las vigas son de 0.80 x 0.60 m y las crujiás son de 7 m de longitud.

La asimetría de rigideces en planta se logró distribuyendo las columnas de mayor área en dos ejes adyacentes externos.

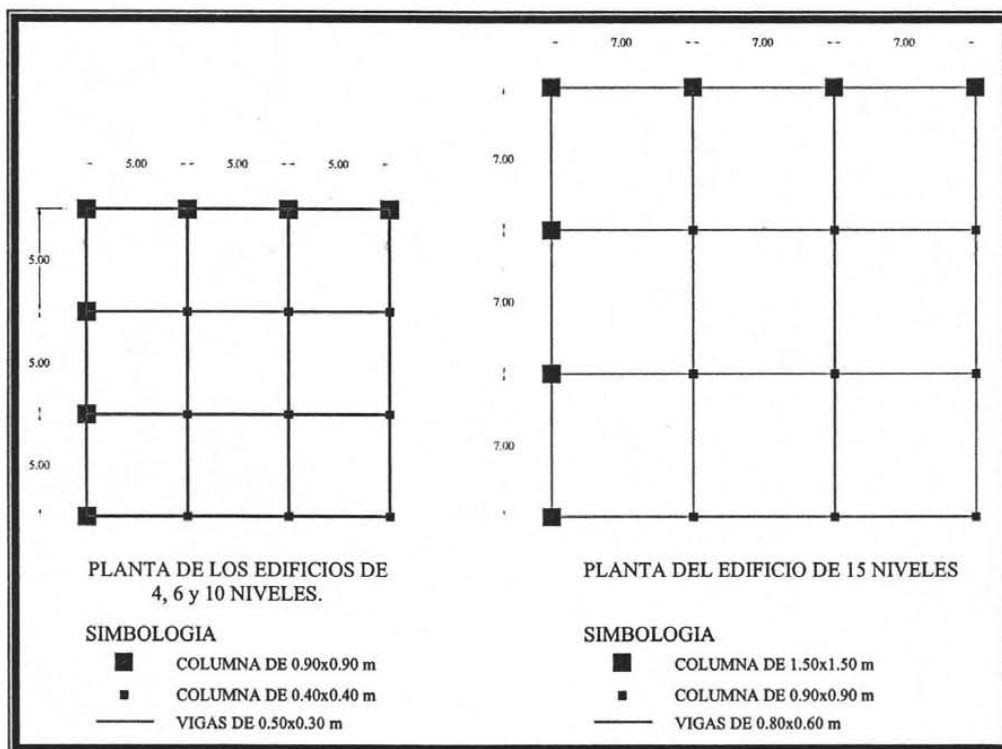


Fig. 4.1 Croquis de plantas Tipo.

Para el análisis sísmico de los edificios se consideró el siguiente criterio:

- Q = 4 (marcos dúctiles según RDF)
- Ubicación: Zona I
- Grupo: B (oficinas)
- C = 0.16

#### 4.1.3 Cálculo de las cargas.

Se presenta a continuación el cálculo de las cargas gravitacionales en una planta cuyo uso es de oficina y en otra con gran concentración de archivos; en esta última, además de la carga viva reglamentaria, se consideró el peso adicional de los archivos, ya que se consideran como una carga permanente.

##### Carga muerta (CM)

|                  |    |           |   |            |                   |
|------------------|----|-----------|---|------------|-------------------|
| Losa (t=12 cm)   | =  | 0.12x2400 | = | 288        | kg/m <sup>2</sup> |
| Mortero          | =  | 0.01x2100 | = | 21         | kg/m <sup>2</sup> |
| Instalaciones    | =  |           |   | 35         | kg/m <sup>2</sup> |
| Cielo raso       | =  |           |   | 40         | kg/m <sup>2</sup> |
| Muros interiores | =  |           |   | 178        | kg/m <sup>2</sup> |
|                  | CM | =         |   | <u>562</u> | kg/m <sup>2</sup> |

##### Carga Viva (CV)

|                              |            |     |                               |
|------------------------------|------------|-----|-------------------------------|
| Carga viva máxima (oficinas) | =          | 250 | kg/m <sup>2</sup>             |
|                              | CM+CV      | =   | <u>812</u> kg/m <sup>2</sup>  |
|                              | Incremento | =   | 40 kg/cm <sup>2</sup>         |
|                              | Total      | =   | <u>852</u> kg/cm <sup>2</sup> |

$$W_{cm+cv} = 0.852 \text{ ton/m}^2$$

##### Cálculo de cargas debido a instalación de anaqueles:

Edificios de 4, 6 y 10 niveles  
 Área a utilizar=15x15=225m<sup>2</sup>  
 Medidas del anaquel: 1.20x0.60 m  
 Ancho del pasillo: 1.20 m  
 No. total de anaqueles: 9x10= 90 anaqueles  
 Peso por anaquel: 400 kg  
 Peso debido a anaqueles en toda el área: 36000 kg  
**Peso anaqueles por m<sup>2</sup>: 160 kg/m<sup>2</sup>**

Edificio de 15 niveles  
 Área a utilizar= 21x21 m= 441 m<sup>2</sup>  
 No. total de anaqueles: 13x21= 273 anaqueles  
 Peso debido a anaqueles en toda el área: 109200 kg  
**Peso anaqueles por m<sup>2</sup>: 248 kg/m<sup>2</sup>**

Según su uso y el área de la planta, se obtuvo el siguiente peso en cada nivel:

Para los edificios de 4, 6, y 10 niveles

Oficina: W = 192 ton  
 Archivo: W = 273 ton  
 Azotea: W = 167 ton

Para el edificio de 15 niveles

Oficina: W = 376 ton  
 Archivo: W = 534 ton  
 Azotea: W = 328 ton

En las tablas 4.1 a 4.4, se presentan los casos de estudio considerando diferentes usos en sus niveles, particularmente se observa como varía la posición de las plantas con carga excesiva en la altura del edificio.

Tabla 4.1 Distribución de uso de niveles del edificio de cuatro niveles.

| EDIFICIO DE 4 NIVELES |         |         |         |
|-----------------------|---------|---------|---------|
| Nivel                 | CASO 1  | CASO 2  | CASO 3  |
| N1                    | OFICINA | OFICINA | ARCHIVO |
| N2                    | OFICINA | ARCHIVO | ARCHIVO |
| N3                    | OFICINA | ARCHIVO | OFICINA |
| N4                    | AZOTEA  | AZOTEA  | AZOTEA  |

Tabla 4.2 Distribución de uso de niveles del edificio de seis niveles.

| EDIFICIO DE 6 NIVELES |         |         |         |         |
|-----------------------|---------|---------|---------|---------|
| Nivel                 | CASO 1  | CASO 2  | CASO 3  | CASO 4  |
| N1                    | OFICINA | OFICINA | OFICINA | ARCHIVO |
| N2                    | OFICINA | OFICINA | OFICINA | ARCHIVO |
| N3                    | OFICINA | OFICINA | ARCHIVO | OFICINA |
| N4                    | OFICINA | ARCHIVO | ARCHIVO | OFICINA |
| N5                    | OFICINA | ARCHIVO | OFICINA | OFICINA |
| N6                    | AZOTEA  | AZOTEA  | AZOTEA  | AZOTEA  |

Tabla 4.3 Distribución de uso de niveles del edificio de diez niveles.

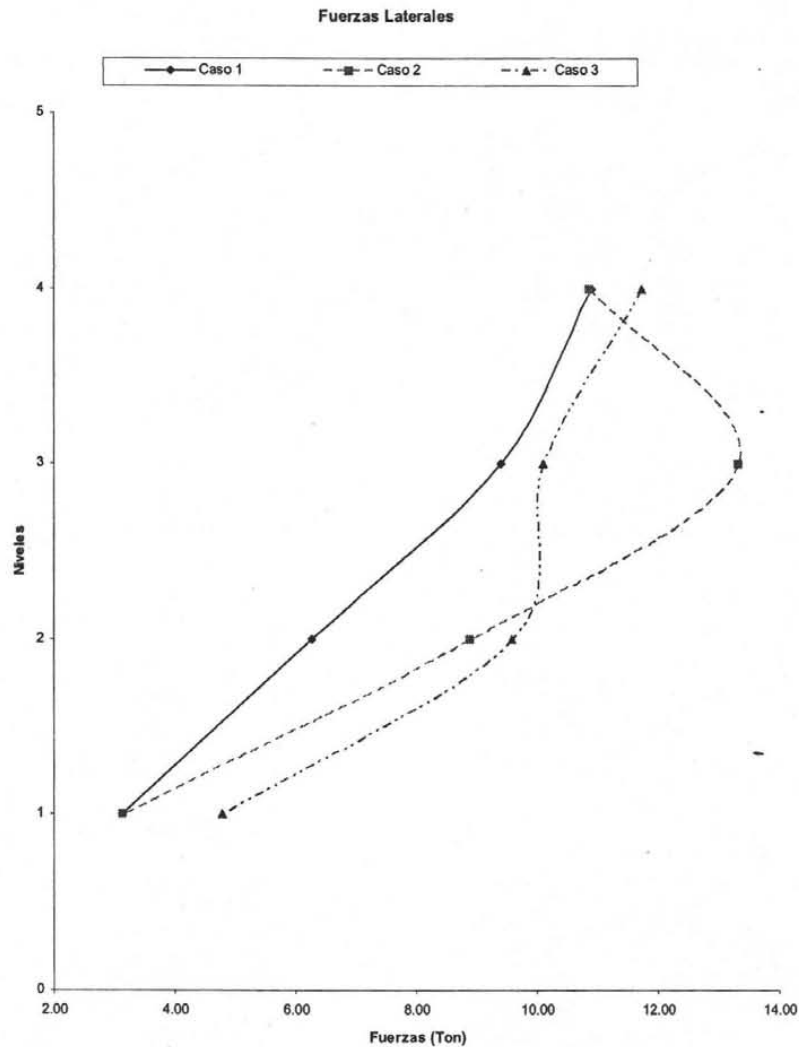
| EDIFICIO DE 10 NIVELES |         |         |         |         |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Nivel                  | CASO 1  | CASO 2  | CASO 3  | CASO 4  |
| N1                     | OFICINA | OFICINA | OFICINA | ARCHIVO |
| N2                     | OFICINA | OFICINA | OFICINA | ARCHIVO |
| N3                     | OFICINA | OFICINA | OFICINA | ARCHIVO |
| N4                     | OFICINA | OFICINA | ARCHIVO | OFICINA |
| N5                     | OFICINA | OFICINA | ARCHIVO | OFICINA |
| N6                     | OFICINA | OFICINA | ARCHIVO | OFICINA |
| N7                     | OFICINA | ARCHIVO | OFICINA | OFICINA |
| N8                     | OFICINA | ARCHIVO | OFICINA | OFICINA |
| N9                     | OFICINA | ARCHIVO | OFICINA | OFICINA |
| N10                    | AZOTEA  | AZOTEA  | AZOTEA  | AZOTEA  |

Tabla 4.4 Distribución de uso de niveles del edificio de cuatro niveles.

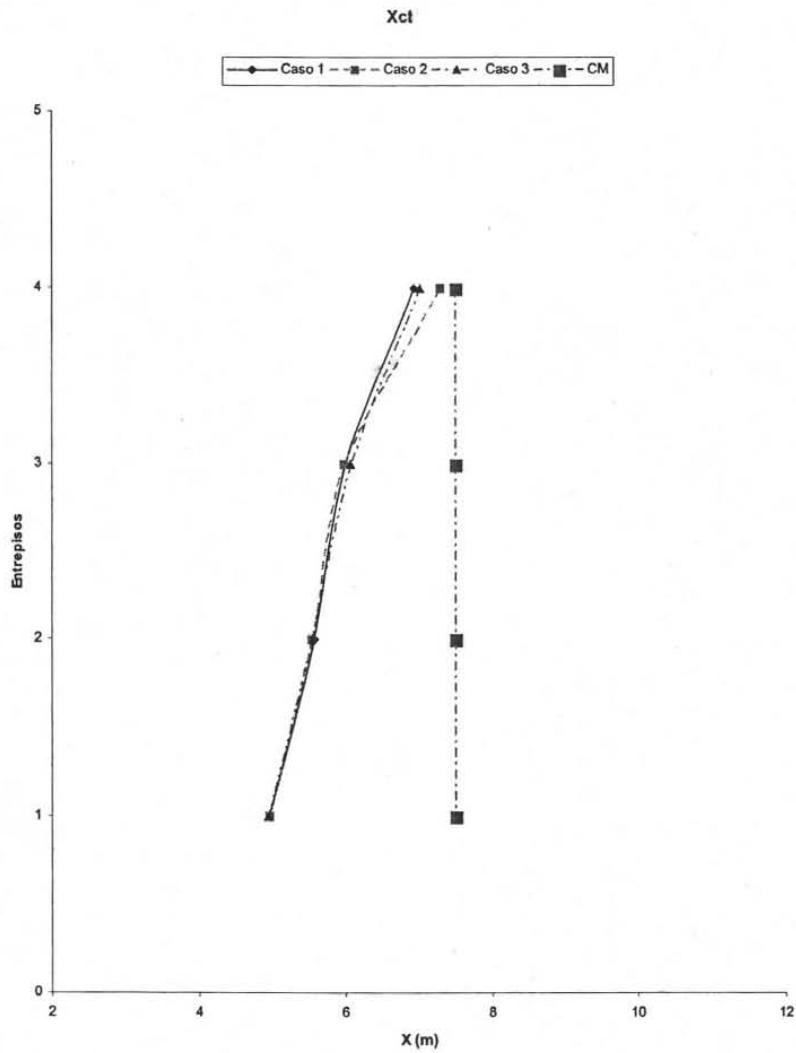
| Edificio de 15 niveles |         |         |         |         |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Nivel                  | CASO 1  | CASO 2  | CASO 3  | CASO 4  |
| N1                     | OFICINA | OFICINA | OFICINA | ARCHIVO |
| N2                     | OFICINA | OFICINA | OFICINA | ARCHIVO |
| N3                     | OFICINA | OFICINA | OFICINA | ARCHIVO |
| N4                     | OFICINA | OFICINA | OFICINA | ARCHIVO |
| N5                     | OFICINA | OFICINA | OFICINA | OFICINA |
| N6                     | OFICINA | OFICINA | ARCHIVO | OFICINA |
| N7                     | OFICINA | OFICINA | ARCHIVO | OFICINA |
| N8                     | OFICINA | OFICINA | ARCHIVO | OFICINA |
| N9                     | OFICINA | OFICINA | ARCHIVO | OFICINA |
| N10                    | OFICINA | OFICINA | OFICINA | OFICINA |
| N11                    | OFICINA | ARCHIVO | OFICINA | OFICINA |
| N12                    | OFICINA | ARCHIVO | OFICINA | OFICINA |
| N13                    | OFICINA | ARCHIVO | OFICINA | OFICINA |
| N14                    | OFICINA | ARCHIVO | OFICINA | OFICINA |
| N15                    | AZOTEA  | AZOTEA  | AZOTEA  | AZOTEA  |

#### 4.1.4 Presentación de Resultados.

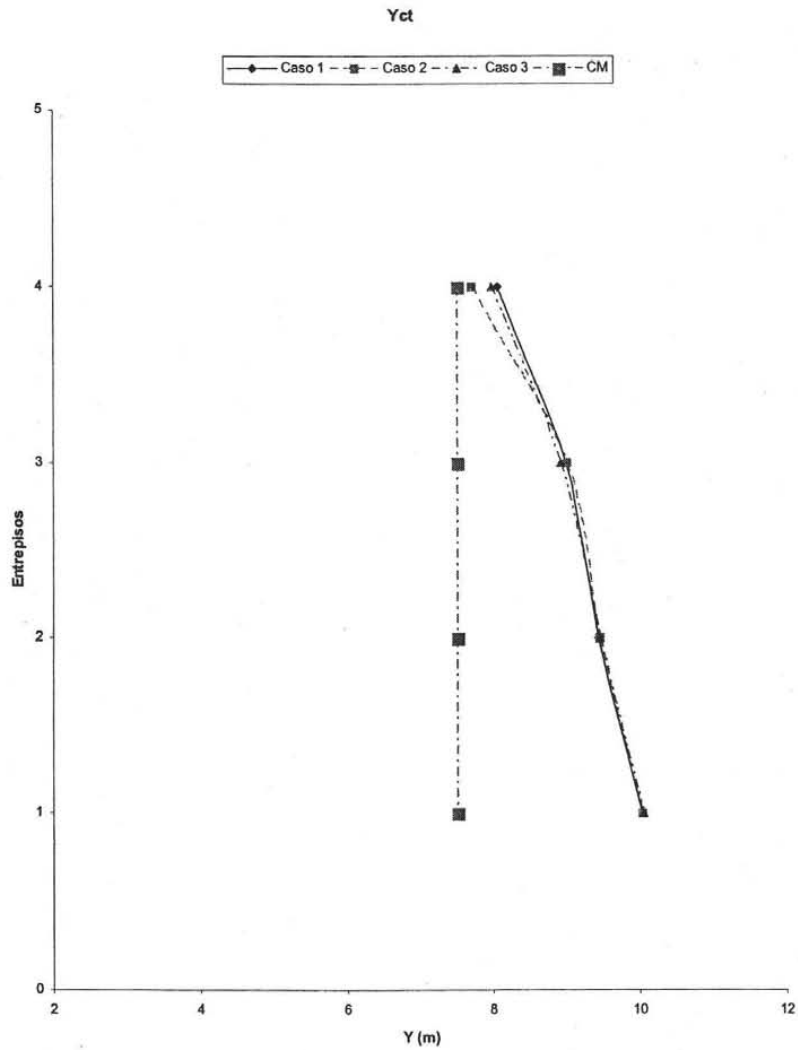
De acuerdo a las consideraciones presentadas en las secciones anteriores, las gráficas 4.1 a 4.12 presentan la distribución de fuerzas sísmicas laterales, así como la variación del centro de torsión con la altura en los edificios estudiados.



Gráfica 4.1 Distribución de fuerzas laterales para los tres casos de estudio en el edificio de 4 niveles.

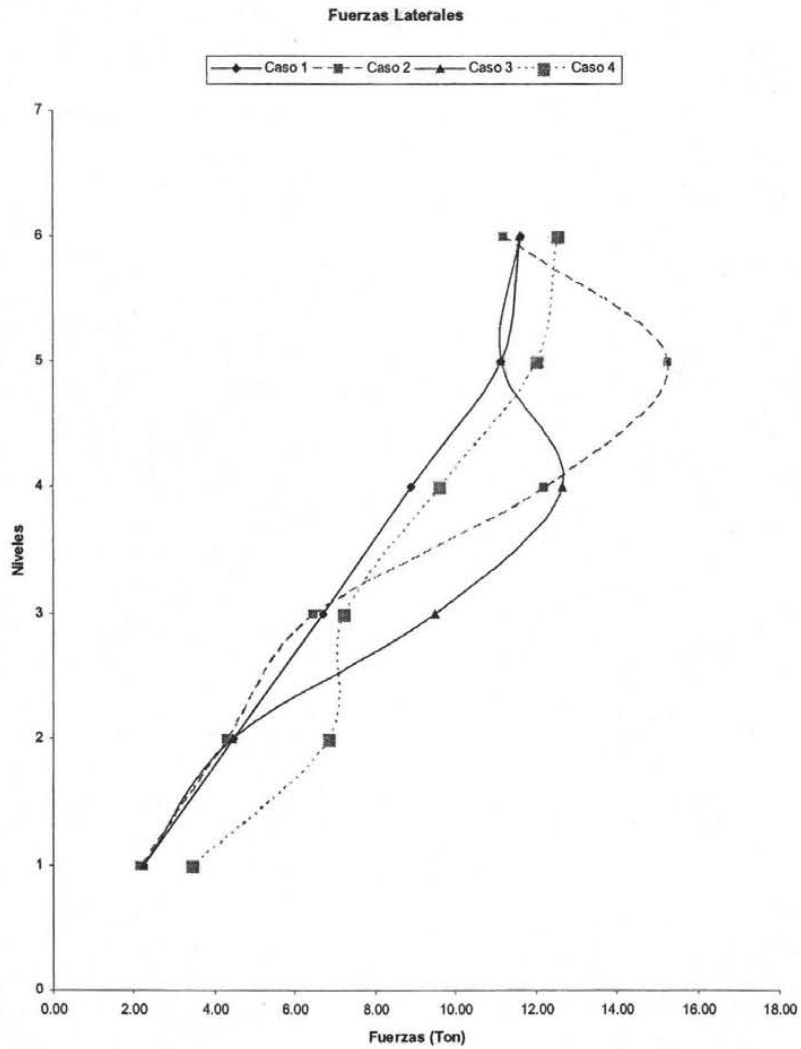


Gráfica 4.2 Distribución de la componente en X del Centro de Torsión para los tres casos de estudio en el edificio de 4 niveles.

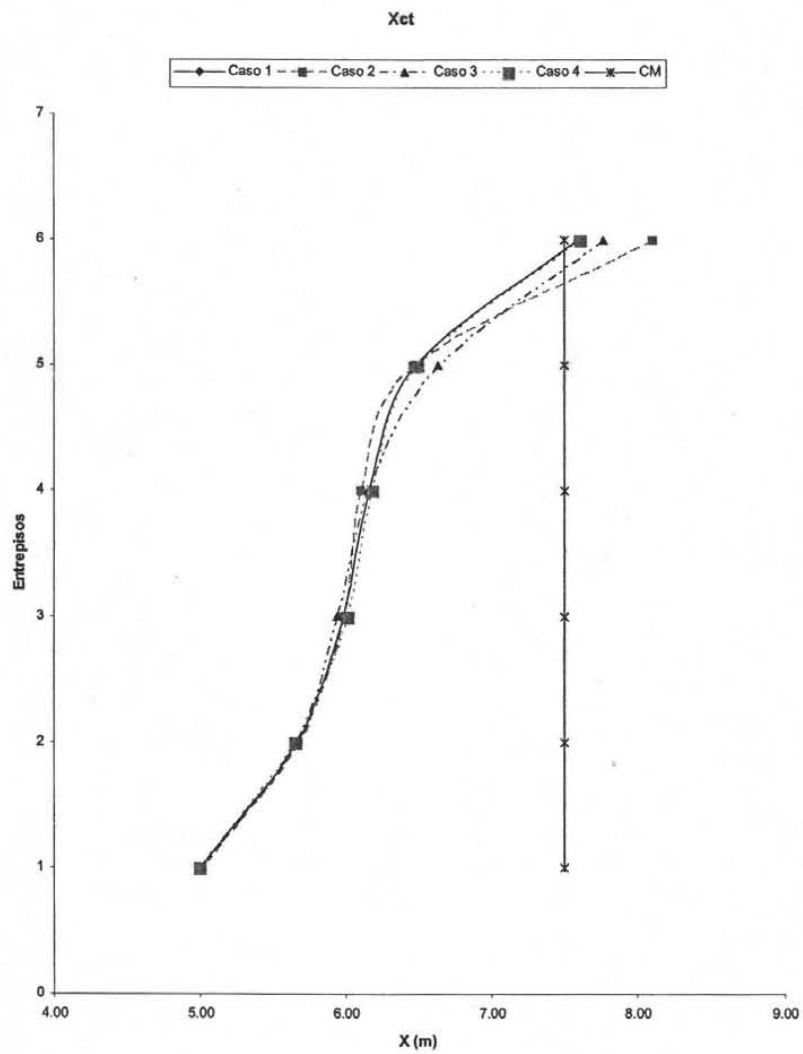


Gráfica 4.3 Distribución de la componente en Y del Centro de Torsión para los tres casos de estudio en el edificio de 4 niveles.

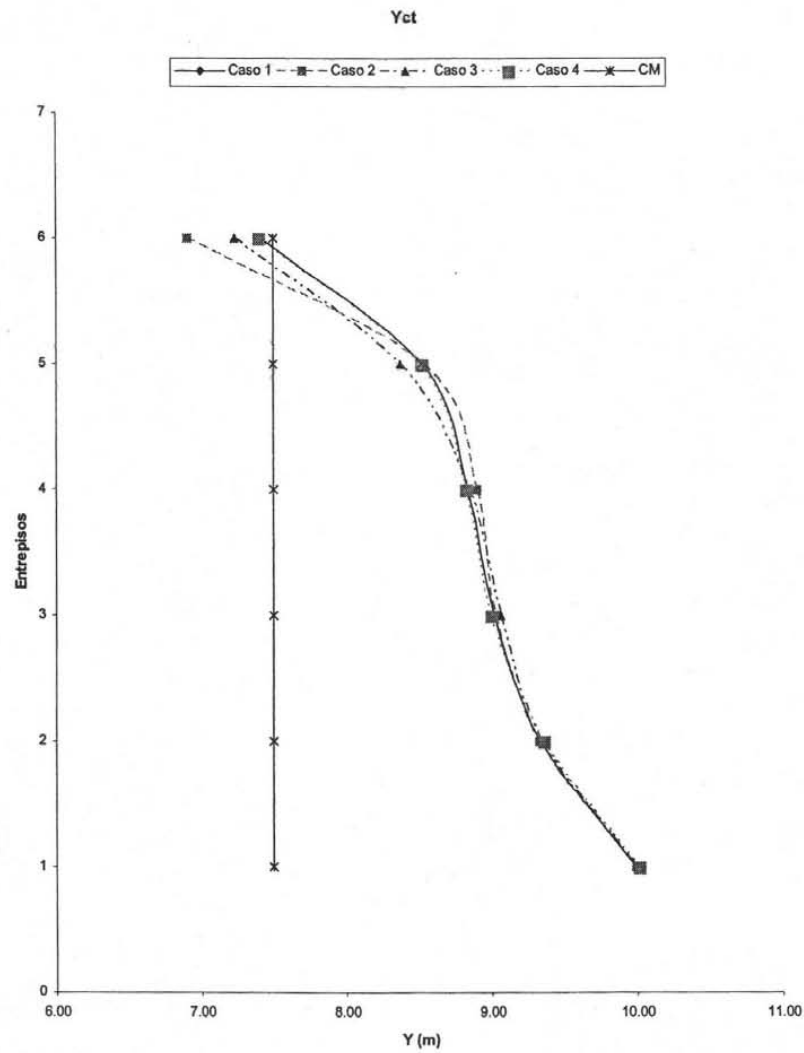




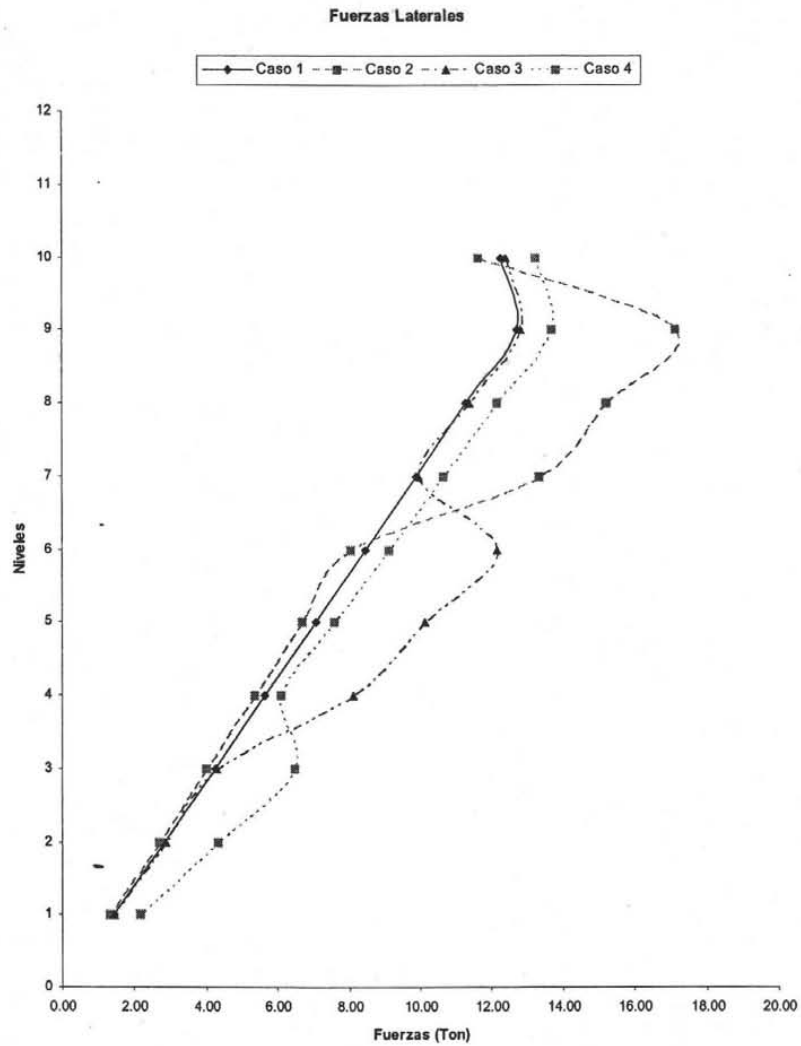
Gráfica 4.4 Distribución de fuerzas laterales para los cuatro casos de estudio en el edificio de 6 niveles.



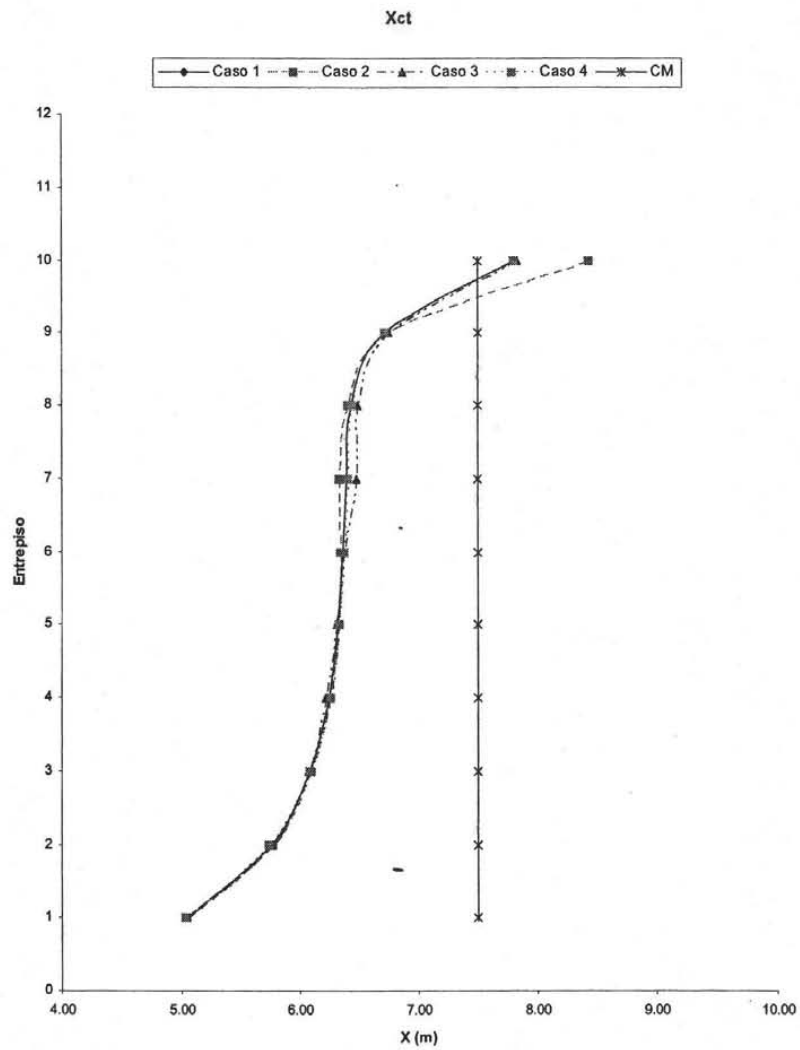
Gráfica 4.5 Distribución de la componente en X del Centro de Torsión para los cuatro casos de estudio en el edificio de 6 niveles.



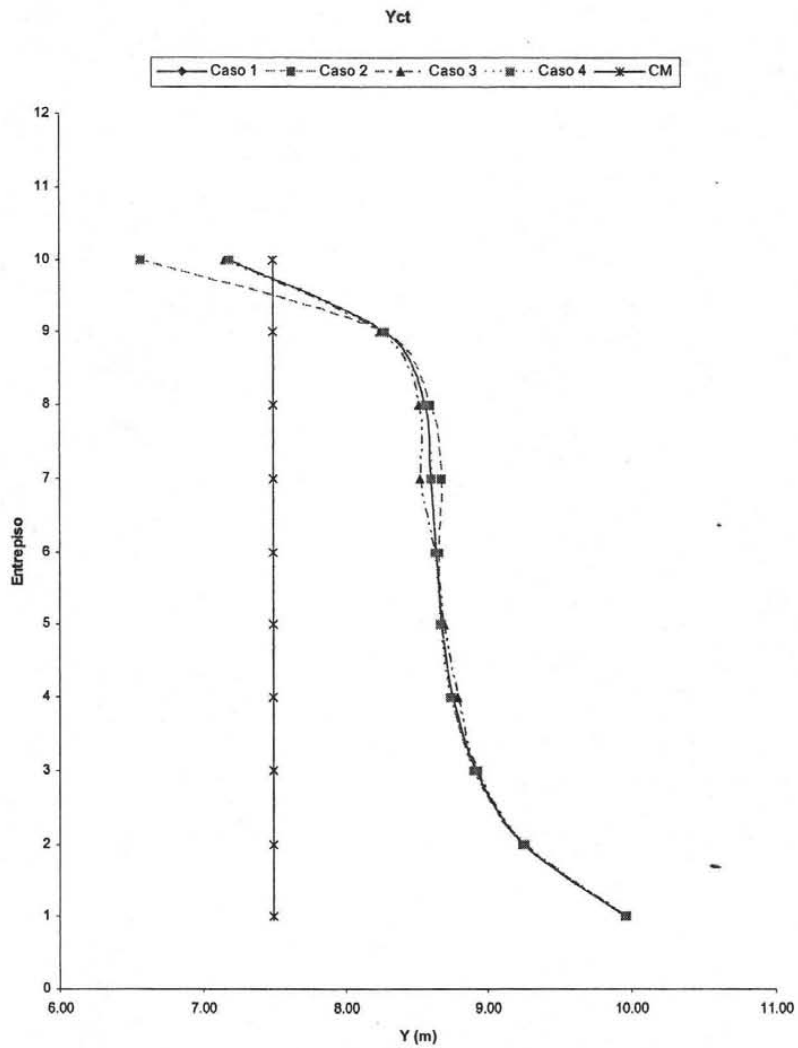
Gráfica 4.6 Distribución de la componente en Y del Centro de Torsión para los cuatro casos de estudio en el edificio de 6 niveles.



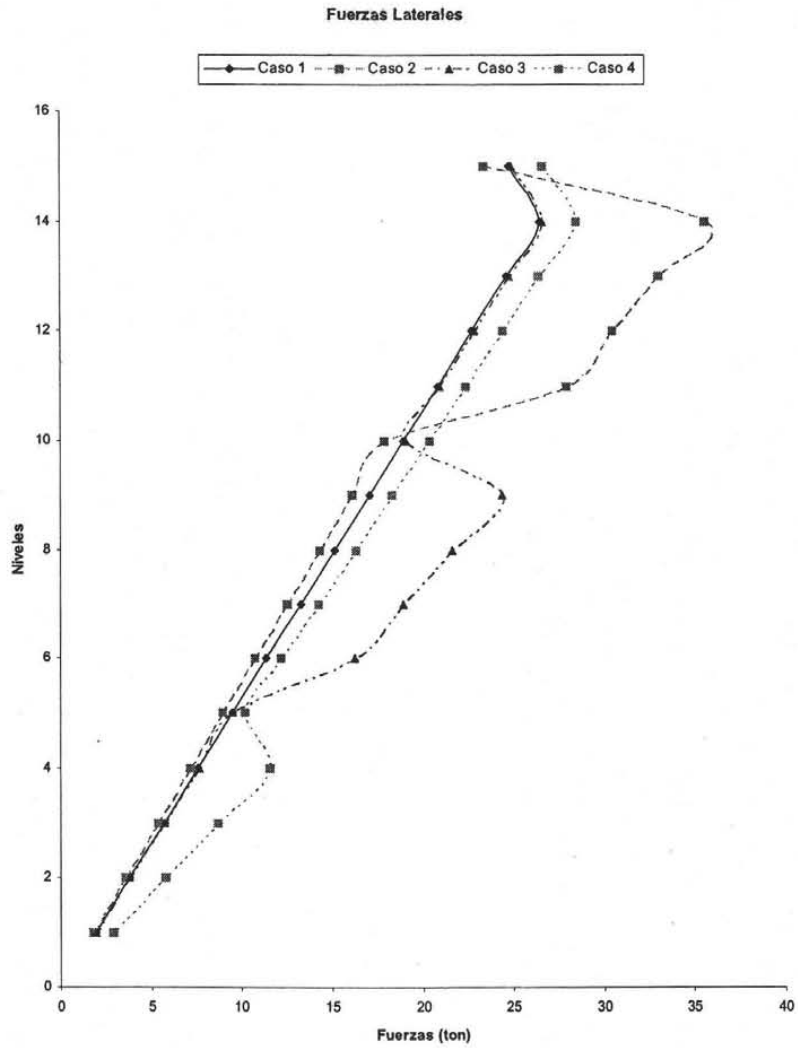
Gráfica 4.7 Distribución de fuerzas laterales para los cuatro casos estudio en el edificio de 10 niveles.



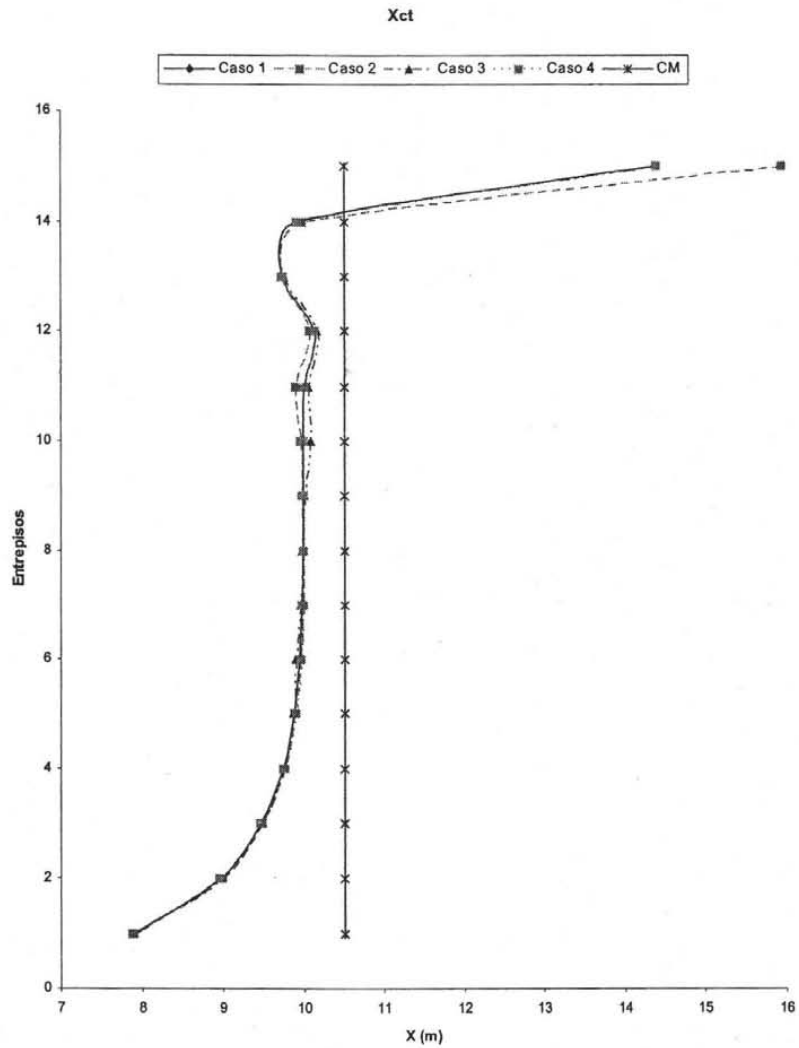
Gráfica 4.8 Distribución de la componente en X del Centro de Torsión para los cuatro casos de estudio en el edificio de 10 niveles.



Gráfica 4.9 Distribución de la componente en Y del Centro de Torsión para los cuatro casos de estudio en el edificio de 10 niveles.

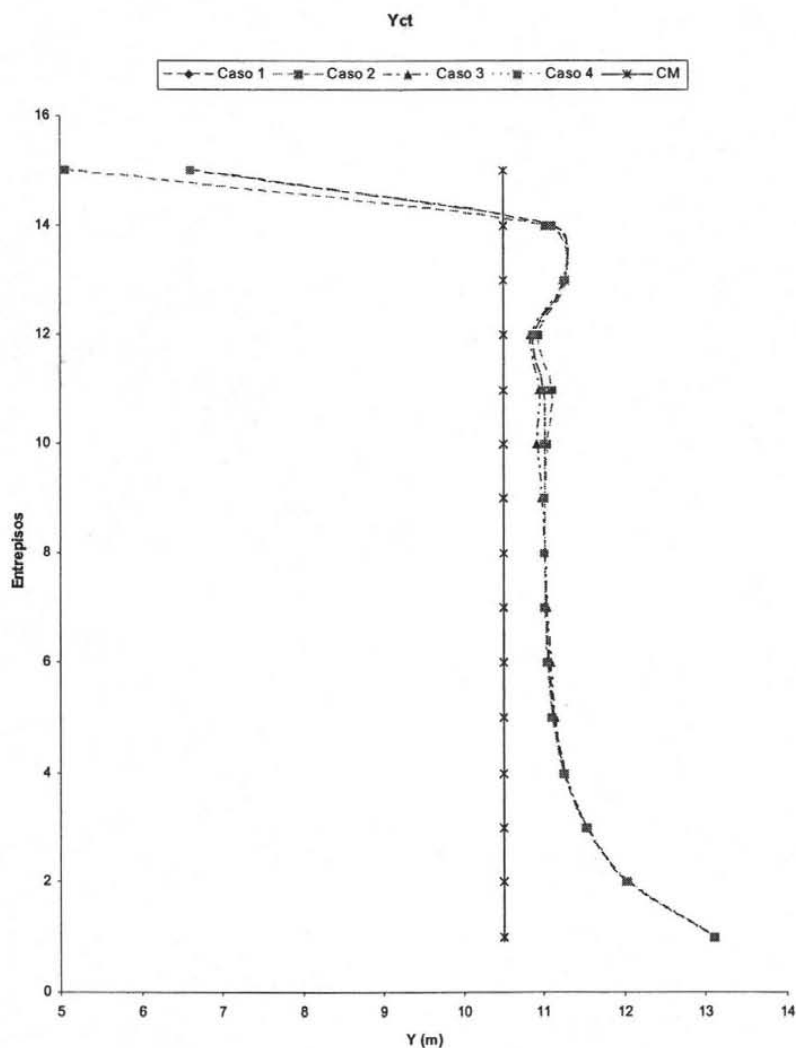


Gráfica 4.10 Distribución de fuerzas laterales para los cuatro casos de estudio en el edificio de 15 niveles.



Gráfica 4.11 Distribución de la componente en X del Centro de Torsión para los cuatro casos de estudio en el edificio de 15 niveles.





Gráfica 4.12 Distribución de la componente en Y del Centro de Torsión para los cuatro casos de estudio en el edificio de 15 niveles.

#### **4.1.5 Comentarios.**

De los resultados presentados en las gráficas, se observa el fenómeno reportado en algunos estudios previos en los que se utilizó únicamente el método sísmico estático, (Chipol 2001), donde, para los últimos niveles de los edificios de mediana a gran altura (6, 10 y 15 niveles), se produce un cambio en la posición del centro de torsión respecto al centro de cortante, que ocasiona la rotación del entrepiso en sentido contrario a la que experimentaría en los primeros entrepisos. Adicionalmente se observa que el tener concentraciones importantes de peso en los últimos niveles puede incrementar notablemente la excentricidad estructural y por ende los efectos de torsión, por lo cual, es deseable evitar esta situación en las estructuras.

También se observa que en los casos donde las plantas cargadas excesivamente se localizan en los primeros niveles, la ubicación de los CT's es la misma respecto a las que se obtendrían en el caso donde todos los niveles son de oficina. Es decir, las concentraciones importantes de peso en los niveles inferiores de un edificio no causan ninguna afectación en su asimetría estructural, por lo cual son las más deseables en un edificio. Aunque este hecho no impide que se incrementen las fuerzas cortantes en los entrepisos, los incrementos serán menores que cuando existen concentraciones de cargas en niveles superiores. Es decir, la recomendación usual de no concentrar cargas excesivas en los pisos superiores, no solo permitirá obtener cargas laterales menores, sino también disminuir los efectos torsionales, según lo demuestran los resultados presentados en las gráficas antes descritas.

Considerando la ecuación que establece el método sísmico estático para el cálculo de las fuerzas sísmicas, es evidente que se tendrán mayores magnitudes de estas cuando existan concentraciones de cargas en pisos superiores, sin embargo, es importante aclarar que el incremento de las cargas laterales, no necesariamente produce modificaciones en la asimetría estructural, como sucedió en estos casos; lo que producirá alguna modificación importante será el cambio en la distribución de las cargas laterales.

**ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA**

## 4.2 Obtención del centro de torsión de edificios de un nivel.

### 4.2.1 Antecedentes.

Se busca determinar la posición del centro de torsión (CT) en edificios simplificados de un nivel para minimizar los efectos de torsión. Para alcanzar este objetivo, se hará uso del desarrollo matemático propuesto por Damy (Alcocer, 1986), es decir, se partirá de la ecuación de equilibrio (ec. 4.1).

### 4.2.2 Desarrollo del planteamiento matemático.

Tomando como base la ec. 4.1 y, del planteamiento para la obtención del centro de torsión, que parte de la hipótesis de rotación nula en los niveles de los edificios, se propone analizar de manera independiente las fuerzas sísmicas aplicadas en el nivel. Para ilustrar el procedimiento antes descrito, se considera la aplicación de la fuerza lateral en la dirección X.

$$\begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{x\theta} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{y\theta} \\ K_{\theta x} & K_{\theta y} & K_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ \theta = 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y = 0 \\ M = -F_x Y_{CT} \end{bmatrix} \quad \text{ec. 4.1}$$

Desarrollando los productos matriciales y agrupando todos los términos del lado izquierdo de la ecuación, se obtienen las ecs. 4.2, 4.3 y 4.4.

$$K_{xx}u + K_{xy}v - F_x = 0 \quad \text{ec. 4.2}$$

$$K_{xy}u + K_{yy}v = 0 \quad \text{ec. 4.3}$$

$$K_{\theta x}u + K_{\theta y}v + Y_{CT}F_x = 0 \quad \text{ec. 4.4}$$

donde:

$Y_{CT}$  es la coordenada "Y" del CT.

$u$  y  $v$  son los vectores de desplazamientos traslacionales en dirección "X" y "Y" respectivamente.

$F_x$  es la fuerza lateral en la dirección X.

Tomando la ec. 4.3, se despeja  $u$  en términos de  $v$  obteniendo la ec. 4.5.

$$u = -\frac{K_{yy}v}{K_{xy}} \quad \text{ec. 4.5}$$

Se sustituye la ec. 4.5 en la ec. 4.2, para obtener la siguiente expresión.

$$F_x = \frac{-K_{xx}K_{yy}v}{K_{xy}} + K_{xy}v \quad \text{ec. 4.6}$$

De la ec. 4.6 se despeja el desplazamiento  $v$ .

$$v = \frac{F_x K_{xy}}{K_{xy}^2 - K_{xx}K_{yy}} \quad \text{ec. 4.7}$$

Se sustituye la ec. 4.7 en la ec. 4.5, para obtener el desplazamiento  $u$ .

$$u = \frac{-F_x K_{yy}}{K_{xy}^2 - K_{xx}K_{yy}} \quad \text{ec. 4.8}$$

Una vez obtenidos los desplazamientos  $u$  y  $v$  en términos de la fuerza  $F_x$ , se sustituyen las ecs. 4.7 y 4.8 en la ec. 4.4 para obtener la ec. 4.9.

$$K_{\theta x} \left[ \frac{-F_x K_{yy}}{K_{xy}^2 - K_{xx}K_{yy}} \right] + K_{\theta y} \left[ \frac{F_x K_{xy}}{K_{xy}^2 - K_{xx}K_{yy}} \right] + Y_{CT} F_x = 0 \quad \text{ec. 4.9}$$

Despejando el valor de  $Y_{CT}$  de la ec. 4.9, obtenemos que:

$$Y_{CT} = \frac{K_{\theta y} K_{xy} - K_{\theta x} K_{yy}}{K_{xx} K_{yy} - K_{xy}^2} \quad \text{ec. 4.10}$$

De manera análoga y aplicando la fuerza en dirección  $Y$ , obtenemos la coordenada  $X$  del centro de torsión.

$$X_{CT} = \frac{K_{\theta y} K_{xx} - K_{\theta x} K_{yy}}{K_{xx} K_{yy} - K_{xy}^2} \quad \text{ec. 4.11}$$

### **4.2.3 Observaciones.**

Como se puede observar en el desarrollo presentado, cuando se utilizan modelos simplificados de un nivel, la determinación del centro de torsión solamente depende de la matriz de rigidez global de la estructura, sin embargo, para edificios de varios niveles, inclusive para aquellos con características de regularidad en planta y elevación, la variación de la carga lateral es un parámetro que influye notablemente en la ubicación del centro de torsión, y no puede obviarse. Es decir, no bastaría conocer la rigidez de una estructura para caracterizar su nivel de asimetría, por lo que el uso de este tipo de modelos simplificados requiere ser usado con las reservas del caso.

### **4.3 Efectos de torsión en los niveles superiores de edificios.**

De acuerdo con el inciso 4.1.5, la distribución de las cargas laterales es la que produce modificaciones en la asimetría estructural de un edificio, principalmente cuando se ubican los pesos mas grandes en los niveles superiores. En este inciso se busca determinar la influencia que tiene el peso del nivel de azotea en la ubicación del CT, para ello se estudia un edificio regular de siete niveles, al cual se le varia el peso de manera arbitraria.

#### **4.3.1 Antecedentes.**

En análisis realizados a modelos de edificios asimétricos en rigideces, Chipol 2001, se observa que en el último nivel se presenta un cambio de la ubicación del CT, de manera que en ese nivel pasa al otro lado del Centro de Masas. Esta situación cobra relevancia al realizar el cálculo de los momentos torsionantes que se aplican en los niveles, para el cálculo de las fuerzas de diseño de los elementos estructurales, ya que el cambio de ubicación de CT antes descrito, provoca que el valor del momento del último entrepiso sea menor que el valor del entrepiso anterior. Lo anterior, trae como consecuencia que al hacer la diferencia de momentos, el momento resultante en el último nivel tiene un valor negativo, provocando un efecto de estrangulamiento en el último entrepiso. Con base en el efecto anterior, en el presente apartado se busca analizar si el peso del ultimo nivel guarda una relación estrecha de este comportamiento.

#### **4.3.2 Descripción del Modelo.**

Para fines demostrativos se decidió analizar un edificio de 7 niveles, de planta rectangular y asimétrico en rigideces; la altura de entrepiso es de 3 m excepto el primero donde es de 5 m. Las coordenadas del centro de masa son  $x = 12.5$  m y  $y = 7.5$  m. La sección transversal de las vigas fue de  $0.50 \times 0.25$  m y las secciones de columnas fueron de  $0.90 \times 0.90$  m y de  $0.60 \times 0.60$  m, como se puede apreciar en la fig. 4.3. El concreto tiene una resistencia  $f'c = 250$  kg/cm<sup>2</sup>.

Para analizar este edificio se seleccionaron los siguientes parámetros:

- Coeficiente Sísmico:  $C = 0.4$  (zona III)
- Factor de comportamiento sísmico:  $Q = 4$
- Pesos en cada nivel incluso la de azotea: 180 ton.

En la fig. 4.2, se presenta un croquis de la planta y elevación del edificio, donde se aprecia la distribución de las columnas que nos produce la asimetría de rigideces.

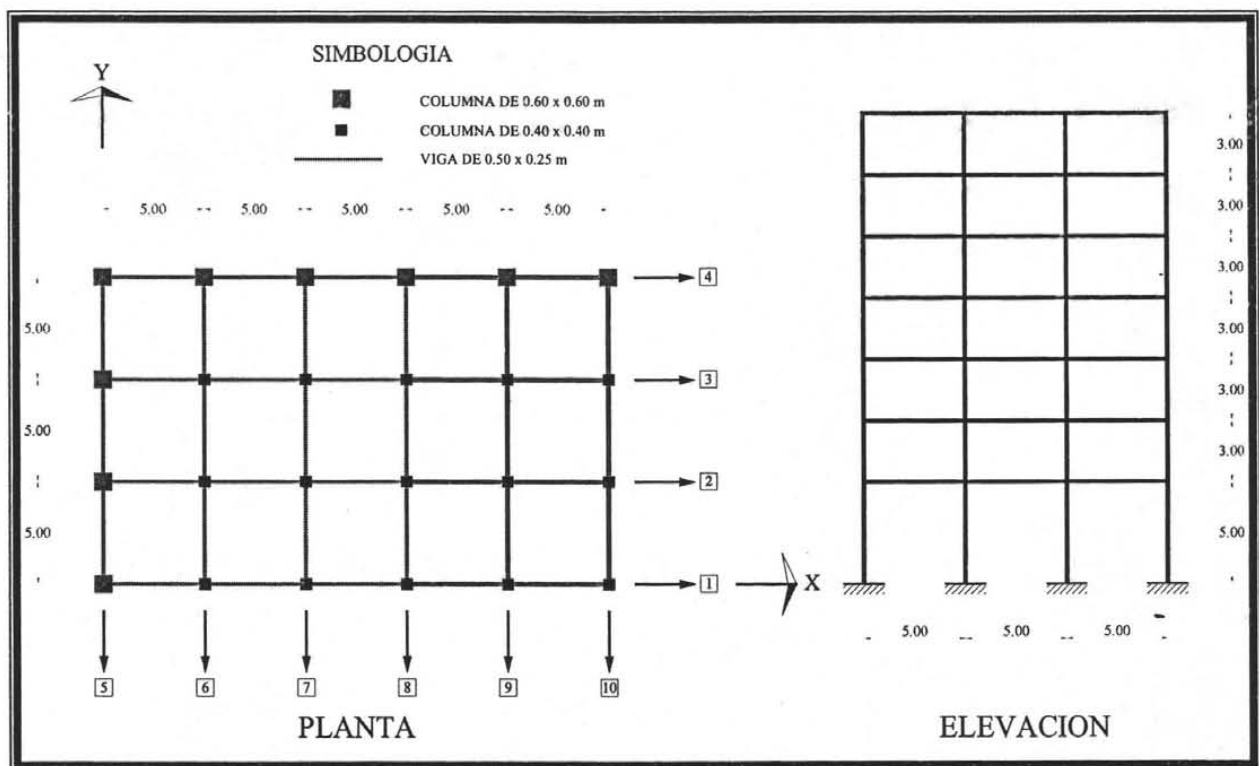


Fig. 4.2. Planta y elevación del edificio estudiado.

### 4.3.3 Desarrollo.

Se realizó un primer análisis del edificio con los pesos de los niveles indicados en el punto anterior, los resultados presentan un cambio pronunciado de la posición del centro de torsión en el último entrepiso. Luego se realizó un segundo análisis en el cual

se incrementa al doble el valor del peso en el último nivel, dando como resultado una disminución de la excentricidad estructural en el último entrepiso. Se realizó además un tercer análisis en el cual se disminuye a la mitad el peso del último nivel con relación al peso original, lo que provoca un aumento de la excentricidad estructural en el último entrepiso. Finalmente se analizó el edificio, aumentando arbitrariamente ocho veces el peso en el último nivel con respecto al peso original.

#### 4.3.4 Presentación de Resultados.

Los resultados de los análisis realizados presentados en las tablas 4.5 a 4.8, incluyen las coordenadas de los centros de torsión de entrepiso, cuyas unidades están en centímetros. En la gráfica 4.13, se puede apreciar de manera clara las tendencias de disminución de la excentricidad estructural, al aumentar el valor del peso en el último nivel.

Tabla 4.5

MODELO ORIGINAL  
CT EN LOS ENTREPISOS

| ENT. | X        | Y       |
|------|----------|---------|
| 7    | 1465.661 | 542.576 |
| 6    | 1222.828 | 777.051 |
| 5    | 1216.373 | 781.516 |
| 4    | 1205.100 | 791.428 |
| 3    | 1186.380 | 809.496 |
| 2    | 1198.120 | 794.703 |
| 1    | 1038.292 | 959.991 |

Tabla 4.6

MODELO (CARGA DOBLE)  
CT EN LOS ENTREPISOS

| ENT. | X        | Y       |
|------|----------|---------|
| 7    | 1365.206 | 638.813 |
| 6    | 1212.464 | 786.922 |
| 5    | 1217.036 | 780.807 |
| 4    | 1207.607 | 789.076 |
| 3    | 1189.527 | 806.519 |
| 2    | 1200.990 | 792.008 |
| 1    | 1038.997 | 959.318 |

Tabla 4.7

MODELO (CARGA MITAD)  
CT EN LOS ENTREPISOS

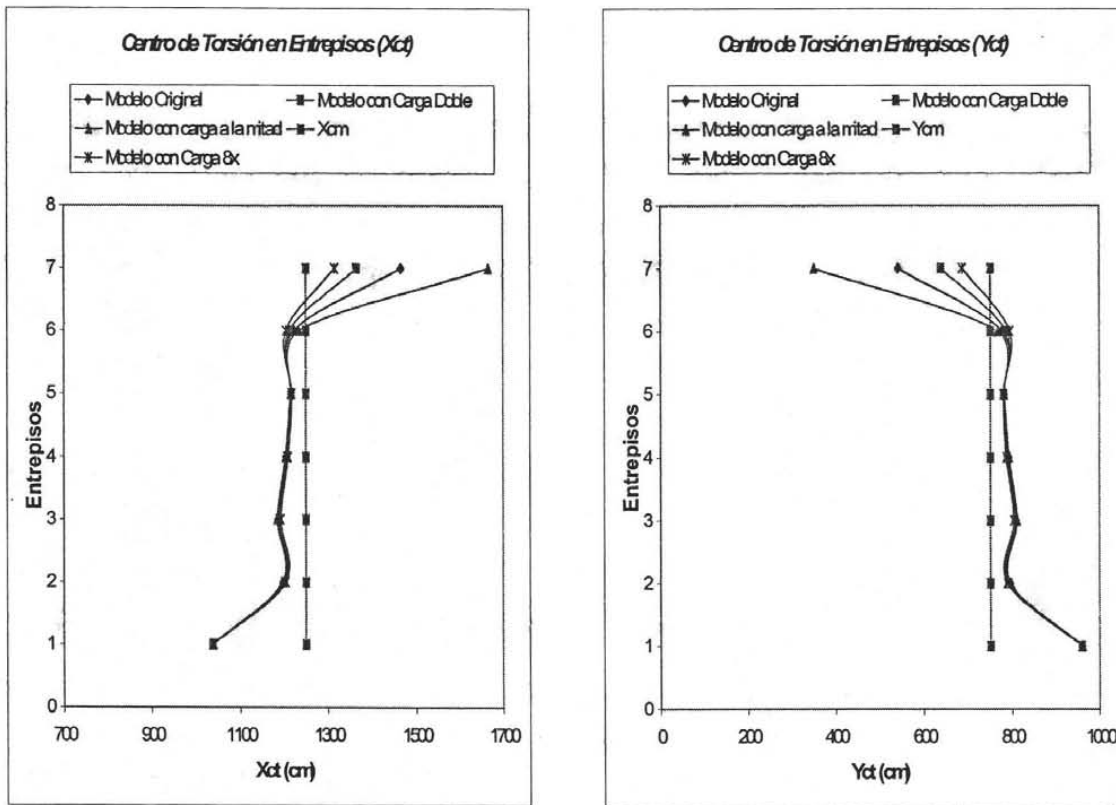
| ENT. | X        | Y       |
|------|----------|---------|
| 7    | 1666.584 | 350.111 |
| 6    | 1233.704 | 766.687 |
| 5    | 1215.815 | 782.111 |
| 4    | 1203.155 | 793.251 |
| 3    | 1184.074 | 811.684 |
| 2    | 1196.080 | 796.617 |
| 1    | 1037.805 | 960.460 |

Tabla 4.8

MODELO (CARGA 8x)  
CT EN LOS ENTREPISOS

| ENT. | X        | Y       |
|------|----------|---------|
| 7    | 1314.975 | 686.929 |
| 6    | 1204.489 | 794.511 |
| 5    | 1217.639 | 780.140 |
| 4    | 1210.185 | 786.643 |
| 3    | 1192.981 | 803.231 |
| 2    | 1204.268 | 788.912 |
| 1    | 1039.804 | 958.527 |





Gráfica 4.13. Variación del Centro de Torsión de Entrepiso.

#### 4.3.5 Comentarios.

De acuerdo con los resultados de los análisis, se observa que existe una tendencia en la que al aumentar la carga en el último nivel, la excentricidad estructural disminuye, mientras que al disminuir la carga en el último nivel, la excentricidad estructural aumenta, siendo esta última una condición que amplifica los efectos de torsión en la estructura, ver gráfica 4.13. Desafortunadamente, en la práctica no se puede aumentar la carga en el último nivel para revertir el efecto de estrangulamiento, ya que se pueden presentar efectos secundarios en el comportamiento de la estructura, por lo que otra alternativa muy adecuada es establecer otra disposición de rigideces en el último entrepiso (Chipol 2001).

## CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

A continuación se presentan algunas de las conclusiones obtenidas durante el desarrollo del presente trabajo.

1. De acuerdo al estudio de la revisión histórica del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, se observa que la normatividad referente a la torsión sísmica de edificios resulta ser poco congruente y hasta confusa, principalmente en la terminología utilizada. Además de que existe poca información para calcular las excentricidades de diseño, ya que maneja una simbología en las ecuaciones sin establecer límites ni coordenadas del origen.
2. Los tres métodos presentados se pueden utilizar para el diseño sísmico estático de edificios, sin embargo, de acuerdo a lo observado en el desarrollo de este trabajo y tomando en consideración la cantidad de datos a procesar y la facilidad del cálculo para hallar las fuerzas de diseño de los elementos estructurales, se considera que la metodología de cálculo utilizando programas comerciales pasando por la obtención del CT es la más recomendable para aplicar la norma por torsión, ya que mientras el método de Goel parecería ser más simple, tiene la desventaja de que se tienen que realizar múltiples análisis para considerar los efectos de traslación y torsión, además de que no es posible tomar en cuenta los aspectos adicionales de la norma por torsión. El tercer método evaluado plantea otra metodología basada en los mismos principios que el método de Damy, sin embargo, involucra un mayor número de parámetros y proceso que le quitan la simpleza al método.
3. En los edificios donde las plantas cargadas excesivamente se localizan en los primeros niveles, la ubicación de los CT's es la misma respecto a las que se obtendrían en edificios donde en todos los niveles se tienen cargas moderadas, como por ejemplo oficinas. Es decir, las concentraciones importantes de peso en los niveles inferiores de un edificio no causan ninguna afectación en su asimetría

estructural, por lo cual son las más deseables en un edificio, aunque si se incrementarían las fuerzas cortantes en los entrepisos.

4. Se presentarán mayores magnitudes de la excentricidad, cuando existan concentraciones de cargas en pisos superiores, excepto en el nivel de azotea que siempre tiene la misma carga, sin embargo, es importante aclarar que el incremento de las cargas laterales, no necesariamente produce modificaciones en la asimetría estructural, como sucedió en estos casos; lo que sí producirá alguna modificación será el cambio en la distribución de las cargas laterales.
5. En un caso particular de estudio, se observa que mientras mayor es la carga aplicada en el último nivel de un edificio (azotea), menor es la excentricidad, sin embargo, este hecho no se recomienda realizar en la práctica, ya que nos puede llevar a incrementos en fuerzas sísmicas e incluso a cargas poco realistas en la azotea de los edificios, con efectos secundarios negativos.
6. No es posible caracterizar el nivel de asimetría de un edificio de varios niveles empleando modelos simplificados de un nivel.
7. Actualmente, en la práctica profesional se evita la aplicación de la normatividad por torsión utilizando el método sísmico estático, ya que esta es poco clara, confusa y, aplicándola rigurosamente, requiere de un cálculo numérico importante, lo cual sólo puede ser resuelto con la ayuda de programas comerciales que por lo general tienen que ejecutar varias corridas de computadora.

En base al estudio realizado en este trabajo, se proponen a continuación algunas recomendaciones para estudios posteriores.

1. Fomentar el desarrollo de programas que consideren la aplicación explícita de las normas por torsión, para que estas puedan ser consideradas adecuadamente.
2. Realizar estudios para caracterizar de manera más realista el comportamiento sísmico torsional de las estructuras, que contribuyan al mejoramiento de la normatividad existente, ya que la formulación propuesta incluye expresiones que difícilmente pueden englobar los muchos parámetros estructurales que gobiernan este efecto.

## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

### Referencias

1. Alcocer, S. (1986), "Centro de torsión de edificios obtenido matricialmente", Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
2. Chipol, A. (2001), Estudio de la Respuesta Sísmica de Modelos Tridimensionales De Edificios Torsionalmente Acoplados", Tesis de Maestría, DEPFI, UNAM, México.
3. Escobar, J.; Mendoza, A. y Gómez, R. (2004), "Diseño simplificado por torsión sísmica estática", Revista de Ingeniería Sísmica No. 70, pp. 77-107, México.
4. García, O. (1992) "Apuntes de la clase de Tópicos Estructurales y Aplicación de las computadoras al Análisis Estructural", DEPFI, UNAM, México.
5. Gómez, L. (2000), "Efectos de torsión en estructuras aisladas sísmicamente en su base", Tesis de Maestría, DEPFI, UNAM, México.
6. Islas, A. (2003), "Efecto de la variación de la distribución en planta de las resistencias en la respuesta sísmica inelástica de edificios torsionalmente acoplados", Tesis de Maestría, DEPFI, UNAM, México.
7. Juárez, A. (2003), "Evaluación de la capacidad sísmica torsional de estructuras asimétricas", Tesis de Maestría, DEPFI, UNAM, México.
8. Miranda, G. (2004), "Comportamiento sísmico torsional de edificios diseñados estática y dinámicamente", Tesis de Maestría, DEPFI, UNAM, México.

9. Ortega, J. (2001), "Efecto de la variación de periodo fundamental en la respuesta sísmica inelástica de edificios torsionalmente acoplados", Tesis de Maestría, DEPMI, UNAM, México.
10. Zárate, G. (2002), "Evaluación de enfoques para análisis y diseño sísmico de edificios asimétricos". Tesis de Maestría, DEPMI, UNAM, México.
11. Zárate, G.; Ayala, G. y García, O. (2003), "Método sísmico estático para edificios asimétricos: revisión de enfoques", Revista de Ingeniería Sísmica No. 65, pp. 1-21, México.

## **Bibliografía**

1. Andrade, M. (1970), "Nuevo Reglamento de Construcciones para el D. F. y leyes que le son conexas", Ediciones Andrade, Tercera edición, México.
2. Antón, H. (1989), "Introducción al álgebra lineal", Ed. Noriega Limusa, Tercera edición, México.
3. Arnal, S. y Betancourt, M. (1996), "Nuevo Reglamento de Construcciones para el D. F.: Ilustrado y comentado", Ed. Trillas, Segunda reimpresión de la segunda edición, México.
4. Arnal, S. y Betancourt, M. (2005), "Nuevo Reglamento de Construcciones para el D. F.: Ilustrado y comentado", Ed. Trillas, Quinta edición, México.
5. Bazán, E. y Meli, R. (1977), "Manual de Diseño Sísmico de Edificios, de acuerdo con el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal de 1976", Ed. Limusa, Primera edición, México.

6. Bazán, E. y Meli, R. (2001), "Diseño sísmico de Edificios", Ed. Limusa, Cuarta reimpresión, México.
7. CSI. (1992), "SAP90, Structural analysis verification manual", Computers and Structures Inc., versión 5.40, E. U. A.
8. Habibulah, A. (1992), "SAP90, Users Manual", Computers and Structures Inc., versión 5.40, E. U. A.
9. Habibulah, A. (1998), "SAP 2000, Graphics User Interface Manual", Computers and Structures Inc., versión 7.0, E. U. A.
10. Meli, R. (2000), "Diseño Estructural", Ed. Limusa, Segunda edición, México.
11. Rosenblueth, E. y Gómez, R. (1991), "Comentarios y ejemplos a las NTC para Diseño por Sismo", Series de Instituto de Ingeniería ES-7, México.