

01121  
91



**Universidad Nacional Autónoma de México**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA CIVIL, TOPOGRÁFICA Y GEODESIA**

**DISEÑO SIMPLIFICADO POR TORSIÓN  
SÍSMICA ESTÁTICA**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE**

**INGENIERO CIVIL**

**P R E S E N T A**

**JOSÉ ANTONIO MENDOZA SILVA**

**DIRECTOR DE TESIS: DR. JOSÉ ALBERTO ESCOBAR SANCHEZ**

**MÉXICO, D.F.**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO DEL 2003**



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

A



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

*Dedico este trabajo:*

*A la persona más importante en mi vida*

**MI HIJO**

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

NOMBRE: Jose Antonio Mendoca  
Silva

FECHA: 11 Junio 2005

FIRMA: P.A. [Firma]

## AGRADECIMIENTOS

### *A mis padres y hermanas*

- *Por apoyarme durante toda mi carrera*

### *A la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO:*

- *Por haberme dado la dicha de pertenecer a ella, y darme la oportunidad de representarla en diversas ocasiones; siendo esto, uno de los mayores orgullos que tendré.*
- *Por prestarme sus aulas, y así tener la fortuna de prepararme como un futuro profesionalista, sin esperar nada a cambio.*
- *Por que gracias a ella, tuve la oportunidad de conocer a mis mejores amigos, así como a excelentes compañeros, profesores, entrenadores, tutores y sobre todo a mi esposa.*
- *Por todos los momentos inolvidables que viví dentro y fuera de sus aulas.*
- *Por que siempre estaré orgulloso de haber pertenecido a la máxima casa de estudios.*

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



	<b>Página</b>
<b>I INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
I.1 Objetivos	3
I.2 Organización del trabajo	3
<b>II DISEÑO DE EDIFICIOS POR TORSIÓN SÍSMICA</b>	<b>5</b>
II.1 Antecedentes	5
II.1.1 Rigidez y resistencia	6
II.1.2 Centro de masas y centro de rigidez	7
II.1.3 Excentricidad estática y de diseño	7
II.2 Diseño por torsión sísmica estática	10
II.2.1 Disposiciones de diseño por torsión sísmica estática especificado en el RCDF	10
II.2.1.1 Análisis por traslación (cortante directo)	11
II.2.1.2 Análisis por torsión (cortante por torsión)	12
II.2.2 Denominación de los elementos estructurales en el diseño sísmico por torsión	14
II.3 Parámetros de diseño por torsión sísmica desarrollados por Tso y Wong	15

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN



---

<b>III PROCEDIMIENTO SIMPLIFICADO PARA EL DISEÑO POR TORSIÓN SÍSMICA ESTÁTICA</b>	<b>19</b>
III.1 Antecedentes	19
III.2 Distribución de la resistencia entre los elementos estructurales	20
III.3 Disposiciones de diseño por torsión de la propuesta a las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por sismo (NTC-2001)	23
III.4 La torsión sísmica en el diseño por torsión sísmica estática	25
III.4.1 Efecto de la excentricidad accidental en el diseño por torsión sísmica estática	25
III.4.2 Efecto del incremento de la excentricidad estructural en el diseño por torsión sísmica estática	28
III.4.2.1 Elementos rígidos	28
III.4.2.2 Elementos flexibles	29
III.4.3 Efecto de la torsión sísmica en el diseño por torsión sísmica estática	30
III.4.3.1 Elementos rígidos	31
III.4.3.2 Elementos flexibles	32
III.5 Procedimiento simplificado de diseño	33
<b>IV APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO SIMPLIFICADO DE DISEÑO A UN MODELO ESTRUCTURAL DE VARIOS PISOS</b>	<b>36</b>
IV.1 Modelos estructural	36
IV.2 Determinación de las resistencias de diseño por torsión en los elementos estructurales	37



<b>V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>44</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>47</b>
<b>TABLAS Y FIGURAS</b>	<b>51</b>





## I. INTRODUCCIÓN

En general, cuando un edificio se somete a la acción de un sismo intenso, sus entrepisos experimentan simultáneamente traslación y torsión. Esto sucede al no existir una estructura real totalmente simétrica, en la cual no se presente el acoplamiento de ambos movimientos.

El fenómeno de la torsión sísmica se debe a la no coincidencia entre la fuerza sísmica y la fuerza resistente. Este efecto producido principalmente por asimetría en masas, rigideces y/o resistencias, puede ocasionar graves problemas sobre todo en estructuras de plantas irregulares, en las que comúnmente se presentan grandes excentricidades entre ambas fuerzas.

Estas fuerzas pueden ser capaces de llevar a un edificio a la falla o daño severo, como se pudo constatar en el sismo ocurrido en México en 1985, principalmente en la zona de suelo blando, (Meli R. y Miranda E., 1986). Probablemente gran proporción de las estructuras afectadas fueron



diseñadas con normas obtenidas a partir de resultados de investigaciones efectuadas sobre modelos elástico lineales.

Es por ello, que ha surgido el interés en investigadores de todo el mundo por tratar de comprender el efecto que induce este fenómeno en el comportamiento de edificios cuando son sujetos a excitaciones fuertes.

Con base en el diseño sísmico actual, cuando las estructuras son sometidas a sismos intensos, deberán ser capaces de resistir deformaciones inelásticas significativas conservando su capacidad de carga. Desde este punto de vista, el comportamiento adecuado de estas estructuras debe ser tal que tienen que resistir los desplazamientos laterales así como los debidos a la torsión dentro de los límites de desplazamiento de entrepiso permisibles.

Al igual que otras normas de diseño por torsión, el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal vigente, RCDF, permite llevar a cabo un análisis estático de las estructuras de edificios, el cual busca proporcionar a los elementos resistentes de las estructuras, la capacidad de carga suficiente para soportar tanto las fuerzas cortantes directas, como las producidas por los momentos torsionantes.

En el presente trabajo se evaluó un procedimiento simplificado de diseño, el cual mantiene las disposiciones de diseño vigentes del RCDF, e incluye otras de investigaciones anteriores, con el que se busca simplificar el diseño por torsión sísmica estática en edificios de varios niveles.



## **I.1 Objetivos**

El presente trabajo tiene por objetivo inicial, estudiar el problema de la torsión sísmica estática en modelos estructurales de varios niveles. Para ello se evalúan los parámetros de diseño desarrollados por Tso y Wong así como las disposiciones de diseño del RCDF vigente, analizando los factores que afectan a la excentricidad de diseño. Con base en lo anterior, se propone un procedimiento simplificado de diseño por torsión sísmica estática.

Finalmente se evalúa y compara la respuesta de los elementos estructurales en edificios de varios niveles al realizar un diseño con el RCDF vigente y con el procedimiento simplificado de diseño presentado en este trabajo.

## **I.2 Organización del trabajo**

En el capítulo II, se presentan aspectos y conceptos sobre el problema de la torsión sísmica, así como las disposiciones de diseño por torsión sísmica estática especificadas en el RCDF-95. También se muestran los parámetros de diseño por torsión desarrollados por Tso y Wong.

A partir de los criterios señalados en el capítulo II, el capítulo III presenta un desarrollo para la distribución de la resistencia entre los elementos estructurales. Este desarrollo se divide en dos partes, primero se obtiene la resistencia de los elementos estructurales a partir del efecto debido a la excentricidad accidental y al debido a los factores dinámicos, posteriormente se analizan los efectos anteriormente mencionados y se obtiene la fuerza resistente en función del efecto debido a la torsión



Finalmente, se presenta un procedimiento simplificado de diseño por torsión basado en los criterios anteriores.

En el capítulo IV, se muestra un ejemplo de aplicación del procedimiento simplificado de diseño por torsión sistema estático, en un modelo estructural de varios niveles, y se comparan los resultados obtenidos con respecto al RCDF actual.

Finalmente, en el capítulo V se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas en el presente estudio.



sismica. Finalmente, se presenta un procedimiento simplificado de diseño por torsión basado en los criterios anteriores.

En el capítulo IV, se muestra un ejemplo de aplicación del procedimiento simplificado de diseño por torsión sismica estática, en un modelo estructural de varios niveles, y se comparan los resultados obtenidos con respecto al RCDF actual.

Finalmente, en el capítulo V se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas en el presente estudio.



## **II. DISEÑO DE EDIFICIOS POR TORSIÓN SÍSMICA ESTÁTICA**

### **II.1 Antecedentes**

El objetivo de los reglamentos de diseño sísmico es proveer a las estructuras de una capacidad de resistencia adecuada y de deformación en comportamiento inelástico, tal que permitan evitar daños en la estructura y en los componentes no estructurales durante temblores de ocurrencia frecuente, así como evitar lesiones o pérdidas de vidas humanas en sismos intensos de ocurrencia poco frecuente. Para lograr este objetivo, un reglamento debe presentar los principales criterios de diseño de una manera racional, clara y lo más simple posible para lograr un buen conocimiento y comprensión de dichos procedimientos así como sus limitaciones.

En este capítulo se tratan aspectos y características importantes sobre el problema de torsión sísmica, para entender las causas que originan el efecto



torsional en los entrepisos de los edificios, así como tener una mejor interpretación de las normas sísmicas al respecto.

En términos generales, el fenómeno de torsión sísmica se debe a la no coincidencia entre la ubicación de la fuerza sísmica y la fuerza resistente, produciendo condiciones severas para algunos elementos estructurales. Sin embargo, en la actualidad no existen estudios suficientemente completos que permitan predecir la respuesta torsional de edificios de manera satisfactoria.

El Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, RCDF, actual, permite realizar el análisis de edificios considerando únicamente traslación de entrepisos, agregando posteriormente los efectos de torsión sísmica. Este método, conocido como estático, es aplicable a edificaciones con alturas menores de 40m dependiendo de la zona en que esté ubicada, además de la estructuración y características del edificio, así como de la importancia del mismo.

### **II.1.1 Rigidez y resistencia**

Se define como rigidez lateral o de entrepiso a la fuerza que se necesita aplicar para que se produzca un desplazamiento unitario entre un nivel y otro por las cargas horizontales aplicadas en cada entrepiso. La rigidez lateral depende de la sección transversal de los elementos estructurales, de su longitud, de la forma en que están conectados a otros elementos y del módulo de elasticidad de los materiales con que están hechos, lo que define las propiedades elásticas como la relación de Poisson y el módulo de cortante.



Por otro lado, la resistencia se define como la capacidad que presenta un elemento estructural a la falla. Un elemento llega a la falla cuando pierde o disminuye de forma considerable su capacidad de soportar cierta cantidad de fuerza o cuando presenta deformaciones por encima de su capacidad de servicio.

En general, la resistencia de una estructura se determina mediante procedimientos analíticos basados en el conocimiento de las propiedades geométricas de la estructura y mecánicas de los materiales que la componen.

### **II.1.2 Centro de masas y centro de rigidez**

El centro de masas de un entrepiso (CM), se define como el centro de gravedad de las cargas verticales; en el caso de que las cargas verticales presenten una distribución uniforme, el centro de masas coincidirá con el centroide de la planta del piso, y será el lugar donde se considera aplicada la fuerza sísmica horizontal que actúa en ese entrepiso.

El centro de torsión o centro de rigidez de un entrepiso (CT), es el punto donde, al aplicar una fuerza horizontal, sólo produce desplazamientos relativos de traslación entre los dos niveles que comprenden el entrepiso.

### **II.1.3 Excentricidad estática y de diseño**

La excentricidad estática o estructural, referida en el RCDF, es la distancia entre el CM y el CT de cada entrepiso.





La definición de excentricidad de diseño, tiene un formato similar en códigos de diseño sísmico de diversos países, e involucra factores que modifican la excentricidad estructural. Estos factores representan el efecto de la excentricidad accidental y la amplificación que se produce por efectos dinámicos, Fig 2.1. La forma común de estas expresiones es la siguiente, para cada una de las dos direcciones de análisis:

$$\begin{aligned} e_{d1x} &= \alpha e_{sx} + \beta b_x \\ e_{d1y} &= \alpha e_{sy} + \beta b_y \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} e_{d2x} &= \delta e_{sx} - \beta b_x \\ e_{d2y} &= \delta e_{sy} - \beta b_y \end{aligned} \quad (2.2)$$

donde:

$(e_{d1x}, e_{d1y}), (e_{d2x}, e_{d2y})$  = excentricidades de diseño para cada entrepiso, en cada una de las direcciones ortogonales de la estructura

$\alpha, \delta$  = factores de amplificación dinámica

$e_{sx}, e_{sy}$  = excentricidad estructural o estática

$\beta$  = factor de excentricidad accidental

$b_x, b_y$  = dimensión máxima en planta del entrepiso, medida perpendicularmente a la acción sísmica

De acuerdo con el RCDF, en las ecuaciones (2.1) y (2.2),  $\alpha = 1.5$ ,  $\delta = 1.0$  y  $\beta = 0.1$



La tabla 2.1 muestra los valores de los coeficientes involucrados en las expresiones anteriores, de algunos códigos. (Paz M., 1994).

Mientras unos reglamentos como el mexicano y el peruano incluyen factores de amplificación dinámica distintos:  $\alpha \neq \delta$ , otros como el chileno mantienen  $\alpha = \delta$ ; produciendo diferencias considerables en los valores de la excentricidad de diseño según el código utilizado.

Como se observa en las ecuaciones (2.1) y (2.2), la excentricidad de diseño comprende dos aspectos:

- 1) Amplificación de la excentricidad estructural por tratarse de un fenómeno dinámico.- La excentricidad estática debe ser corregida, debido a que existen diferencias entre los resultados de los métodos estático y dinámico de análisis sísmico.
- 2) Excentricidad accidental.- En la excentricidad accidental se incluyen las características que no dependen de la amplificación dinámica. En los reglamentos de diseño sísmico se considera un incremento en los valores nominales de la excentricidad estática calculada debido a la combinación de los siguientes efectos (Rosenblueth, 1979):
  - Efectos de propagación de ondas que provocan movimiento torsional del terreno.
  - Incertidumbre en la distribución en planta de rigideces, masas y resistencias.



- Diferencias de acoplamiento entre la cimentación y el suelo de desplante, etc.

Generalmente, los efectos de la excentricidad accidental se consideran como un porcentaje de la dimensión máxima en planta del entrepiso medida en dirección perpendicular a la dirección de análisis.

## **II.2 Diseño por torsión sísmica estática**

El método de análisis sísmico estático considera un sistema de fuerzas equivalentes obtenidas de un espectro de diseño sísmico.

En este método, la acción del sismo se representa mediante fuerzas horizontales que actúan en los CM de cada entrepiso en dos direcciones ortogonales, y una distribución de los momentos torsionantes entre los elementos estructurales.

Estas fuerzas se distribuyen entre los sistemas resistentes ante carga lateral que tiene la estructura.

### **II.2.1 Disposiciones de diseño por torsión sísmica estática especificadas en el RCDF (1995)**

En el cálculo de los cortantes de diseño sísmico por torsión para los diferentes elementos resistentes de un entrepiso, se considera que éstos son la suma algebraica del cortante directo y del cortante por torsión.



En el método de diseño por torsión sísmica estática, los efectos del cortante directo y por torsión se incluyen de la siguiente manera:

### II.2.1.1 Análisis por traslación (cortante directo)

El análisis por traslación presenta las siguientes consideraciones:

- Supone una distribución lineal con la altura del edificio de las aceleraciones horizontales provocadas por el sismo.
- Los cortantes de entrepiso que se originan de la respuesta traslacional, son evaluados en dos direcciones ortogonales.
- Se considera que el diafragma de piso en todos los entrepisos es infinitamente rígido en su propio plano.

Para el cálculo de las fuerzas cortantes sísmicas en los diferentes niveles de una estructura se realiza un análisis sísmico estático.

La fuerza cortante de entrepiso se distribuye de acuerdo con la rigidez lateral de cada elemento, obteniéndose un cortante directo de diseño, para cada una de las direcciones ortogonales de la estructura, esto es:

$$V_{di,x} = V_{c,x} \frac{k_{i,x}}{\sum k_{i,x}} \quad (2.3)$$

$$V_{di,y} = V_{c,y} \frac{k_{i,y}}{\sum k_{i,y}} \quad (2.4)$$



donde:

$V_{di_x}, V_{di_y}$  = cortante directo del i-ésimo elemento estructural

$V_{cx}, V_{cy}$  = fuerza cortante sísmica del entrepiso

$k_{i_x}, k_{i_y}$  = rigidez lateral de cada elemento estructural

La ecuación anterior, es aplicable cuando se tiene como dato la rigidez lateral de cada elemento estructural.

Para el caso, en que se desconozca la rigidez lateral de los elementos estructurales, el cortante directo se puede obtener como sigue:

- Para cada una de las dos direcciones ortogonales de la estructura, realizar un análisis estructural permitiendo únicamente traslación de los entrepisos, al aplicar las fuerzas cortantes sísmicas de entrepiso, en los CM.
- El cortante directo de un elemento estructural será la fuerza cortante que se obtenga del análisis estructural descrito anteriormente.

### II.2.1.2 Análisis por torsión (cortante por torsión)

La distribución asimétrica de masas y rigideces en las estructuras genera un momento torsionante, producto de la fuerza cortante sísmica multiplicada por la excentricidad de diseño que ocasione el efecto más desfavorable, esto es:



$$M_{t_x} = e_{d_{i_y}} V_{c_x} \quad (2.5)$$

$$M_{t_y} = e_{d_{i_x}} V_{c_y} \quad (2.6)$$

donde:

$M_{t_x}, M_{t_y}$  = momento torsionante del entrepiso, para cada una de las direcciones ortogonales de la estructura

El cortante de entrepiso por torsión se obtiene de la distribución del momento torsionante del mismo, de acuerdo con la contribución de los elementos estructurales a la rigidez torsional del mismo, esto es:

$$V_{t_{ix}} = \frac{k_{i_y} y_i}{K_0} M_{t_x} \quad (2.7)$$

$$V_{t_{iy}} = \frac{k_{i_x} x_i}{K_0} M_{t_y} \quad (2.8)$$

donde:

$V_{t_{ix}}, V_{t_{iy}}$  = cortante por torsión del i-ésimo elemento estructural para cada una de las direcciones ortogonales de análisis

$K_0$  = rigidez torsional de entrepiso, calculado como:

$$K_0 = \sum y_i^2 k_{i_x} + \sum x_i^2 k_{i_y} \quad (2.9)$$

En donde  $x_i, y_i$  son las coordenadas del i-ésimo elemento estructural, con respecto al CT, en las direcciones ortogonales X, Y de la estructura, respectivamente.



Sustituyendo las ecuaciones (2.5) y (2.6), en las ecuaciones (2.7) y (2.8) respectivamente:

$$V_{u_x} = \frac{k_{i_x} y_i}{K_0} V_{c_x} e_{di_y} \quad (2.10)$$

$$V_{u_y} = \frac{k_{i_y} x_i}{K_0} V_{c_y} e_{di_x} \quad (2.11)$$

La fuerza de diseño sísmico,  $(V_{i_x}, V_{i_y})$  del  $i$ -ésimo elemento resistente, será la suma algebraica del cortante directo y del cortante por torsión, para cada una de las direcciones ortogonales de análisis, esto es:

$$V_{i_x} = V_{di_x} \pm V_{ti_x} \quad (2.12)$$

$$V_{i_y} = V_{di_y} \pm V_{ti_y} \quad (2.13)$$

La fuerza de diseño sísmico, será la capacidad de carga que tendrán los elementos estructurales, para soportar tanto la fuerza cortante directa, como la fuerza cortante debida a los efectos torsionantes.

## II.2.2 Denominación de los elementos estructurales en el diseño sísmico por torsión

Los elementos estructurales se denominarán de acuerdo a su ubicación respecto al CT, la cual determinará el efecto que el cortante por torsión tendrá sobre los elementos resistentes.



Los elementos localizados del mismo lado del CT, con respecto al CM, se denominarán elementos rígidos. (Fig. 2.2).

Se denominarán como elementos flexibles a aquellos localizados del mismo lado del CM, con respecto al CT; así como a los elementos que se encuentren entre el CM y el CT.

### II.3 Parámetros de diseño por torsión sísmica desarrollados por Tso y Wong

En trabajos recientes, (Escobar, et al, 2000), se han estudiado los parámetros desarrollados por Tso y Wong (1993), para establecer valores mínimos de la rigidez a torsión de una estructura con la finalidad de mantener sus desplazamientos relativos de entrepiso dentro de ciertos límites admisibles.

Uno de los parámetros sugeridos en estos estudios, es el radio de giro del entrepiso,  $(\rho_x, \rho_y)$ , para cada una de las direcciones ortogonales de la estructura, la cual se define como:

$$\rho_x = \frac{1}{b_y} \cdot \frac{K_\theta}{\sum k_{ix}} \quad (2.14)$$

$$\rho_y = \frac{1}{b_x} \cdot \frac{K_\theta}{\sum k_{iy}} \quad (2.15)$$

El otro parámetro propuesto, es el de la restricción a la torsión,  $(\lambda_x, \lambda_y)$ , el cual para cada una de las dos direcciones de análisis, se define como:





$$\lambda_x = \frac{\sum y_i^2 k_{ix}}{K_0} \quad (2.16)$$

$$\lambda_y = \frac{\sum x_i^2 k_{iy}}{K_0} \quad (2.17)$$

Para estructuras que presenten las rigideces laterales como dato o en sistemas estructurales de un piso, el radio de giro se puede calcular directamente con las ecuaciones (2.14) y (2.15), debido a que la rigidez torsional y lateral del sistema son escalares.

Por otro lado, la determinación del radio de giro para sistemas estructurales de varios pisos es más problemática, debido a que la rigidez torsional y lateral se expresan en forma matricial.

Por esta razón se ha propuesto una alternativa basada en el uso del índice torsional,  $(\Phi_x, \Phi_y)$ , definido como la relación entre los desplazamientos elásticos de los elementos del lado rígido y flexible, cuando el sistema estructural es sujeto a una carga estática equivalente aplicada en el CM de cada uno de los entrepisos, permitiendo traslación en dos ejes ortogonales y rotación alrededor de un eje vertical. Este índice está relacionado con el radio de giro a través de la siguiente expresión, para cada una de las dos direcciones de análisis, (Tso y Wong, 1998):

$$\Phi_x = \frac{d_{\min}}{d_{\max}} = 1 - \left( \frac{e_y}{\rho_x^2} \right) \left[ 1 + \left( \frac{e_y}{\rho_x^2} \right) (0.5 + \eta_x) \right]^{-1} \quad (2.18)$$



$$\Phi_y \equiv \frac{d_{\min}}{d_{\max}} = 1 - \left( \frac{e_x}{\rho_y} \right) \left[ 1 + \left( \frac{e_x}{\rho_y} \right) (0.5 + \eta_y) \right]^{-1} \quad (2.19)$$

donde:

$e_y, e_x$  = excentricidad estructural normalizada con respecto a la dimensión  $b_y, b_x$  respectivamente

$d_{\min}$  y  $d_{\max}$  = desplazamiento mínimo y máximo de los bordes de la losa

$\eta_x, \eta_y$  = distancia entre el CT y el centro geométrico de la planta estructural normalizada con respecto a la dimensión  $b_y$  y  $b_x$  respectivamente

Para la dirección X de análisis, con base en la geometría de la planta estructural, la distancia  $\eta_x$  se puede expresar como:

$$\eta_x = 0.5 + e_y - a_y \quad (2.20)$$

Mientras que para la dirección Y de análisis, la distancia  $\eta_y$  se puede expresar como :

$$\eta_y = 0.5 + e_x - a_x \quad (2.21)$$

donde  $a_y$  y  $a_x$  es la distancia normalizada respecto a  $b_y$  y  $b_x$  respectivamente, entre el CM y el borde del lado rígido. Fig (2.3).

Finalmente, expresando los desplazamientos del CT y la rotación del entrepiso en términos de la rigidez torsional y lateral del sistema estructural, para cada dirección de análisis, se obtiene que:



$$\rho_x^2 = \left[ \frac{0.5(1 + \Phi_x)}{1 - \Phi_x} - \eta_y \right] e_y \quad (2.22)$$

$$\rho_y^2 = \left[ \frac{0.5(1 + \Phi_y)}{1 - \Phi_y} - \eta_x \right] e_x \quad (2.23)$$

Por tanto, estas ecuaciones permiten obtener el radio de giro de cada uno de los entresijos, a partir de un análisis estructural estático convencional en tres dimensiones.

Como se verá posteriormente, los parámetros propuestos por Tso y Wong, son una herramienta importante para el diseño por torsión. Con base en ellos, se desarrolla un procedimiento de diseño por torsión sísmica estática alternativo.



### **III. PROCEDIMIENTO SIMPLIFICADO PARA EL DISEÑO POR TORSIÓN SÍSMICA ESTÁTICA**

#### **III.1 Antecedentes**

Como se mencionó en el capítulo anterior, los efectos torsionantes en el diseño sísmico, se incluyen al suponer que la fuerza cortante de entrepiso se desplaza de su posición original una cierta cantidad, denominada excentricidad estructural o de diseño. Esta cantidad incluye los efectos de la torsión accidental como los debidos a afectos dinámicos.

El RCDF en vigor, establece que para tomar en cuenta los efectos de torsión, es necesario hacer un análisis de la estructura para cada posición del CM desplazado lo que puede resultar demasiado laborioso y confuso en el caso de un análisis de una estructura de varios niveles, esto se puede traducir tanto en errores de interpretación como en una estimación inadecuada de la respuesta sísmica de la estructura.



A continuación se analizan las ecuaciones propuestas por el RCDF para el diseño por torsión sísmica estática, con el objetivo de desarrollar un procedimiento que, de una manera simple, incluya el efecto de torsión (Escobar, et al, 2000).

### III.2 Distribución de la resistencia entre los elementos estructurales

Como se mencionó, el diseño por torsión del  $i$ -ésimo elemento resistente de un entrepiso debe incluir un cortante directo y un cortante por torsión, ecuaciones (2.12) y (2.13). En la Fig.3.1 se presenta esquemáticamente este efecto en la planta de un sistema estructural simple.

Para la dirección X de análisis, sustituyendo las ecuaciones (2.3) y (2.10) en (2.12) se obtiene:

$$V_{ix} = \frac{k_{ix}}{\sum k_{ix}} V_{cx} \pm \frac{k_{ix} y_i}{K_\theta} V_{cx} e_{diy} \quad (3.1)$$

De la ecuación (2.14), se tiene que:

$$K_\theta = (\sum k_{ix}) \rho_x^2 b_y^2 \quad (3.2)$$

Sustituyendo la ecuación (3.2) en (3.1):

$$V_{ix} = \frac{k_{ix}}{\sum k_{ix}} V_{cx} \pm \frac{k_{ix} y_i}{\sum k_{ix} \rho_x^2 b_y^2} V_{cx} e_{diy} \quad (3.3)$$



Simplificando:

$$V_{ix} = V_{dix} \left[ 1 \pm \frac{y_i}{\rho_x^2 b_y^2} e_{di,y} \right] \quad (3.4)$$

Así, la resistencia para un elemento rígido, será el valor máximo de:

$$V_{ix} = V_{dix} \left[ 1 - \frac{\alpha e_{sy} + \beta b_y}{\rho_x^2 b_y^2} y_i \right] = V_{dix} \left[ 1 - \frac{\beta}{\rho_x^2 b_y} y_i - \frac{\alpha e_{sy}}{\rho_x^2 b_y^2} y_i \right] \quad (3.5)$$

y

$$V_{ix} = V_{dix} \left[ 1 - \frac{\delta e_{sy} - \beta b_y}{\rho_x^2 b_y^2} y_i \right] = V_{dix} \left[ 1 + \frac{\beta}{\rho_x^2 b_y} y_i - \frac{\delta e_{sy}}{\rho_x^2 b_y^2} y_i \right] \quad (3.6)$$

Igualando las ecuaciones (3.5) y (3.6), se tiene que:

$$-\beta b_y - \alpha e_{s_y} < \beta b_y - \delta e_{s_y} \quad (3.7)$$

Aplicando los valores de los factores de amplificación dinámica del RCDF a la ecuación (3.7), se observa que la ecuación (3.6), regirá el diseño de un elemento rígido.

Para un elemento flexible, la resistencia está dada por el valor máximo de:

$$V_{ix} = V_{dix} \left[ 1 + \frac{\alpha e_{s_y} + \beta b_y}{\rho_x^2 b_y^2} y_i \right] = V_{dix} \left[ 1 + \frac{\beta}{\rho_x^2 b_y} y_i + \frac{\alpha e_{s_y}}{\rho_x^2 b_y^2} y_i \right] \quad (3.8)$$

y



$$V_{ix} = V_{dix} \left[ 1 + \frac{\delta e_{sy} - \beta b_y}{\rho_x^2 b_y^2} y_i \right] = V_{dix} \left[ 1 - \frac{\beta}{\rho_x^2 b_y} x_i + \frac{\delta e_{sy}}{\rho_x^2 b_y^2} y_i \right] \quad (3.9)$$

Debido a los valores de los factores de amplificación dinámica del RCDF, se puede demostrar que la ecuación (3.8) regirá el diseño de los elementos flexibles.

El efecto de la excentricidad accidental en el diseño por torsión sísmica estática, ( $fa_{ix}$ ), tanto de elementos rígidos como flexibles, ecuaciones (3.6) y (3.8), está dado por:

$$fa_{ix} = \frac{\beta}{\rho_x^2 b_y} y_i \quad (3.10)$$

Mientras que el efecto debido al incremento de la excentricidad estructural por los factores dinámicos, ( $fe_{n_x}, fe_{n_x}$ ), en el diseño por torsión sísmica estática, para un elemento rígido, de la ecuación (3.6), se tiene que:

$$fe_{n_x} = - \frac{\delta e_{sy}}{\rho_x^2 b_y^2} y_i \quad (3.11)$$

Para un elemento flexible, de la ecuación (3.8):

$$fe_{n_x} = \frac{\alpha e_{sy}}{\rho_x^2 b_y^2} y_i \quad (3.12)$$



Por lo tanto, la fuerza que deben resistir los elementos estructurales del lado rígido es:

$$V_{i_x} = V_{di_x} (1 + fa_{i_x} + fe_{ri_x}) \quad (3.13)$$

Mientras que la fuerza resistente de los elementos estructurales del lado flexible es:

$$V_{i_x} = V_{di_x} (1 + fa_{i_x} + fe_{fi_x}) \quad (3.14)$$

Con base en lo anterior, se puede afirmar que para ambos tipos de elementos (rígido y flexible) el efecto de la excentricidad accidental, ecuación (3.10), siempre es aditivo.

Así, el diseño por torsión sísmica estática se puede simplificar agregando este efecto al ocasionado por la excentricidad estática. Simplificándose así, el tener que realizar un análisis de la estructura para cada posición del CM desplazado, como lo indica el RCDF.

### **III.3 Disposiciones de diseño por torsión de la propuesta a las Normas Técnicas Complementarias para diseño por sismo (NTC-2001)**

En las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, (NTC-2001), se modificaron las disposiciones al diseño sísmico por torsión respecto a la edición de 1995, indicándose que:

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





Esta consideración está basada en estudios recientes, (Escobar, et al. 2000), en donde se comprobó que las estructuras podían llegar a presentar algunos problemas estructurales, debido a que sus elementos presentaban resistencia de diseño menores a las calculadas únicamente con el cortante directo. Con base en esta consideración, la fuerza que deben resistir los elementos estructurales, tendrá que ser igual o mayor al cortante directo.

Para los elementos rígidos, el cortante total de diseño se calculará con la ecuación (3.13), cuando resulte mayor que el cortante directo; por tanto, esta ecuación se aplicará si:

$$\left[ 1 + \frac{\beta b_y}{\rho_x^2 b_y^2} y_i - \frac{\delta e_{s_y}}{\rho_x^2 b_y^2} |y_i| \right] \geq 1 \quad (3.15)$$

Reduciendo la ecuación (3.15), se llega a:

$$\delta e_{s_y} \leq \beta b_y$$

Como se mencionó anteriormente, en el caso del RCDF,  $\delta=1$  y  $\beta=0.1$ .

Con base en esto, la resistencia total de diseño para un elemento rígido será la calculada con la ecuación (3.13), siempre y cuando:

$$\frac{e_{s_y}}{b_y} < 0.1 \quad (3.16)$$



En caso contrario, la resistencia del elemento rígido estará dada por el cortante directo.

En el caso de los elementos flexibles, el cortante total de diseño, calculado con la ecuación (3.14), resulta ser mayor al cortante directo, debido a que el cortante por torsión se adiciona al cortante directo en todos los casos. Esto se puede observar en la ecuación (3.8), en donde el valor del factor que multiplica al cortante directo, es mayor que la unidad.

### **III.4 La torsión sísmica en el diseño por torsión sísmica estática**

Como se puede observar en las ecuaciones (3.13) y (3.14), el efecto de la torsión sísmica en el diseño por torsión sísmica estática, esta en función del cortante directo y del efecto ocasionado por la excentricidad accidental, así como al debido a los factores dinámicos.

#### **III.4.1 Efecto de la excentricidad accidental en el diseño por torsión sísmica estática**

Como se mencionó anteriormente el efecto de la excentricidad accidental, se puede llevar a cabo considerando el factor  $f_{a_{i,x,y}}$ , siendo este siempre aditivo.

Así, para la dirección X de análisis, el valor máximo de  $f_{a_{i,x}}$ , ecuación (3.10), está dado por:



$$fa_{ix} = \frac{\beta}{\rho_x^2} b_y y_{imax} \quad (3.17)$$

donde  $y_{imax}$  es la distancia entre el CT y el elemento más alejado al CT en un entrepiso. Fig (3.2).

Para una estructura en donde el CT se encuentre en el extremo de la estructura, la distancia  $y_{imax}$  es igual a la distancia  $b_y$ , esto es:

$$fa_{ix} = \frac{\beta}{\rho_x^2} \quad (3.18)$$

Se puede observar en la ecuación (3.18), que  $fa_{ix}$  está en función del radio de giro y del parámetro  $\beta = 0.1$ .

En la Fig 3.3 se presenta, para distintos valores de  $\rho_x^2$ , el efecto máximo debido a la excentricidad accidental,  $fa_{ix}$ , en estructuras en donde el CT esté ubicado en uno de sus extremos. En esta figura se puede apreciar que para valores de  $\rho_x^2$  superiores a 1.0, el valor de  $fa_{ix}$  es inferior a 0.1. Mientras, para valores de  $\rho_x^2$  superiores a la unidad, el efecto debido a la excentricidad accidental, presenta variaciones en un intervalo muy amplio.

Por otro lado, la distancia  $y_i$ , de la ecuación (3.10), para un elemento estructural, se puede calcular de la siguiente manera:

$$y_i = \Delta_{ix} b_y \quad (3.19)$$



donde la distancia  $y_i$  es una fracción de  $b_y$ , representada a través de la relación entre estas distancias mediante el parámetro  $\Delta_{i_x}$ , el cual tiene valores de 0 a 1, Fig 3.4.

Sustituyendo la ecuación (3.19) en la ecuación (3.10) y simplificando, se tiene que:

$$fa_{i_x} = \frac{\beta}{\rho_x^2} |\Delta_{i_x}| \quad (3.20)$$

En la Fig 3.5, se presenta el comportamiento de  $fa_{i_x}$ , ecuación (3.20), con respecto a  $\rho_x^2$ , para valores de  $\Delta_{i_x}$  entre 0.2 y 1. Se puede observar que los valores de  $fa_{i_x}$ , presentan un comportamiento similar en todos los casos, para los distintos valores de  $\Delta_{i_x}$ , también se puede apreciar que el comportamiento de  $fa_{i_x}$  para  $\Delta_{i_x}=1$ , presenta los valores máximos, lo que comprueba lo observado anteriormente en donde  $y_i = b_y$ .

En la Fig 3.6 se presenta el comportamiento de  $fa_{i_x}$ , ecuación (3.20), con respecto a  $\rho_x^2$ , para valores de  $\Delta_{i_x}$  entre 0.2 y 1 en escala logarítmica; se puede observar que el comportamiento de  $fa_{i_x}$  respecto a  $\rho_x^2$  es lineal en todo el intervalo, esto es:

$$\log fa_{i_x} = \log \rho_x^2 + \log \frac{\Delta_{i_x}}{10} \quad (3.21)$$

Simplificando, la ecuación (3.21), se tiene que:



$$fa_{ix} = \frac{\Delta_{ix}}{10\rho_x^2} \quad (3.22)$$

### III.4.2 Efecto del incremento de la excentricidad estructural en el diseño por torsión sísmica estática

El efecto debido al incremento de la excentricidad estructural en el diseño por torsión sísmica estática, se puede llevar a cabo mediante los factores,  $fe_{n_x}, fe_{n_y}$ , ecuaciones (3.11) y (3.12); estos factores son aplicables a elementos rígidos y flexibles respectivamente.

#### III.4.2.1 Elementos rígidos

Para el caso de un elemento rígido, sustituyendo la ecuación (3.19) en la ecuación (3.11), se tiene que:

$$fe_{n_x} = -\frac{\delta e_{s_y}}{\rho_x^2 b_y} |\Delta_{ix} b_x| \quad (3.23)$$

donde  $\delta$  es el factor de excentricidad dinámica igual a 1.

Por otro lado, la excentricidad estructural normalizada,  $e_y$ , con respecto a la dimensión  $b_y$  es:

$$e_y = \frac{e_{s_y}}{b_y} \quad (3.24)$$



Sustituyendo la ecuación (3.24) en la ecuación (3.23) y simplificando, se tiene que:

$$fe_{n_x} = -\frac{e_y}{\rho_x^2} |\Delta_{i_x}| \quad (3.25)$$

En la ecuación anterior, se puede observar que para valores de  $e_y = 0.1$ , el factor  $fe_{n_x}$  tiene el mismo valor que  $fa_{i_x}$  aunque con signo contrario.

En este caso, el parámetro  $\Delta_{i_x}$  tendrá un valor máximo de 0.5, debido a que la distancia de un elemento rígido al CT, no puede ser mayor a  $0.5b_y$ .

El comportamiento de  $fe_{n_x}$ , ecuación (3.25), se muestra en la Fig 3.7, en este caso se varían los valores del radio de giro entre 0.01 y 3.0, con excentricidades estructurales normalizadas de 0.05 y 0.1, para valores de  $\Delta_{i_x}$  igual a 0.1 y 0.5.

En esta figura se puede observar que el efecto que produce el factor  $fe_{n_x}$  en el diseño por torsión sísmica estática es inverso respecto a lo presentado por el factor  $fa_{i_x}$ .

#### III.4.2.2 Elementos flexibles

Sustituyendo las ecuaciones (3.19) y (3.24) en la ecuación (3.12) y simplificando, se tiene que:



$$f_{e_{\bar{n}_x}} = \frac{1.5 e_x}{\rho_x^2} |\Delta_{i_x}| \quad (3.26)$$

En la Fig 3.8. se muestra el comportamiento de  $f_{e_{\bar{n}_x}}$ , en este caso, se consideraron excentricidades estructurales normalizadas entre 0.1 y 0.3 con valores de  $\Delta_{i_x}$  entre 0.1 y 1.

La tendencia del comportamiento de  $f_{e_{\bar{n}_x}}$ , resulta similar a lo observado con el factor  $f_{a_{i_x}}$ , esto debido a que los parámetros involucrados en ambos factores producen efectos similares.

#### III.4.3 Efecto de la torsión sísmica en el diseño por torsión sísmica estática

Como se mencionó anteriormente, en el diseño por torsión sísmica estática el efecto de la torsión sísmica se puede llevar a cabo considerando el efecto debido a la excentricidad accidental y el debido al incremento de la excentricidad estructural, esto es:

$$f_{T_{ri_x}} = f_{a_{i_x}} + f_{e_{ri_x}} \quad (3.27)$$

$$f_{T_{\bar{n}_x}} = f_{a_{i_x}} + f_{e_{\bar{n}_x}} \quad (3.28)$$

donde  $f_{T_{ri_x}}$  y  $f_{T_{\bar{n}_x}}$  es el efecto de la torsión sísmica en el diseño por torsión sísmica estática, para un elemento rígido y flexible respectivamente.



### III.4.3.1 Elementos rígidos

Sustituyendo las ecuaciones (3.22) y (3.25) en la ecuación (3.27), se obtiene:

$$f_{T_{ri_x}} = \frac{\Delta_{i_x}}{10\rho_x^2} - \frac{\Delta_{i_x}}{\rho_x^2} |e_y| \quad (3.29)$$

Simplificando la ecuación (3.29):

$$f_{T_{ri_x}} = \frac{\Delta_{i_x}}{\rho_x^2} [0.1 - e_y] \quad (3.30)$$

La ecuación (3.30) se aplica a elementos resistentes del lado rígido, siempre y cuando la excentricidad estructural normalizada,  $e_y$ , sea menor a 0.1, esto para cumplir con las consideraciones de las NTC-2001, debido a que el efecto de la torsión sísmica no debe tomar valores negativos en elementos localizados del lado rígido.

Así, en caso de que  $e_y \geq 0,1$ :

$$f_{T_{ri_x}} = 0 \quad (3.31)$$

Por lo tanto, para elementos rígidos con valores de excentricidad estructural normalizada, mayor o igual a 0.1, el efecto de la torsión sísmica en el diseño por torsión sísmica estática es nulo.





En la Fig 3.9. se presenta el comportamiento del factor  $f_{Tn_x}$ , en esta figura se puede observar que para valores de excentricidad estructural nula, el efecto de la torsión sísmica presenta valores máximos.

Por lo tanto, para el caso de elementos rígidos, el efecto de la torsión sísmica en el diseño por torsión sísmica estática será máximo cuando no se presenten excentricidades estructurales.

Esta afirmación podría ser contradictoria a lo que generalmente se ha pensado del efecto torsionante en las estructuras, debido a que usualmente se entiende que al no presentarse excentricidad estática en una estructura el efecto por torsión es nulo. Aunque como se demostró anteriormente, para el caso de un elemento rígido, el efecto de la torsión sísmica es máximo cuando la excentricidad estructural es igual a cero.

#### III.4.3.2 Elementos flexibles

Sustituyendo las ecuaciones (3.22) y (3.26) en la ecuación (3.28) y simplificando, se tiene que:

$$f_{Tn_x} = \frac{\Delta_{1y}}{\rho_x^2} [0.1 + 1.5e_y] \quad (3.32)$$

En la Fig 3.10 se presenta el comportamiento del factor  $f_{Tn_x}$ . En este caso, a diferencia de lo que ocurre con un elemento rígido, entre mayor sea el valor de la excentricidad estructural normalizada, el efecto de la torsión



sísmica tendrá valores máximos, como se puede observar en la ecuación anterior.

Por lo tanto, sustituyendo la ecuación (3.27) en (3.13), la fuerza que deben resistir los elementos estructurales del lado rígido, es:

$$V_{i_x} = V_{di_x} [1 + r_{Tri_x}] \quad (3.33)$$

Mientras que sustituyendo la ecuación (3.28) en (3.14), la fuerza resistente de los elementos estructurales del lado flexible es:

$$V_{i_x} = V_{di_x} [1 + r_{Tri_x}] \quad (3.34)$$

Así, el diseño por torsión sísmica estática, se puede simplificar al agregar el efecto de la torsión sísmica al cortante directo.

Por lo tanto, el diseño por torsión sísmica estática se puede llevar a cabo al aplicar las ecuaciones (3.30) a (3.34), de una manera más sencilla que como se realiza actualmente, también permite una clara interpretación de la distribución de las fuerzas en los elementos resistentes.

### III.5 Procedimiento simplificado de diseño (PSD)

En este procedimiento se conservan las disposiciones del RCDF, esto con la finalidad de simplificar el diseño por torsión sin alterar el formato actual con el que ya se está familiarizado



1. Calcular las fuerzas cortantes de entrepiso a partir de un análisis sísmico estático considerando un sistema de fuerzas equivalentes obtenidas de un espectro de diseño sísmico.
2. Obtener los cortantes directos en los elementos estructurales. Esto se hace distribuyendo la fuerza cortante total de cada entrepiso de acuerdo con la rigidez lateral de cada elemento.
3. Con los cortantes directos obtenidos del paso anterior, calcular las coordenadas de los centros de torsión  $X_{CT,j}$  y  $Y_{CT,j}$  de cada uno de los entrepisos, Fig 3.11, de la forma siguiente:

$$Y_{CT,j} = \frac{\sum (V_{d_{i_x,j}} d_{i_y})}{V_{c_{x,j}}} \quad (3.35)$$

$$X_{CT,j} = \frac{\sum (V_{d_{i_y,j}} d_{i_x})}{V_{c_{y,j}}} \quad (3.36)$$

donde:

$V_{d_{i_x,j}}, V_{d_{i_y,j}}$  = fuerzas cortantes en las direcciones X y Y del i-ésimo elemento resistente del j-ésimo entrepiso

$V_{c_{x,j}}, V_{c_{y,j}}$  = fuerza cortante sísmica del j-ésimo entrepiso

$d_{i_y}, d_{i_x}$  = coordenadas de los elementos resistentes respecto a un eje de referencia

4. Con los valores calculados del CT y del CM, calcular la excentricidad estructural de cada entrepiso.



5. Calcular los cortantes que deberán resistir los elementos estructurales en cada entrepiso, al considerar la torsión sísmica. Para ello, dependiendo de dónde esté localizado cada uno de los elementos resistentes (lado rígido o lado flexible) en la planta del entrepiso, utilizar las ecuaciones (3.30) a (3.34).



## IV. APLICACIÓN DEL PSD A UN MODELO ESTRUCTURAL DE VARIOS PISOS

Para ilustrar la aplicación del procedimiento simplificado de diseño por torsión propuesto en el capítulo anterior, se utilizó el edificio de 5 pisos mostrado en la Fig 4.1 (Bazán y Meli, 1998).

### IV.1 Modelo estructural

Se considera que la estructuración, los materiales y los detalles constructivos empleados son tales que el factor de comportamiento sísmico  $Q$  puede tomarse igual a 4 en la dirección X, e igual a 2 en la dirección Y.

Los valores de  $Q$  son distintos en las dos direcciones de análisis, para suponer que las estructuraciones respectivas son diferentes. Se considera además que la estructura está ubicada en la zona de terreno compresible



(III) y que se trata de una construcción que por su importancia se clasifica como del grupo A.

Por otro lado, se supone que las masas de cada uno de los entrepisos están uniformemente distribuidas en planta y que el edificio cumple con los requisitos de regularidad marcados por las NTC-2001 por lo que será innecesario reducir  $Q'$ ; la rigidez de cada elemento estructural se muestra en la Fig 4.1.

#### **IV.2 Determinación de las resistencias de diseño por torsión en los elementos estructurales**

##### ***Paso 1. Cálculo de fuerzas laterales de entrepiso***

De acuerdo con Bazán y Meli (1998), las fuerzas laterales producidas se presentan en la tabla 4.1

##### ***Paso 2. Cálculo de los cortantes directos de los elementos estructurales***

Para la dirección X de análisis, (Fig 4.1), en la tabla 4.2, se presentan los cortantes directos generados en cada uno de los entrepisos de los elementos resistentes. En la tabla 4.3 se muestran los cortantes directos para la dirección Y de análisis.

##### ***Paso 3. Cálculo de la posición del CT***

Con los cortantes directos obtenidos, se calculan las coordenadas de los CT de los entrepisos como sigue, para la dirección X de análisis:



$$Y_{CT,5} = \frac{(6.48)(0) + (4.32)(3.5) + (12.97)(7.5)}{23.77} = 4.73 \text{ m}$$

$$Y_{CT,4} = \frac{(13.51)(0) + (9.00)(3.5) + (9.00)(7.5) + (18.01)(11)}{49.52} = 6.00 \text{ m}$$

$$Y_{CT,3} = \frac{(13.11)(3.5) + (13.11)(7.5) + (26.22)(11)}{74.28} = 5.82 \text{ m}$$

$$Y_{CT,2} = \frac{(16.17)(3.5) + (16.17)(7.5) + (32.33)(11)}{191.61} = 5.82 \text{ m}$$

$$Y_{CT,1} = \frac{(18.26)(3.5) + (18.26)(7.5) + (36.53)(11)}{103.50} = 5.82 \text{ m}$$

Para la dirección Y de análisis:

$$X_{CT,5} = \frac{(26.45)(0) + (1.43)(6.5) + (19.66)(13.5)}{47.54} = 5.78 \text{ m}$$

$$X_{CT,4} = \frac{(51.93)(0) + (2.88)(6.5) + (2.88)(13.5) + (41.35)(20)}{99.04} = 8.93 \text{ m}$$

$$X_{CT,3} = \frac{(3.78)(6.5) + (3.78)(13.5) + (60.43)(20)}{148.56} = 8.64 \text{ m}$$

$$X_{CT,2} = \frac{(4.66)(6.5) + (4.66)(13.5) + (74.53)(20)}{183.23} = 8.64 \text{ m}$$

$$X_{CT,1} = \frac{(5.26)(6.5) + (5.26)(13.5) + (84.20)(20)}{207.00} = 8.64 \text{ m}$$

Con fines comparativos, en la tabla 4.4 se muestran los CT aquí calculados y los obtenidos por Bazán y Meli (1988), para cada dirección en estudio. se



puede observar que los valores obtenidos de la localización del CT, son prácticamente iguales.

#### ***Paso 4. Cálculo de la excentricidad estructural en cada entrepiso***

Con los CM y los CT obtenidos para cada uno de los entrepisos, se calcula la excentricidad estructural. Para su diseño, se clasifica a cada uno de los elementos estructurales, de acuerdo con su posición respecto al CT para cada entrepiso. En las tablas 4.5 y 4.6 se presentan las excentricidades estructurales de entrepiso, para cada dirección de análisis.

#### ***Paso 5. Evaluación de los efectos de torsión sobre los elementos resistentes***

En este caso, debido a que se conocen las rigideces de cada uno de los elementos resistentes, se calcula el radio de giro de entrepiso, ( $\rho_x$ ,  $\rho_y$ ), utilizando las ecuaciones (2.14) y (2.15).

En la tabla 4.7 y 4.8, para cada uno de los elementos resistentes ubicados en las direcciones X y Y del entrepiso 5 respectivamente, se presentan los valores del cortante directo, la distancia al CT y su clasificación. Como se puede observar, en la dirección X, para el elemento del lado rígido, marco 3X, el cortante por torsión que deberá resistir se calculará con las ecuaciones (3.30), (3.31) y (3.33). Por otro lado, para los otros dos elementos resistentes del mismo entrepiso, se usan las ecuaciones (3.32) y (3.34), por estar localizados del lado flexible.

Así se tiene que, para los elementos resistentes en la dirección X de análisis, de la ecuación (2.14):





$$\rho_x = \frac{1}{7.5} \cdot \frac{621693}{4400} = 1.585; \rho_x^2 = 2.5126$$

De la ecuación (3.19):

$$\Delta_{1x} = \frac{4.73}{7.5} = 0.63$$

$$\Delta_{2x} = \frac{1.23}{7.5} = 0.16$$

$$\Delta_{3x} = \frac{2.77}{7.5} = 0.37$$

La excentricidad estructural normalizada, de la ecuación (3.24), es:

$$e_y = \frac{0.98}{7.5} = 0.13 > 0.1$$

Para el elemento rígido, se tiene que, de la ecuación (3.31):

$$f_{Tr3x} = 0$$

De la ecuación (3.33):

$$V_{3x} = 12.97[1+0] = 12.97 t$$

Para los elementos flexibles, se tiene que, de la ecuación (3.32):



$$f_{Tr1x} = \frac{0.63}{2.5126}[0.1 + 1.5(0.13)] = 0.074$$

$$f_{Tr2x} = \frac{0.16}{2.5126}[0.1 + 1.5(0.13)] = 0.019$$

De la ecuación (3.34):

$$V_{1x} = 6.48[1 + 0.074] = 6.96t$$

$$V_{2x} = 4.32[1 + 0.019] = 4.41t$$

En la tabla 4.9, se presentan los factores  $f_{Tr1x}$  y  $f_{Tr2x}$ , de los elementos resistentes del entrepiso 5, para la dirección X de análisis. También se presentan los cortantes sísmicos por torsión calculados.

En la última columna de la tabla 4.9, se muestran los cortantes obtenidos por Bazán y Meli, para fines comparativos. Como se observa, estos valores son prácticamente iguales a los obtenidos con el procedimiento propuesto.

Para los elementos resistentes en la dirección Y del último entrepiso de la misma estructura, se tiene, de la ecuación (2.15):

$$\rho_y = \frac{1}{13.5} \sqrt{\frac{621693}{13300}} = 0.506; \quad \rho_y^2 = 0.256$$

De la ecuación (3.19):



$$\Delta_{1y} = \frac{5.78}{13.5} = 0.43$$

$$\Delta_{2y} = \frac{0.72}{13.5} = 0.05$$

$$\Delta_{3y} = \frac{7.72}{13.5} = 0.57$$

La excentricidad estructural normalizada, de la ecuación (3.24), es:

$$e_x = \frac{0.97}{13.5} = 0.07 < 0.1$$

Para el elemento rígido, se tiene que, de la ecuación (3.30):

$$f_{Tr1y} = \frac{0.43}{0.256} [0.1 - 0.07] = 0.047$$

De la ecuación (3.33):

$$V_{1y} = 26.45[1 + 0.047] = 27.691$$

Para los elementos flexibles, se tiene que, de la ecuación (3.32):

$$f_{Tr2y} = \frac{0.05}{0.256} [0.1 + 1.5(0.07)] = 0.043$$

$$f_{Tr3y} = \frac{0.57}{0.256} [0.1 + 1.5(0.07)] = 0.464$$

De la ecuación (3.34):



$$V_{2y} = 1.43[1 + 0.043] = 1.49t$$

$$V_{3y} = 19.66[1 + 0.464] = 28.78t$$

En la tabla 4.10 se presentan los cortantes por torsión calculados arriba, y los obtenidos por Bazán y Meli (1998), anotados en la última columna.

Con base en lo anterior, los cortantes sísmicos por torsión calculados con el procedimiento simplificado de diseño son muy similares a los obtenidos por Bazán y Meli (1998), comprobándose la precisión del método aquí propuesto.

En las tablas 4.11 y 4.12 se muestran los cortantes por torsión calculados con el procedimiento simplificado de diseño anterior y los obtenidos por Bazán y Meli (1998), de los entrepisos del edificio en estudio, para cada una de las direcciones analizadas respectivamente.

Finalmente en las tablas 4.13 a 4.18 se presenta un resumen de los cálculos realizados para cada uno de los entrepisos de la estructura, así como para cada dirección de análisis.



## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se analizaron las disposiciones de diseño por torsión establecidas en el RCDF, y se estableció un procedimiento simplificado de diseño por torsión sísmica estática, en modelos estructurales de varios niveles.

El Procedimiento Simplificado de Diseño, PSD, presentado en este trabajo, obtiene la respuesta de los elementos resistentes, con base en la determinación del efecto por torsión que presenta cada elemento estructural y del cortante directo.

En este procedimiento se introdujeron los conceptos de restricción a la torsión y radio de giro.



Se realizó una clasificación de los elementos estructurales según su localización respecto al CT, para lograr una clara interpretación de la respuesta a la torsión de cada elemento estructural.

El efecto por torsión que presentan los elementos estructurales, depende directamente de la posición y clasificación de cada elemento estructural, así como de los parámetros involucrados en la excentricidad de diseño y del radio de giro de entrepiso.

Al aplicar el PSD a un modelo estructural de varios niveles se observó que los resultados obtenidos son muy similares respecto a los obtenidos al utilizar un método estático con los criterios actuales del RCDF.

Así el procedimiento simplificado de diseño, es una nueva propuesta para el diseño por torsión sísmica estática, ya que mantiene las disposiciones de diseño actuales, de una manera simple y más comprensible que como se lleva a cabo actualmente, como se comprobó en los resultados obtenidos.

Por otro lado, el efecto de la excentricidad accidental, en el diseño por torsión sísmica estática, es aditivo para todos los elementos estructurales. Esta consideración puede ser de gran utilidad al realizar un análisis sísmico dinámico, debido a que se podría incluir este efecto en los elementos estructurales sin tener que realizar el traslado del CM, como lo indica actualmente el RCDF, lo que simplificaría el análisis dinámico.

A partir de los resultados obtenidos y con el propósito de adquirir un mayor conocimiento sobre el fenómeno de la torsión sísmica, es conveniente establecer las siguientes recomendaciones:



Los reglamentos y normas para diseño deben tener una actualización periódica, con el objetivo de comprender y mejorar el comportamiento de las estructuras. Por otra parte, se debe buscar que los criterios de diseño sísmico contengan recomendaciones que incluyan, en una forma más clara de lo que ahora ocurre, las demandas sísmicas y capacidades estructurales más importantes.

Debido a que en el presente trabajo, el modelo utilizado contiene plantas estructurales regulares, es recomendable que se evalúe el comportamiento de edificios de varios niveles con plantas estructurales no regulares, con el objetivo de validar el PSD presentado.

También es conveniente que se estudie el comportamiento de modelos estructurales de varios niveles, utilizando el criterio propuesto por Tso y Wong (1998), para el cálculo del radio de giro cuando se desconocen las rigideces laterales de los elementos estructurales, así como en diferentes zonas sísmicas.

En lo que respecta al efecto de la torsión accidental, es conveniente aumentar las bases con ayuda de estudios adicionales, además del planteamiento y análisis de un modelo estructural que involucre características no contempladas en esta investigación, como por ejemplo, la inclusión de estos modelos en un análisis dinámico en donde el comportamiento estructural trabaja en un intervalo no lineal, y compararlo con el efecto de la excentricidad accidental presentado en este trabajo.



## REFERENCIAS

**Avila J, Gallegos H y Díaz J.,** "Criterios para incluir el efecto de torsión en la respuesta sísmica de estructuras tridimensionales", VIII Congreso Nacional de ingeniería Sísmica. Acapulco, Gro., 1989.

**Ayala G., Escobar J. A. y García O.** "Comportamiento sísmico no lineal de modelos de edificios asimétricos", XII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, Buenos Aires. Argentina, 1992.

**Bazán, E. y Meli, R.** "Diseño sísmico de edificios", Edit. LIMUSA, México, 1998.

**Chopra A. K. y Goel R. K.** "Evaluation of torsional provisions in seismic codes", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 17, No 12, 3762-3782. 1991.

**Damy, J. y Alcocer, M.** "Obtención del centro de torsión de edificios", Memorias del VII Congreso de Ingeniería Sísmica, Querétaro, Qro., noviembre, 1987.





**Escobar, J. A.** "Respuesta sísmica de estructuras asimétricas inelásticas con propiedades inciertas", Tesis doctoral, DEPMI, UNAM, México, 1994.

**Escobar J. A.** "Relación entre rigidez y resistencia debido a criterios de diseño por torsión", Séptimas Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica y Primer Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, Vol. I, 457-464. La Serena, Chile, 1997.

**Escobar J. A., Gómez R. y Páez A.** "Evaluación de criterios de diseño por torsión", Informe de proyecto 9530 para la Dirección General de obras del Gobierno del D.F., Instituto de Ingeniería, UNAM, México, diciembre, 2000.

**García O.** "Comportamiento sísmico de modelos de edificios en torsión". Tesis de Maestría, DEPMI, UNAM, México, 1992.

**Goel R. y Chopra A.** "Seismic code analysis of buildings without locating centers of rigidity", Journal of structural Engineering, Vol. 119, No. 10, 1993.

**Jaramillo J. D.** "Torsión sísmica en edificios", Tesis de Maestría, UNAM, México, 1987.

**Meli R.** "Diseño estructural", Edit. Limusa, México, 1995

**Meli R. y Miranda E.** "Evaluación de los efectos de los sismos de septiembre de 1985 en los edificios de la ciudad de México, Parte I. Evaluación de Daños", Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 1986.

**Newmark N. y Rosenblueth E.** "Fundamentos de ingeniería sísmica", Edit DIANA, México 1974.



NTCDS-1995, "Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo". Gaceta Oficial del Distrito Federal, México, 1995.

NTCDS-2001, "Propuesta de Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo", México, Abril, 2001.

Paz M. "International handbook of earthquake engineering". Codes, Programs and Examples, Edit. Chapman and Hall, EUA, 1994.

Páez A. y Escobar J. A. "Diseño sísmico por torsión, requisito complementario", El portulano de la ciencia, revista editada por el IPN, México, Vol. 1, No. 3 Mayo-Agosto, 120-126, 2000

Páez A., Escobar J. A. y Gómez R. "Diseño de edificios por torsión, una tendencia alternativa", XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Morelia, Michoacán Vol. II, 1081-1090, 1999.

Rosenblueth E. "Seismic design requirements in a mexican 1976 code", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 7, 49-61, 1979.

Rosenblueth E. y Gómez R. "Comentarios y ejemplos a las Normas Técnicas complementarias para diseño por sismo", Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 1991.

Smith S. B. y Vézina S. "Evaluación de centros de torsión", Revista IMCYC, Vol. 25, No. 195, 1987.

Tso W. K., y C. M. Wong, "An evaluation of the New Zealand code torsional provision", Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol. 26, No. 2, 194-207, 1993.



**Tso W. K., y Moghadam A. S.** "Application of Eurocode 8 torsional provisions to multi-storey buildings". European Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam, 1998.

**Zapata A.** "Comportamiento en torsión de estructuras de cortante de varios niveles". Tesis de Maestría, DEPMI, UNAM, México, 1993.



<b>CÓDIGO</b>	$\alpha$	$\delta$	$\beta$
<b>MÉXICO</b>	1.5	1.0	0.1
<b>PERU</b>	1.5	1.0	0.05
<b>CANADA</b>	1.5	0.5	0.10
<b>TURQUIA</b>	1.0	1.0	0.05
<b>CHILE</b>	1.5	1.5	0.05
<b>ARGENTINA</b>	1.5	1.0	0.1
<b>ESPAÑA</b>	1.0	0.0	0.0

Tabla 2.1 Factores de amplificación dinámica y de excentricidad accidental, de algunos códigos



Nivel	$F_{jx}$ (t)	$F_{jy}$ (t)
5	23.77	47.54
4	25.75	51.50
3	24.76	49.52
2	17.33	34.67
1	11.89	23.77

Tabla 4.1 Fuerzas laterales en el modelo de Bazán y Meli. (1998)

Nivel	$F_{jx}$ (t)	Cortante directo (t)			
		$V_{1x}$	$V_{2x}$	$V_{3x}$	$V_{4x}$
5	23.77	6.48	4.32	12.97	----
4	25.75	13.51	9.00	9.00	18.01
3	24.76	21.85	13.11	13.11	26.22
2	17.33	26.95	16.17	16.17	32.33
1	11.89	30.44	18.26	18.26	36.53

Tabla 4.2 Cortantes directos para la dirección X de análisis

Nivel	$F_{jy}$ (t)	Cortante directo (t)			
		$V_{1y}$	$V_{2y}$	$V_{3y}$	$V_{4y}$
5	47.54	26.45	1.43	19.66	----
4	51.50	51.93	2.88	2.88	41.35
3	49.52	80.58	3.78	3.78	60.43
2	34.67	99.38	4.66	4.66	74.53
1	23.77	112.27	5.26	5.26	84.20

Tabla 4.3 Cortantes directos para la dirección Y de análisis



Entrepiso	Dirección X		Dirección Y	
	Procedimiento Simplificado de Diseño (PSD) (m)	Bazán y Meli (m)	Procedimiento Simplificado de Diseño (PSD) (m)	Bazán y Meli (m)
5	4.727	4.73	5.778	5.78
4	6.00	6.00	8.932	8.93
3	5.824	5.82	8.644	8.64
2	5.824	5.82	8.644	8.64
1	5.824	5.82	8.644	8.64

Tabla 4.4 Ubicación de los centros de torsión en el edificio, en cada dirección de análisis

Nivel	Posición del CM (m)	Posición del CT (m)	$ e_s $ (m)
5	3.75	4.727	0.98
4	4.66	6.00	1.34
3	4.94	5.824	0.88
2	5.05	5.824	0.77
1	5.19	5.824	0.63

Tabla 4.5 Excentricidad estructural de cada entrepiso, para la dirección X de análisis

Nivel	Posición del CM (m)	Posición del CT (m)	$ e_s $ (m)
5	6.75	5.778	0.97
4	8.02	8.932	0.91
3	8.42	8.644	0.23
2	8.56	8.644	0.08
1	8.56	8.644	0.09

Tabla 4.6 Excentricidad estructural de cada entrepiso, para la dirección Y de análisis



Marco	$V_{dx}$ (t)	$y_i$ (m)	Elemento
1X	6.48	4.73	flexible
2X	4.32	1.23	flexible
3X	12.97	-2.77	rígido

Tabla 4.7 Ubicación y clasificación de los elementos estructurales, del entrespiso 5, dirección X.

Marco	$V_{dy}$ (t)	$x_i$ (m)	Elemento
1Y	26.45	5.78	rígido
2Y	1.43	-0.72	flexible
3Y	19.66	-7.72	flexible

Tabla 4.8 Ubicación y clasificación de los elementos estructurales, del entrespiso 5, dirección Y.

Marco	$V_{dx}$	$f_{T,r,fix}$	Cortante sísmico total (t)	
			PSD	Bazán y Meli
1X	6.48	0.074	6.96	6.97
2X	4.32	0.019	4.41	4.41
3X	12.97	0.00	12.97	12.90

Tabla 4.9 Factores de excentricidad accidental y cortantes sísmicos totales en los elementos resistentes. Dirección X, entrespiso 5.



Marco	$V_{dy}$	$f_{T r,dy}$	Cortante sísmico total (t)	
			PSD	Bazán y Meli
1Y	26.45	0.047	27.69	27.09
2Y	1.43	0.043	1.49	1.46
3Y	19.66	0.464	28.78	28.19

Tabla 4.10 Factores de excentricidad accidental y cortantes sísmicos totales en los elementos resistentes. Dirección Y, entreciso 5.

Entreciso	Marco	Cortante sísmico total (t)	
		PSD	Bazán y Meli
5	1X	6.96	6.97
	2X	4.41	4.41
	3X	12.97	12.90
4	1X	14.05	14.07
	2X	9.16	9.17
	3X	9.00	9.01
	4X	18.01	17.98
3	1X	22.74	22.73
	2X	13.32	13.29
	3X	13.12	13.09
	4X	26.30	26.31
2	1X	27.97	
	2X	16.41	
	3X	16.19	
	4X	32.49	
1	1X	31.49	
	2X	18.52	
	3X	18.31	
	4X	36.78	

Tabla 4.11 Cortantes sísmicos totales en los elementos resistentes. Dirección X





Entrepiso	Marco	Cortante sísmico total (t)	
		PSD	Bazán y Meli
5	1Y	27.69	27.09
	2Y	1.49	1.46
	3Y	28.78	28.19
4	1Y	67.82	67.80
	2Y	3.13	3.11
	3Y	3.03	3.02
	4Y	46.44	46.38
3	1Y	96.94	96.80
	2Y	3.97	3.90
	3Y	4.10	4.04
	4Y	72.63	72.72
2	1Y	117.64	
	2Y	4.87	
	3Y	5.09	
	4Y	90.83	
1	1Y	133.01	
	2Y	5.50	
	3Y	5.75	
	4Y	102.55	

Tabla 4.12 Cortantes sísmicos totales en los elementos resistentes. Dirección Y.



Dirección X

Q = 4

Nivel	$W_i$	$h_i$	$W_i h_i$	$F_{ix}$	$V_{cx}$	$y_c$	$F_{ix} y_c$	$\Sigma F_{ix} y_c$	$Y_{CM}$	$b_x$
	(t)	(m)		(t)	(t)	(m)			(m)	(m)
5	90	16	1440	23.77	23.77	3.75	89.14	89.14	3.75	7.50
4	120	13	1560	25.75	49.52	5.5	141.63	230.77	4.66	11.00
3	150	10	1500	24.76	74.28	5.5	136.18	366.95	4.94	11.00
2	150	7	1050	17.33	91.61	5.5	95.33	462.28	5.05	11.00
1	180	4	720	11.89	103.50	6.3	74.88	537.16	5.19	11.00
Suma	690		6270							

Dirección Y

Q = 2

Nivel	$W_i$	$h_i$	$W_i h_i$	$F_{iy}$	$V_{cy}$	$x_c$	$F_{iy} x_c$	$\Sigma F_{iy} x_c$	$X_{CM}$	$b_y$
	(t)	(m)		(t)	(t)	(m)			(m)	(m)
5	90	16	1440	47.54	47.54	6.75	320.90	320.90	6.75	13.50
4	120	13	1560	51.50	99.04	9.2	473.82	794.72	8.02	20.00
3	150	10	1500	49.52	148.56	9.2	455.60	1250.32	8.42	20.00
2	150	7	1050	34.67	183.23	9.2	318.92	1569.24	8.56	20.00
1	180	4	720	23.77	207.00	8.5	202.05	1771.29	8.56	20.00
Suma	690		6270							

$F_{ix} = c/Q * (W_i h_i / \Sigma(W_i * h_i)) * \Sigma W_i$   
 $Y_{CM} = X_{CM} = \Sigma (F_{ix} * y_c) / V_{cx}$

Fuerza horizontal de cada entrepiso, aplicada en el centro de masas del nivel j  
 Ubicación del Centro de Masas de cada entrepiso

Tabla 4.13 Fuerzas cortantes y posición del CM de cada entrepiso

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Dirección X

Eje	$k_{lx}$ (t/m)	$V_{dlx}$ (t)	$d_{ly}$ (m)	$V_{dlx} d_{ly}$	$y_i$ (m)	$k_{lx} y_i^2$	$\Delta_{lx}$	Elemento	$F_{T,d,lx}$	$V_{lx}$ (t)
1X	1200	6.48	0	0.00	4.73	26816.53	0.6303	flexible	0.074	6.96
2X	800	4.32	3.5	15.13	1.23	1204.96	0.1636	flexible	0.019	4.41
3X	2400	12.97	7.5	97.24	-2.77	18451.24	0.3697	rigido	0.000	12.97
Suma	4400	23.77		112.37		46472.73				

Dirección Y

Eje	$k_{ly}$ (t/m)	$V_{dly}$ (t)	$d_{lx}$ (m)	$V_{dly} d_{lx}$	$x_i$ (m)	$k_{ly} x_i^2$	$\Delta_{ly}$	Elemento	$F_{T,d,ly}$	$V_{ly}$ (t)
1Y	7400	26.45	0	0.0	5.78	247067.82	0.4280	rigido	0.047	27.69
2Y	400	1.43	6.5	9.3	-0.72	208.40	0.0535	flexible	0.043	1.49
3Y	5500	19.66	13.5	265.4	-7.72	327944.46	0.5720	flexible	0.464	28.78
Suma	13300	47.54		274.7		575220.68				

Sentido	$V_{c,x,y}$ (t)	$\lambda_{x,y}$	$b_{y,x}$ (m)	$\rho_{x,y}$	CM (m)	CT (m)	$e_{y,x}$
X	23.77	0.07	7.5	1.58	3.75	4.73	0.130
Y	47.54	0.93	13.5	0.51	6.75	5.78	0.072

$K_0 =$	621693.40	(t/m)
---------	-----------	-------

Tabla 4.14 Cortantes sísmicos por torsión. Entrepiso 5

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Dirección X

Eje	$k_{ix}$ (t/m)	$V_{dix}$ (t)	$d_{iy}$ (m)	$V_{dix} d_{iy}$	$y_i$ (m)	$k_{ix} y_i^2$	$\Delta_{ix}$	Elemento	$f_{T/dix}$	$V_{ix}$ (t)
1X	1200	13.51	0.0	0.0	6.00	43200.00	0.5455	flexible	0.0406	14.05
2X	800	9.00	3.5	31.5	2.50	5000.00	0.2273	flexible	0.0169	9.16
3X	800	9.00	7.5	67.5	-1.50	1800.00	0.1364	rigido	0.0000	9.00
4X	1600	18.01	11.0	198.1	-5.00	40000.00	0.4545	rigido	0.0000	18.01
<b>Suma</b>	<b>4400</b>	<b>49.52</b>		<b>297.1</b>		<b>90000.00</b>				

Dirección Y

Eje	$k_{iy}$ (t/m)	$V_{diy}$ (t)	$d_{ix}$ (m)	$V_{diy} d_{ix}$	$x_i$ (m)	$k_{iy} x_i^2$	$\Delta_{iy}$	Elemento	$f_{T/diy}$	$V_{iy}$ (t)
1Y	10800	51.93	0.0	0.0	8.93	861638.23	0.4466	flexible	0.3061	67.82
2Y	600	2.88	6.5	18.8	2.43	3548.89	0.1216	flexible	0.0833	3.13
3Y	600	2.88	13.5	38.9	-4.57	12519.76	0.2284	rigido	0.0508	3.03
4Y	8600	41.35	20.0	827.0	-11.07	1053497.97	0.5534	rigido	0.1232	46.44
<b>Suma</b>	<b>20600</b>	<b>99.04</b>		<b>884.7</b>		<b>1931204.85</b>				

Sentido	$V_{c_{xy}}$ (t)	$\lambda_{xy}$	$b_{y,x}$ (m)	$\rho_{xy}$	CM (m)	CT (m)	$e_{y,x}$
X	49.52	0.04	11	1.95	4.66	6.00	0.122
Y	99.04	0.96	20	0.50	8.02	8.93	0.045

$K_0 =$	2021204.85	(t/m)
---------	------------	-------

Tabla 4.15 Cortantes sísmicos por torsión. Entrepiso 4



Dirección X

Eje	$k_{ix}$ (U/m)	$V_{dix}$ (t)	$d_{iy}$ (m)	$V_{dix} d_{iy}$	$y_i$ (m)	$k_{ix} y_i^2$	$\Delta_{ix}$	Elemento	$f_{T,ix}$	$V_{ix}$ (t)
1X	2000	21.85	0.0	0.0	5.82	67826.99	0.5294	flexible	0.0408	22.74
2X	1200	13.11	3.5	45.9	2.42	6478.55	0.2112	flexible	0.0163	13.32
3X	1200	13.11	7.5	98.3	-1.68	3372.66	0.1524	rigido	0.0010	13.12
4X	2400	26.22	11.0	288.4	-5.18	64310.03	0.4706	rigido	0.0032	26.30
<b>Suma</b>	<b>6800</b>	<b>74.28</b>		<b>432.6</b>		<b>141988.24</b>				

Dirección Y

Eje	$k_{iy}$ (U/m)	$V_{diy}$ (t)	$d_{ix}$ (m)	$V_{diy} d_{ix}$	$x_i$ (m)	$k_{iy} x_i^2$	$\Delta_{iy}$	Elemento	$f_{T,iy}$	$V_{iy}$ (t)
1Y	12800	80.58	0.0	0.0	8.64	956414.82	0.4322	flexible	0.2030	96.94
2Y	600	3.78	6.5	24.6	2.14	2758.22	0.1072	flexible	0.0504	3.97
3Y	600	3.78	13.5	51.0	-4.86	14148.05	0.2428	rigido	0.0863	4.10
4Y	9600	60.43	20.0	1208.7	-11.36	1237989.08	0.5678	rigido	0.2018	72.63
<b>Suma</b>	<b>23600</b>	<b>148.56</b>		<b>1284.2</b>		<b>2211310.17</b>				

Sentido	$V_{c_{xy}}$ (t)	$\lambda_{xy}$	$b_{y,x}$ (m)	$\rho_{xy}$	CM (m)	CT (m)	$c_{y,x}$
X	74.28	0.06	11	1.69	4.94	5.82	0.080
Y	148.56	0.94	20	0.50	8.42	8.64	0.011

$$K_0 = 2353298.40 \quad (t/m)$$

Tabla 4.16 Cortantes sísmicos por torsión. Entrepiso 3

TESIS CON  
FALTA DE PAGEN



Dirección X

Eje	$k_{ix}$ (t/m)	$V_{dix}$ (t)	$d_{iy}$ (m)	$V_{dix} d_{iy}$	$y_i$ (m)	$k_{ix} y_i^2$	$\Delta_{ix}$	Elemento	$f_{T,dix}$	$V_{ix}$ (t)
1X	2000	26.95	0.0	0.0	5.82	67826.99	0.5294	flexible	0.0381	27.97
2X	1200	16.17	3.5	56.6	2.32	6478.55	0.2112	flexible	0.0152	16.41
3X	1200	16.17	7.5	121.3	-1.68	3372.66	0.1524	rigido	0.0016	16.19
4X	2400	32.33	11.0	355.7	-5.18	64310.03	0.4706	rigido	0.0048	32.49
<b>Suma</b>	<b>6800</b>	<b>91.61</b>		<b>533.5</b>		<b>141988.24</b>				

Dirección Y

Eje	$k_{iy}$ (t/m)	$V_{diy}$ (t)	$d_{ix}$ (m)	$V_{diy} d_{ix}$	$x_i$ (m)	$k_{iy} x_i^2$	$\Delta_{iy}$	Elemento	$f_{T,diy}$	$V_{iy}$ (t)
1Y	12800	99.38	0.0	0.0	8.64	956414.82	0.4322	flexible	0.1837	117.64
2Y	600	4.66	6.5	30.3	2.14	2758.22	0.1072	flexible	0.0456	4.87
3Y	600	4.66	13.5	62.9	-4.86	14148.05	0.2428	rigido	0.0935	5.09
4Y	9600	74.53	20.0	1490.7	-11.36	1237989.08	0.5678	rigido	0.2187	90.83
<b>Suma</b>	<b>23600</b>	<b>183.23</b>		<b>1583.8</b>		<b>2211310.17</b>				

Sentido	$V_{e_{x,y}}$ (t)	$\lambda_{x,y}$	$b_{y,x}$ (m)	$r_{x,y}$	CM (m)	CT (m)	$e_{y,x}$
X	91.61	0.06	11	1.69	5.05	5.82	0.071
Y	183.23	0.94	20	0.50	8.56	8.64	0.004

$K_t =$	2353298.40	(t m)
---------	------------	-------

Tabla 4.17 Cortantes sísmicos por torsión. Entrepiso 2



Dirección X

Eje	$k_{ix}$ (t/m)	$V_{dix}$ (t)	$d_{ix}$ (m)	$V_{dix} d_{ix}$	$y_i$ (m)	$k_{ix} y_i^2$	$\Delta_{ix}$	Elemento	$f_{T r j i x}$	$V_{ix}$ (t)
1X	2000	30.44	0.0	0.0	5.82	67826.99	0.5294	flexible	0.0345	31.49
2X	1200	18.26	3.5	63.9	2.32	6478.55	0.2112	flexible	0.0138	18.52
3X	1200	18.26	7.5	137.0	-1.68	3372.66	0.1524	rigido	0.0023	18.31
4X	2400	36.53	11.0	401.8	-5.18	64310.03	0.4706	rigido	0.0070	36.78
Suma	6800	103.50		602.7		141988.24				

Dirección Y

Eje	$k_{iy}$ (t/m)	$V_{diy}$ (t)	$d_{iy}$ (m)	$V_{diy} d_{iy}$	$x_i$ (m)	$k_{iy} x_i^2$	$\Delta_{iy}$	Elemento	$f_{T r j i y}$	$V_{iy}$ (t)
1Y	12800	112.27	0.0	0.0	8.64	956414.82	0.4322	flexible	0.1847	133.01
2Y	600	5.26	6.5	34.2	2.14	2758.22	0.1072	flexible	0.0458	5.50
3Y	600	5.26	13.5	71.0	-4.86	14148.05	0.2428	rigido	0.0932	5.75
4Y	9600	84.20	20.0	1684.1	-11.36	1237989.08	0.5678	rigido	0.2178	102.55
Suma	23600	207.00		1789.3		2211310.17				

Sentido	$V_{c_{xy}}$ (t)	$\lambda_{xy}$	$b_{y,x}$ (m)	$\rho_{xy}$	CM (m)	CT (m)	$e_{y,x}$
X	103.50	0.06	11	1.69	5.19	5.82	0.058
Y	207.00	0.94	20	0.50	8.56	8.64	0.004

$K_0 =$	2353298.40	(t/m)
---------	------------	-------

Tabla 4.18 Cortantes sísmicos por torsión. Entrepiso 1

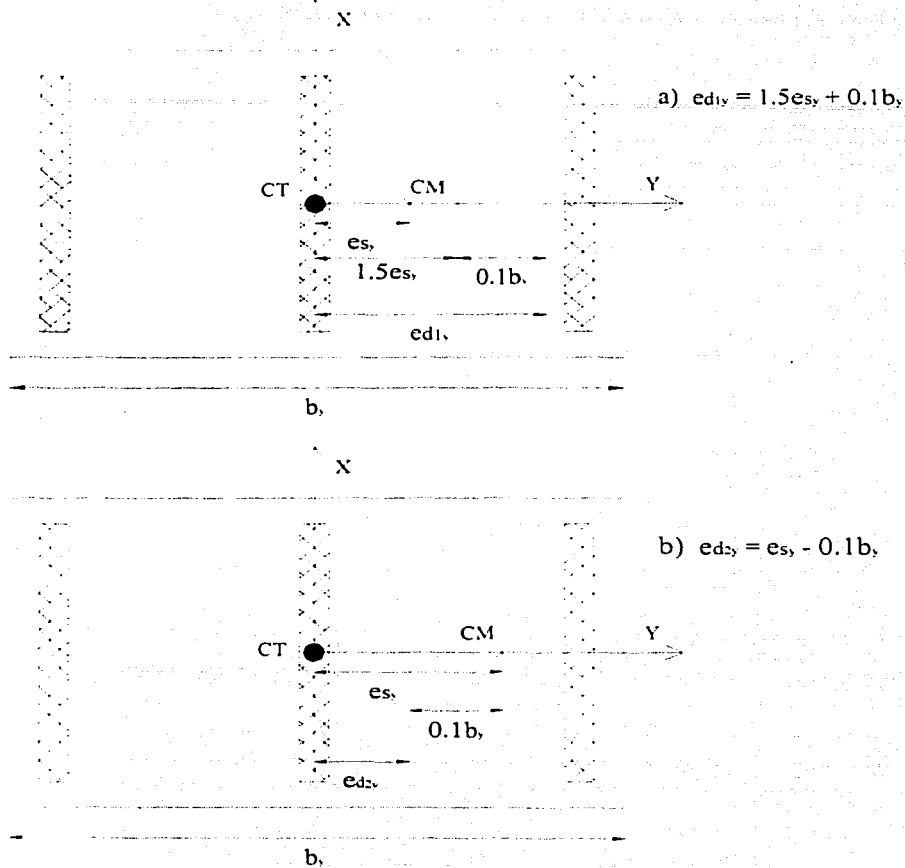


Figura 2.1 Excentricidad de diseño especificada en el RCDF



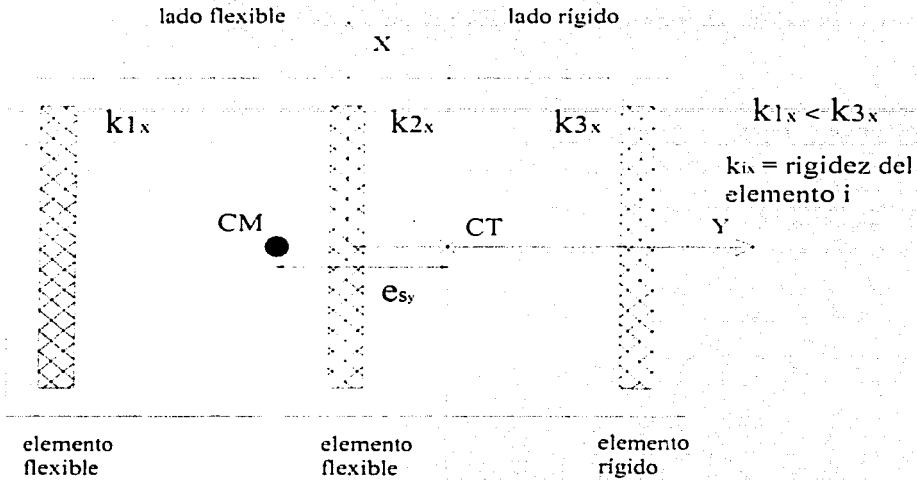


Figura 2.2 Denominación de los elementos estructurales

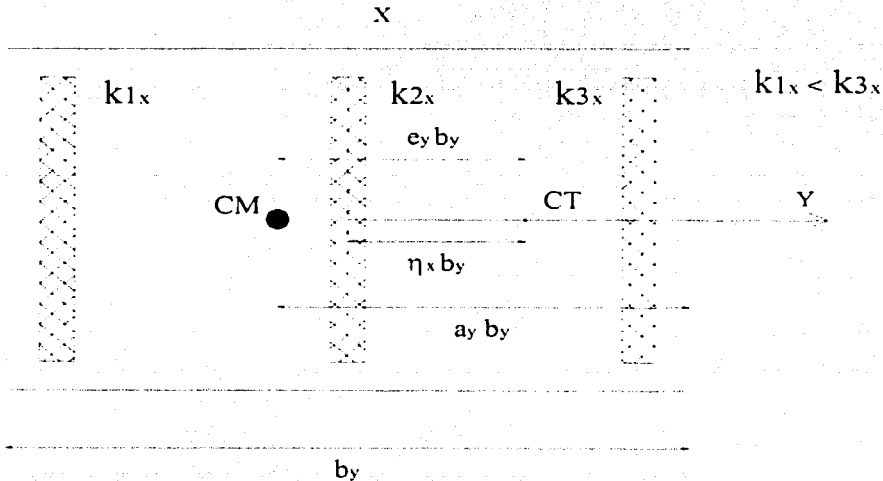


Figura 2.3 Parámetros de las ecuaciones 2.14 a 2.17 para la dirección X de análisis



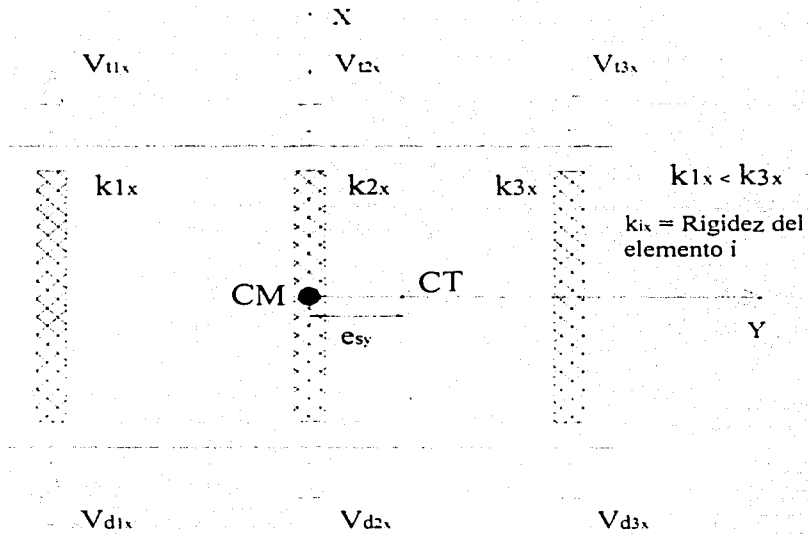


Figura 3.1 Distribución del cortante directo y del cortante por torsión entre los elementos resistentes

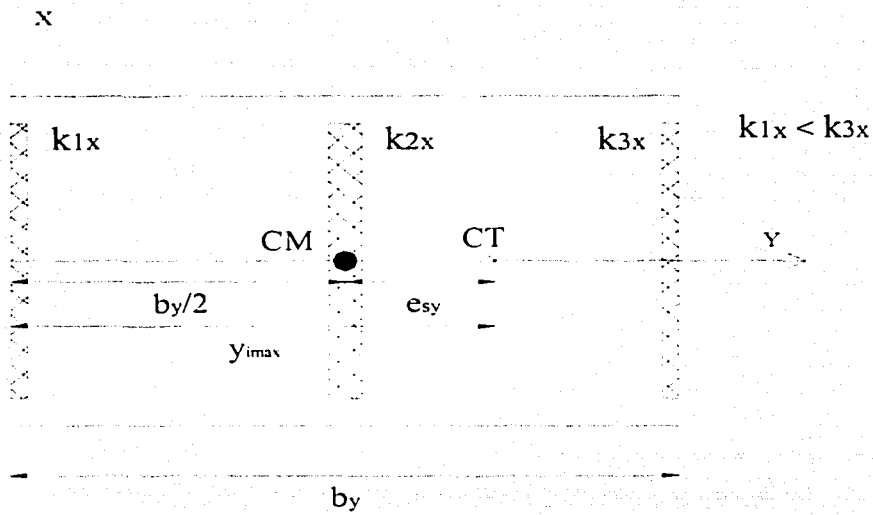


Fig 3.2 Distancia máxima al CT, de los elementos estructurales

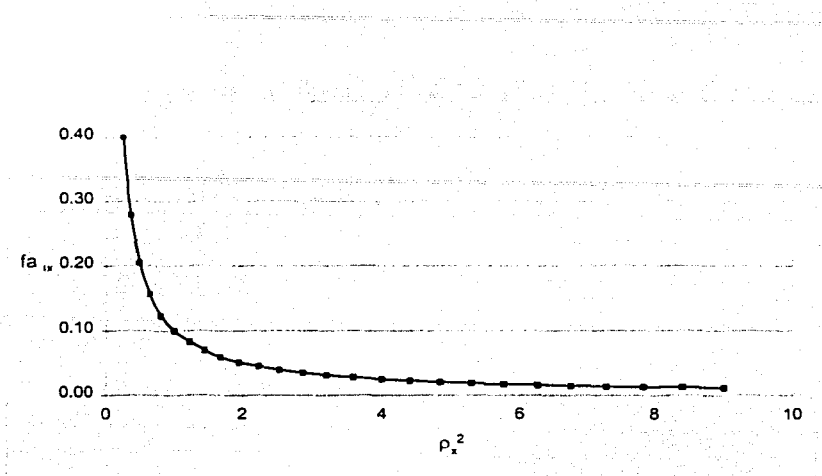


Figura 3.3 Efecto de la excentricidad accidental en el diseño por torsión sísmica estática, para los distintos valores de  $\rho_e^2$ , en estructuras con el CT ubicado en uno de sus extremos

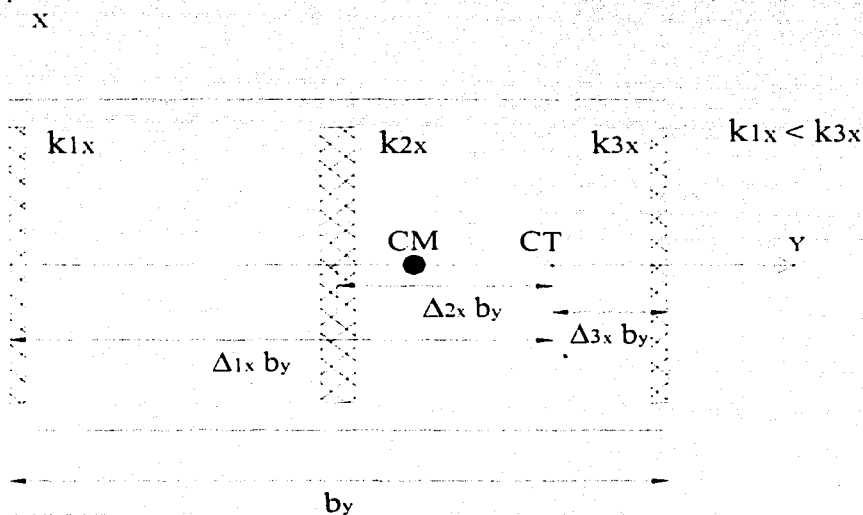


Fig 3.4 Distancia al CT, de los elementos estructurales

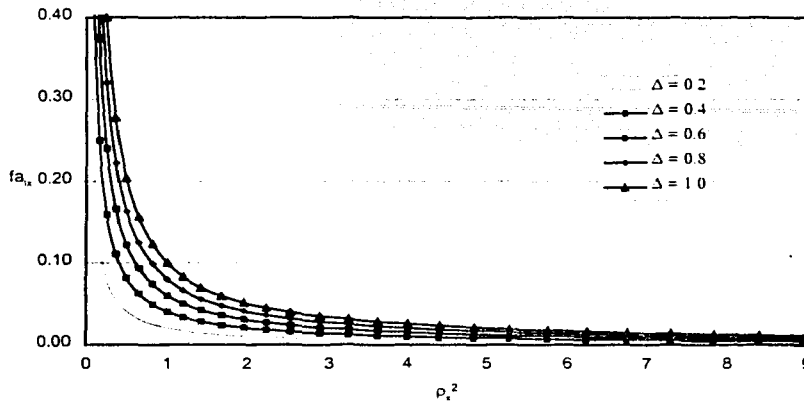


Figura 3.5 Efecto de la excentricidad en el diseño por torsión sísmica estática, para distintos valores de  $\rho_x^2$  y  $\Delta_{ix}$

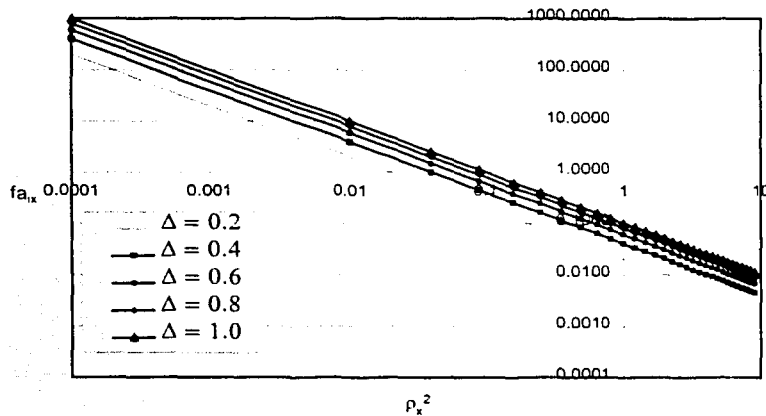
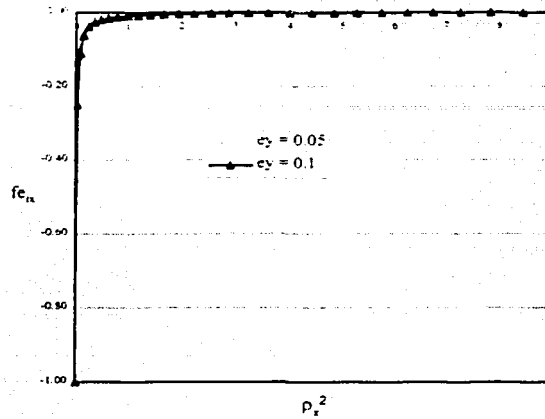
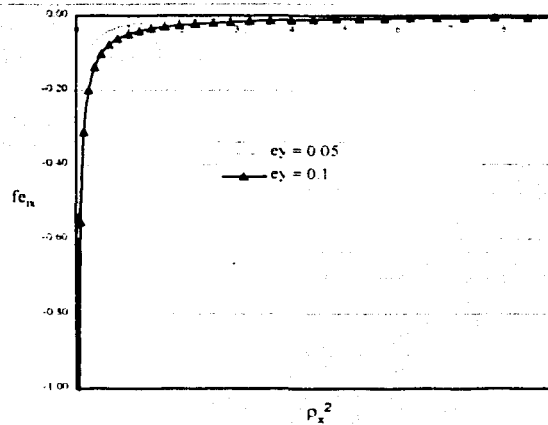


Figura 3.6 Efecto de la excentricidad accidental en el diseño por torsión sísmica estática, para distintos valores de  $\rho_x^2$  y  $\Delta_{ix}$ , en escala logarítmica



a)  $\Delta_{1x} = 0.1$



b)  $\Delta_{1x} = 0.5$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 3.7 Efecto del incremento de la excentricidad estructural por los factores dinámicos, en el diseño por torsión sísmica estática, para elementos rígidos

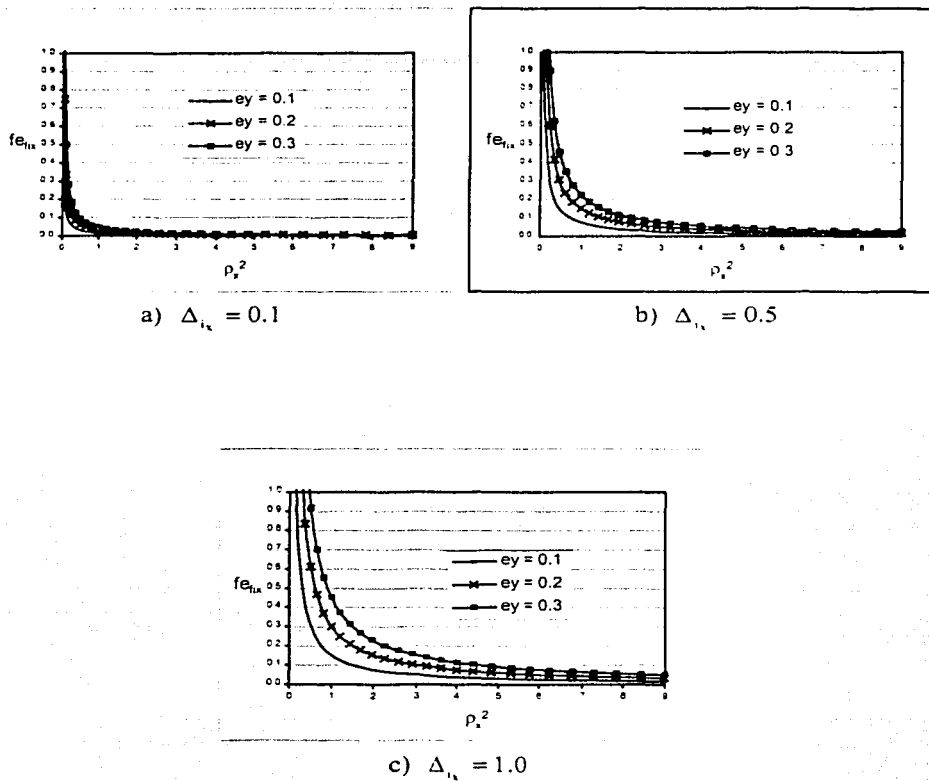
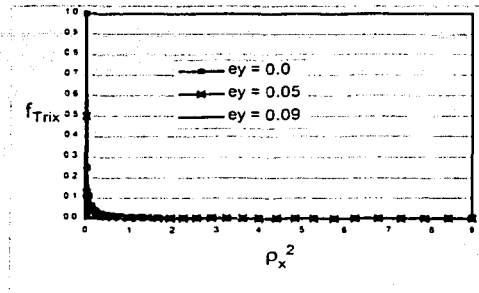
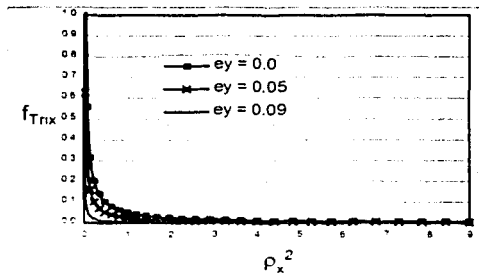


Figura 3.8 Efecto debido al incremento de la excentricidad estructural por los factores dinámicos, en el diseño por torsión sísmica estática, para elementos flexibles

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



a)  $\Delta_{ix} = 0.1$

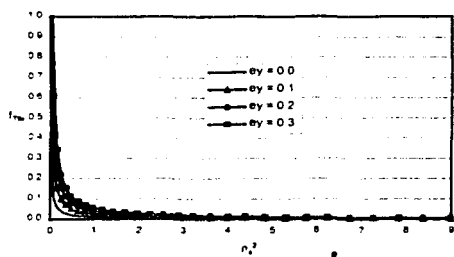


b)  $\Delta_{ix} = 0.5$

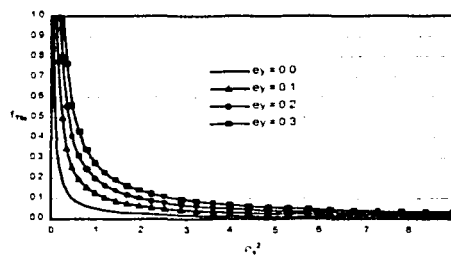
Figura 3.9 Efecto de la torsión sísmica en el diseño por torsión sísmica estática, en elementos rígidos

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

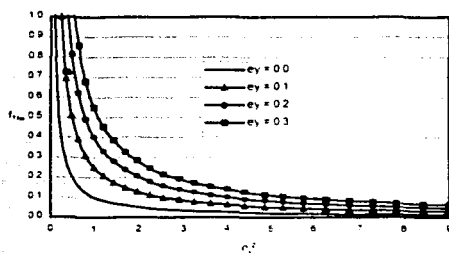




a)  $\Delta_{ix} = 0.1$



b)  $\Delta_{ix} = 0.5$



c)  $\Delta_{ix} = 1.0$

Figura 3.10 Efecto de la torsión sísmica en el diseño por torsión sísmica estática, en elementos flexibles

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

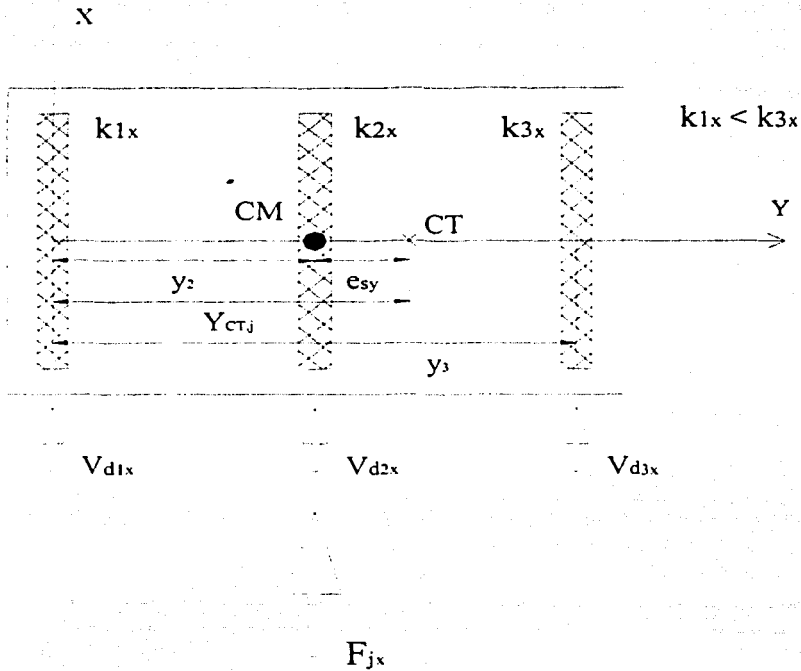


Figura 3.11 Posición del centro de torsión y de los elementos estructurales, respecto al eje X

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

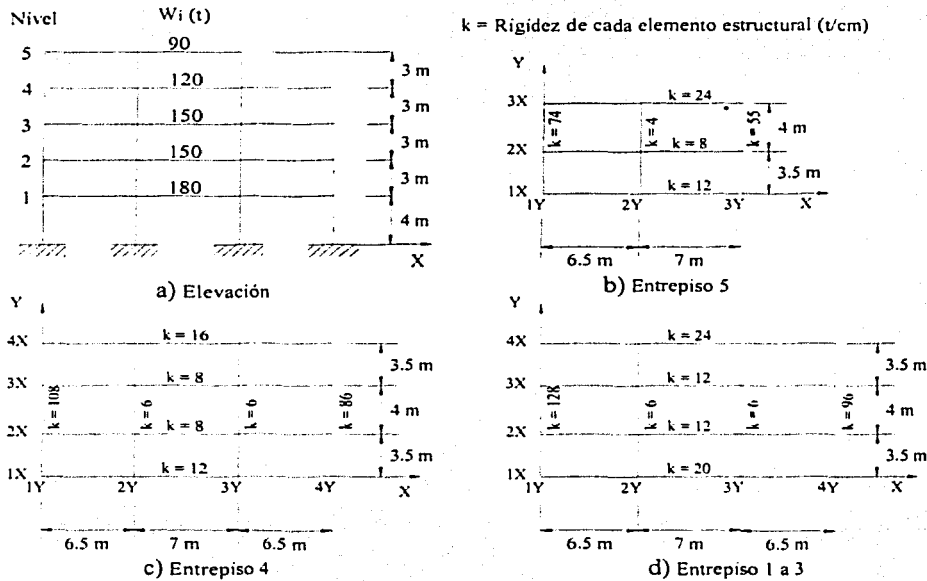


Figura 4.1 Modelo estructural (Bazán y Meli, 1998)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN