

# Estudio analítico de los efectos de la torsión natural en el comportamiento de edificios de varios pisos torsionalmente desbalanceados ante solicitaciones sísmicas

Analytic study of the effects of natural torsion in the behavior of various floors buildings torsionally unbalanced in front of seismic requirements

## ÓSCAR JAVIER GÓMEZ RUEDA

Ingeniero Civil Universidad Industrial de Santander. Docente catedrático en la misma Universidad.

oscargomez@universia.net.co

## ESPERANZA MALDONADO RONDÓN

Ingeniera Civil y Especialista en Docencia Universitaria Universidad Industrial de Santander, Magíster en Ingeniería Civil Universidad de los Andes, Ph. D. especialidad en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos Universidad Politécnica de Catalunya. Docente Universidad Industrial de Santander.

emaldona@uis.edu.co

Fecha de recepción: septiembre 30 de 2004

Clasificación del artículo: Investigación  
Fecha de aceptación: diciembre 20 de 2004

**Palabras clave:** Torsión, edificios asimétricos, torsión natural, excentricidad de diseño.

**Key words:** Torsion, asymmetric buildings, natural torsion, design eccentricity.

## RESUMEN

Las recomendaciones de diseño para edificios de varios pisos torsionalmente desbalanceados presentan diferentes códigos de diseño de edificaciones de países como Canadá, Estados Unidos, México y Australia, entre otros; estas y las propuestas por diferentes investigadores son analizadas en este documento, junto con las recomendaciones que presentan las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98.

El estudio se realiza mediante un análisis inelástico comparativo de las demandas de ductilidad normalizadas en los planos resistentes de un edificio cuyos centros de rigidez de piso no coinciden con

los centros de cortante, con respecto a las demandas de ductilidad que presentan estos mismos planos en una estructura torsionalmente balanceada. El trabajo incluye tres modelos de edificios de cinco pisos, sometidos al registro acelerográfico de "El Centro" en las dos direcciones principales; además, siete procedimientos de diseño que reflejan las recomendaciones de los diferentes códigos de construcción y las desarrolladas en recientes investigaciones; se consideran, igualmente, dos coeficientes de reducción de resistencia que involucran una evaluación en diferentes niveles de la respuesta inelástica.

**ABSTRACT**

The design recommendations for torsionally unbalanced various floors buildings present different design codes for edifications in countries like Canada, USA, Mexico and Australia, among others; these and the proposals by different researchers are analyzed in this document along with the recommendations presented by the Colombian Regulations for Design and Seismic Resistant Constructions NSR-98.

The study is made through a comparative inelastic analysis of the ductility demands normalized in the resistant plans of a building

whose floor rigidity centers do not coincide with the centers of the cutting with respect to the ductility demands presented by those plans in a torsionally balanced structure. The paper includes three models of five floors buildings subject to the acelerographic registration of the center in the two main directions as well as seven design procedures that reflect the recommendations of the different construction codes and those developed in recent researches; two resistance reduction coefficients that involve an evaluation in different levels of inelastic response are considered.

**1. Introducción**

Las respuestas torsionales elásticas e inelásticas de edificios han sido estudiadas en diversas investigaciones; no obstante, sus conclusiones no siempre son consistentes unas con otras, lo que puede atribuirse a la complejidad del comportamiento torsional y al gran número de parámetros que lo gobiernan. A menudo, los resultados obtenidos por los investigadores son aplicables solo en el modelo estudiado, con los valores específicos de parámetros usados y las suposiciones particulares hechas en cada estudio.

Consecuencia de la inconsistencia de resultados es la diferencia entre las recomendaciones propuestas para el diseño contra torsión de los diversos códigos que tratan este tema. A pesar de que las provisiones de torsión contenidas en ellos han experimentado varias revisiones, sería un error suponer que son enteramente racionales, o que tratan las consideraciones más importantes del diseño contra la torsión.

**2. Problemática de la torsión**

El movimiento torsional causa fuerzas y desplazamientos adicionales en algunos elementos de resistencia lateral, en comparación con los

elementos correspondientes de un sistema sin este desequilibrio.

Los códigos de diseño de edificios requieren que los efectos de torsión sean considerados aplicando fuerzas estáticas equivalentes a una distancia  $e_d$  del CR (centro de rigidez), dando como resultado momentos torsionales de piso, además de las fuerzas cortantes. Las fuerzas en los elementos de resistencia lateral son calculadas con un análisis estático y la aplicación simultánea de cortantes de piso y de momentos torsionales de piso.

La excentricidad  $e_d$  de diseño especificada en la mayoría de los códigos es de la forma:

$$\begin{aligned} \text{ó} \quad e_d &= \alpha \cdot e + \beta b & (1) \\ e_d &= \delta \cdot e - \beta b & (2) \end{aligned}$$

En las anteriores ecuaciones, “ $e$ ” es la excentricidad estática de rigidez, es decir, la distancia entre el  $CM^l$  (centro de masa) y el CR;  $b$  es la mayor

---

<sup>1</sup> El centro de masa es el punto geométrico de cada piso en el cual se supone concentrada la masa total del nivel; allí actúa la fuerza inercial inducida por un movimiento en la base del edificio.

dimensión en planta del edificio perpendicular a la dirección del movimiento del terreno analizado; y  $\alpha$ ,  $\delta$ , y  $\beta$  son coeficientes especificados. Para cada elemento estructural debe ser utilizado el valor de  $e_d$  que produce la mayor fuerza de diseño.

Los primeros términos,  $\alpha e$  y  $\delta e$ , intentan explicar la respuesta torsional del edificio que surge cuando este presenta una planta asimétrica.

El segundo término,  $+/-\beta b$ , pretende tener en cuenta la excentricidad accidental<sup>2</sup>, y se introduce para explicar el movimiento torsional debido a posibles errores en la evaluación de la distribución de la masa y de la rigidez. Otro factor es la torsión de la estructura causada por el movimiento rotacional del terreno sobre el eje vertical.

Conceptualmente, la torsión accidental en un edificio puede entenderse como resultado de la variabilidad imprevista (o la incertidumbre) en las características estructurales del edificio, y en la forma y distribución de las cargas o deformaciones impuestas.

### 3. Torsión natural o estructural

Las fuerzas que excitan la respuesta de una estructura durante un sismo se relacionan con su inercia y actúan a través de los centros de masa en cada piso. Las fuerzas de inercia son contrarrestadas por fuerzas resistentes del sistema, cuya resultante pasa por el centro de rigidez. Cuando los centros de rigidez no coinciden con los centros de masa, las fuerzas sísmicas causan el movimiento torsional en la estructura. Las estructuras con centros de masa y de rigidez no coincidentes se denominan asimétricas; su movimiento torsional durante un terremoto es definido como torsión natural o estructural.

#### 3.1 Torsión natural en sistemas elásticos de un solo piso

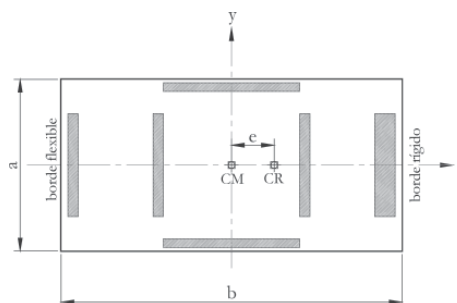
La figura 1 muestra el modelo de edificio asimétrico de un piso estudiado en diversas investigaciones. Su placa se asume infinitamente rígida en su propio

plano; la masa total de la estructura está concentrada en el nivel de piso, y el origen de los ejes de coordenadas se establece en el centro de masa. Las fuerzas opuestas al movimiento son proporcionadas por los elementos de resistencia orientados a lo largo de dos ejes ortogonales. El plano de resistencia puede constar de columnas, muros de cortante, pórticos apoyados o una combinación de ellos. El plano  $i$ , paralelo al eje  $X$ , tiene una rigidez  $K_{ix}$ , mientras que el plano en la dirección  $Y$  tiene una rigidez  $K_{iy}$ . La distribución de rigideces es simétrica sobre el eje  $X$ , pero es asimétrica sobre el eje  $Y$ . Así, el centro de rigidez se encuentra en el eje  $X$  a una distancia “ $e$ ” del centro de masa, la cual está dada por:

$$e = \frac{\sum_{i=1}^N k_{yi} x_i}{\sum_{i=1}^N k_{yi}} \quad (3)$$

En (3),  $N$  es el número de planos resistentes en la dirección  $Y$ . Se asume que el movimiento sísmico está dirigido a lo largo de esta dirección.

Figura 1. Planta de edificio asimétrico



#### 3.2 Ecuaciones de movimiento

Para un movimiento sísmico en la base paralelo a la dirección  $Y$ , las ecuaciones de movimiento están dadas por:

<sup>2</sup> Algunos autores opinan que una manera más racional de interpretar  $+/-\beta b$  es tratarla como una expresión empírica que refleja el efecto combinado de la torsión natural y la accidental. En: J. L. Humar and P. Kumar (1999).

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_y \\ r\ddot{u}_\theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_y & \frac{e}{r}K_y \\ \frac{e}{r}K_y & \frac{K_\theta}{r^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_y \\ ru_\theta \end{bmatrix} = -m \begin{bmatrix} \ddot{u}_{gy} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

En (4),  $m$  es la masa del piso,  $r$  es el radio de giro alrededor del centro de masa,  $u_y$  es el desplazamiento de piso en la dirección  $Y$ ,  $u_\theta$  es la rotación del piso alrededor del eje vertical a través del centro de masa,  $K_y$  es la rigidez total en la dirección  $Y$ ,  $K_\theta$  es la rigidez torsional sobre el centro de masa, y  $\ddot{u}_{gy}$  es la aceleración del terreno en la dirección  $Y$ .

La rigidez torsional sobre el centro de rigidez  $K_{\theta R}$  está dada por:

$$K_{\theta R} = \sum_{i=1}^M k_{xi} y_i^2 + \sum_{j=1}^N k_{yj} (x_j - e)^2 \quad (5)$$

En (5),  $x_i$  y  $y_i$  son las distancias de los planos resistentes medidas desde el  $CM$ ;  $M$  es el número de planos resistentes perpendiculares a la dirección de la excitación, es decir, en la dirección  $X$ , y  $N$  el número de planos resistentes en la dirección  $Y$ . Las rigideces torsionales  $K_\theta$  y  $K_{\theta R}$  están relacionadas según la ecuación:

$$K_{\theta R} = K_\theta - K_y \cdot e^2 \quad (6)$$

Tomando las definiciones de frecuencia traslacional desacoplada  $\omega_y$  y de frecuencia rotacional desacoplada  $\omega_\theta$ :

$$\omega_y = \sqrt{\frac{K_y}{m}} \quad (7)$$

$$\omega_\theta = \sqrt{\frac{K_{\theta R}}{m \cdot r^2}} \quad (8)$$

Realizando los cambios correspondientes, resulta la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} \ddot{u}_y \\ r\ddot{u}_\theta \end{bmatrix} + \omega_y^2 \begin{bmatrix} 1 & \frac{e}{r} \\ \frac{e}{r} & \Omega_R^2 + \left(\frac{e}{r}\right)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_y \\ ru_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{u}_{gy} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

En (9),  $\Omega_R$  se expresa como  $\omega_\theta/\omega_y$  y es el cociente entre las frecuencias rotacional y traslacional. De la ecuación anterior es evidente que, para un movimiento del terreno dado, la respuesta del edificio de la figura 1 está gobernada por  $\omega_y$ ,  $\Omega_R$  y  $e/r$ .

El parámetro  $\Omega_R$  es estudiado en profundidad por Humar y Kumar (1999). En general, un valor bajo de  $\Omega_R$  puede conducir a un gran aumento en los desplazamientos de los bordes flexible y rígido, y puede causar peligro en los elementos resistentes situados en ellos.

#### 4. Definición de modelos

Los modelos que se utilizan corresponden a edificios de cinco pisos, conformados estructuralmente por cuatro planos resistentes en la dirección  $Y$ , y tres planos resistentes en la dirección  $X$ . Estos planos resistentes representan pórticos planos, los cuales asumen la responsabilidad estructural y de resistencia a cargas laterales. Los elementos verticales corresponden básicamente a columnas de diferentes dimensiones, según la distribución de rigidez en planta del modelo. Los niveles de entrepiso y la cubierta están conformados por placas aligeradas de 0,30 m de espesor; la altura de piso es de 3,0 m para todos los niveles; la planta cuenta con 15,0 m en la dirección  $X$ , y 12,0 m en la dirección  $Y$ . Los entrepisos se consideran infinitamente rígidos en su plano.

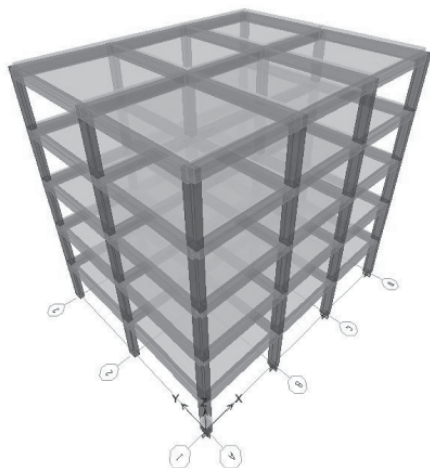
##### • Modelo 1

Corresponde al modelo torsionalmente balanceado; todas sus columnas y vigas tienen dimensiones de 0,30\*0,50 m y el lado con mayor inercia de las columnas se orienta en la dirección  $Y$  (figura 2). En todos los niveles, los centros de masa se encuentran en el centro geométrico de cada planta.

##### • Modelo 2

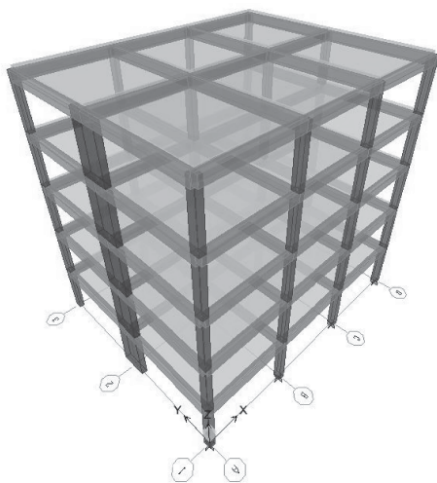
Corresponde a un modelo torsionalmente desbalanceado, debido a que la columna A2 se reemplaza por una pantalla de 0,30 m de espesor y 1,50 m de longitud (figura 3). Esto hace que el centro

Figura 2. Vista isométrica, Modelo 1



de rigidez se desplace hacia la izquierda, más cerca del eje *A*. El incremento de la rigidez total del edificio en el sentido *Y* se compensa con una disminución en la sección de las columnas que pasan a 0,30\*0,40 m. Como en el primer modelo, en todos los niveles los centros de masa se encuentran en el centro geométrico de cada planta.

Figura 3. Vista isométrica, Modelo 2



• Modelo 3

Se trata de un edificio excéntrico en masa. Tiene las mismas características del primer modelo, con la diferencia que, para todos los niveles, el centro de masa se encuentra desplazado una distancia de 2,5 m (0,1667 *b*) hacia la derecha.

**Evaluación de masas y rigideces**

En los tres modelos, las cantidades de masa por piso son iguales y se calculan con base en las características reales de edificios típicos; sus valores se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Masa de los modelos por niveles

Nivel	Masa traslacional	Masa rotacional	% Masa total traslacional
Quito	124,6 mg	3.832,6 mg.m	14,31%
Cuarto	186,6 mg	5.738,9 mg.m	21,42%
Tercero	186,6 mg	5.738,9 mg.m	21,42%
Segundo	186,6 mg	5.738,9 mg.m	21,42%
Primero	186,6 mg	5.738,9 mg.m	21,42%
Total	871,2 mg	26.788,3 mg.m	100,00%

El procedimiento empleado para el cálculo de la rigidez en cada piso de cada uno de los pórticos que conforman los diferentes modelos estudiados es similar al presentado por Maldonado y Chio (2004). Primero se toma un pórtico y se le aplica un estado de cargas externas que produzcan una deformación acorde a la generada en el primer modo de vibración; a continuación se analiza la estructura para el estado de cargas asumiendo las placas rígidas y se determina su deformación por niveles; luego se calculan las derivas de piso y los cortantes, de acuerdo con el estado de cargas asumido. Por último, la rigidez de piso se estima igual al cortante sobre la deriva del piso respectivo.

$$k_i = \frac{V_i}{\Delta_i} \tag{10}$$

**5. Definición de procedimientos**

Los procedimientos hacen referencia a las distintas recomendaciones de estimación de la torsión natural expuestas en los diferentes códigos de diseño y construcción analizados, y las propuestas por diferentes investigadores. Ellas comprenden principalmente el cálculo de una excentricidad de diseño primaria (para el diseño del borde flexible) mayorada por un factor

$\alpha$ , y una excentricidad de diseño secundaria, en general encaminada al diseño del borde rígido de la planta, afectada por un factor  $\delta$ .

El propósito de esta investigación solo es el estudio de la torsión natural; por tanto, la excentricidad accidental, que involucra el factor  $\beta$ , no es considerada en los procedimientos que a continuación se presentan. La fuerza  $F_t$  del nivel superior del edificio<sup>3</sup> (considerada en algunos códigos) tampoco es tomada en cuenta en esta investigación y no se hace ninguna referencia a ella; además, su aplicación sería innecesaria, dado que los códigos que la citan la recomiendan para estructuras con períodos mayores a 0,7 segundos (De la Colina, 2002).

- **Procedimiento I.** En él se consideran las recomendaciones de las *Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98* (1998), según las cuales los valores de  $\alpha$  y  $\delta$  son iguales a uno (1). Su uso equivale a asumir que las fuerzas sísmicas son aplicadas estáticamente. Este procedimiento desconoce la amplificación dinámica del cortante en los elementos estructurales en el borde flexible de la planta y, además, considera una disminución total del cortante por efectos torsionales en el borde rígido del edificio.
- **Procedimiento II.** Emplea las recomendaciones del código estadounidense (*Uniform Building Code, UBC-97*). Este procedimiento utiliza  $a$  igual a 1,0 y  $\delta$  igual a 0,0; es decir, no amplifica el cortante producido por los efectos torsionales en el borde flexible y no considera la reducción del cortante en los elementos del borde rígido debida a la torsión natural.
- **Procedimiento III.** Aplica las recomendaciones del *Natural Building Code of Canada (NBCC)*, que fueron estudiadas extensamente por Humar y Kumar (1999). Aquí se utiliza  $\alpha = 1,5$  y  $\delta = 0,5$ ; es decir, se amplifican los efectos torsionales en el borde flexible y se reducen parcialmente en el borde rígido.
- **Procedimiento IV.** En él se emplean los valores recomendados por el *Mexico City Building*

*Code*:  $\alpha = 1,5$  y  $\delta = 1,0$ ; además, se considera una excentricidad mínima correspondiente al 50% de la excentricidad de los niveles adyacentes.

- **Procedimiento V.** Este procedimiento hace referencia al código sísmico australiano *Australian Standard AS 1170.4* (1993); en este caso,  $\delta = 0,5$  y el valor de  $\alpha$  se calcula mediante la ecuación (11), propuesta por Duan y Chandler (1993) y analizada brevemente por De la Colina (2002).

$$\alpha = 2.6 - 3.6 \frac{e}{b} \geq 1.4 \quad (11)$$

- **Procedimiento VI.** En él se aplican las recomendaciones realizadas por De la Colina (2002), quien propone una fórmula para calcular el factor  $\alpha$  (ecuación 12), similar a la del código australiano, y un factor  $\delta = 0,5$ . El autor también recomienda una excentricidad mínima del 20% de la excentricidad promedio de todos los pisos; esta consideración también se incluye en este procedimiento.

$$\alpha = [2,25 - 2,0(e_s/b)] \geq 1,25 \quad (12)$$

- **Procedimiento VII.** Involucra en parte las recomendaciones sugeridas por Humar y Kumar<sup>4</sup> (1999), que se presentan en las ecuaciones 13 y 14.

$$e_{d1} = e + 0,05b \quad (13)$$

$$e_{d2} = e - 0,05b \quad (14)$$

El valor  $\pm 0,05b$  no hace referencia a la excentricidad accidental; es más bien una parte definida empíricamente para tener en cuenta la torsión natural.

<sup>3</sup> En el estudio realizado por De la Colina (2002) se analizó la conveniencia de considerar esta fuerza.

<sup>4</sup> Las recomendaciones originales de Humar y Kumar incluyen dos ecuaciones para el cálculo de la excentricidad de diseño para el borde rígido, dependientes del valor de la relación entre las frecuencias rotacional y traslacional del sistema.

La tabla 2 resume los siete procedimientos considerados en esta investigación, que se utilizan para el análisis de los tres modelos propuestos.

**Tabla 2.** Procedimientos de diseño

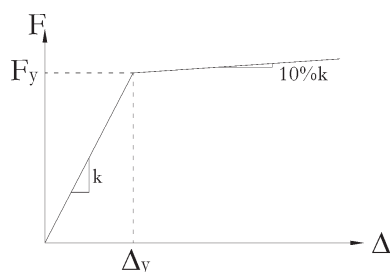
Procedimiento	$\alpha$	$\delta$	Observaciones
I	1,0	1,0	
II	1,0	0,0	
III	1,5	0,5	
IV	1,5	1,0	emin, 50% de la excentricidad adyacente
V	ecuación [10]	0,5	
VI	ecuación [10]	1,0	emin, 20% de la excentricidad promedio
VII	1,0	1,0	considera un factor +/-0,5b

## 6. Propiedades inelásticas

Involucran un diagrama fuerza-deformación definido por los valores de fuerza de fluencia  $F_y$  y desplazamiento de fluencia  $\Delta_y$ , para cada plano resistente, como se muestra en la figura 4. La obtención de estos valores se realiza mediante un cálculo estático, utilizando un espectro de aceleraciones reducido por un coeficiente de capacidad de disipación de energía  $R$ . En esta investigación se consideran dos valores para el coeficiente  $R$ , a saber, 3,5 y 7,0; ellos se emplean para evaluar la conveniencia de las diversas recomendaciones, a la luz de dos niveles de comportamiento inelástico.

Debido a que cada procedimiento considera diferentes factores  $\alpha$  y  $\delta$  para la excentricidad de diseño, las fuerzas de fluencia en los planos para el mismo modelo serán diferentes, al evaluarlas con distintos procedimientos.

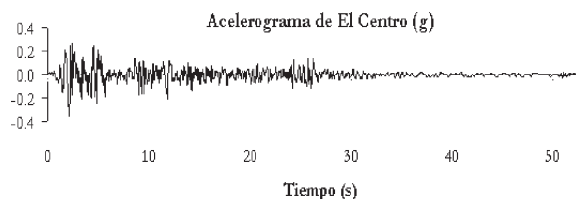
**Figura 4.** Relación fuerza-deformación de los planos resistentes



### 6.1. Definición de la acción sísmica

El registro acelerográfico que se utilizará para evaluar las propiedades inelásticas de los planos resistentes; es el sismo del Imperial Valley Registro «El Centro» - Componente NS -  $A_{max} = 0,348 \text{ g}$  - duración 53,8 s; por tanto, las propiedades no lineales de los elementos son calculadas con un procedimiento estático, tomando el espectro de aceleraciones de este registro acelerográfico (figuras 5 y 6).

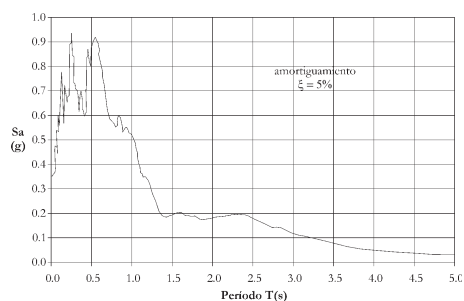
**Figura 5.** Registro «El Centro» - Componente NS -  $A_{max} = 0,348 \text{ g}$  - duración 53,8 s.



El período fundamental de los modelos se calcula con la ecuación simplificada  $T_a = C_t h_n^{3/4}$ ; para este caso particular  $C_t$  se asume igual a 0,08 y  $h_n$  corresponde a 15 m; por tanto,  $T_a = 0,6 \text{ s}^5$ .

El cortante sísmico en la base se estima como el producto del peso de la estructura por la máxima aceleración espectral de diseño ( $S_a = 0,90\text{g}$ ,  $M = 871,2 \text{ Mg}$ ,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ,  $V_b = 7.691,8$ ).

**Figura 6.** Espectro elástico de diseño



Espectro de aceleraciones del temblor del Imperial Valley Registro "El Centro" - Componente NS -  $A_s = 0.348\text{g}$  - Duración 53.8 s(s)

<sup>5</sup>  $T_a$  representa el período fundamental aproximado,  $C_t$  es un coeficiente que varía de acuerdo con el sistema estructural del edificio y  $h_n$  es la altura del edificio.

### 6.2. Definición de las fuerzas sísmicas

Para este caso, el cortante en la base, que se distribuye en la altura del edificio como fuerzas sísmicas, es en realidad un cortante reducido por los coeficientes de disipación de energía  $R$  de 3,5 y 7,0.

### 7. Evaluación de centroides y centros de cortante

Para todos los modelos, el centro de masa se localiza sobre el eje 2. Esto significa que si el modelo es asimétrico, solo lo es alrededor del eje  $Y$ ; por tanto, en todos los niveles de los modelos 1 y 2 el centro de masa se localiza en el centro geométrico de la planta; en consecuencia, el centro de cortante en todos los pisos coincide con el centroide. En cada piso del modelo 3 el centro de masa está desplazado a una distancia de 2,5 m a la derecha, presentándose una situación similar a la anterior; el centro de cortante de este modelo se localiza sobre una línea vertical

que pasa 2,5 m a la derecha del centro geométrico de la planta.

### 8. Evaluación del centro de rigidez del entrepiso

Es necesario recordar la definición de centro de rigidez o centro de torsión:

$$CRx_j = \frac{\sum k_{yi} \cdot x_i}{\sum k_{yi}} \quad CRy_j = \frac{\sum k_{xi} \cdot y_i}{\sum k_{xi}} \quad (15)$$

En (13),  $x_i$  y  $y_i$  son las coordenadas de los elementos resistentes y  $k_{xi}$  y  $k_{yi}$  son las rigideces del elemento  $i$  en las direcciones  $X$  y  $Y$  respectivamente.

Solo el modelo 2 presenta el centro de rigidez en una localización distinta del centro geométrico, y esta asimetría se presenta únicamente sobre el eje  $Y$ <sup>6</sup>; los valores del centro de rigidez de cada uno de sus niveles se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo del centro de rigidez, Modelo 2

Nivel	Eje	Kj	Xj	CRx	e	%b
Quinto	A	20703,93 kN/m	0,0 m			
	B	18395,88 kN/m	5,0 m			
	C	18395,88 kN/m	10,0 m	7,27 m	0,23 m	0,03 b
	D	18395,88 kN/m	15,0 m			
total		75891,6 kN				
Cuarto	A	32362,46 kN/m	0,0 m			
	B	19379,84 kN/m	5,0 m			
	C	19379,84 kN/m	10,0 m	6,42 m	1,08 m	0,14 b
	D	19379,84 kN/m	15,0 m			
total		90502,0 kN				
Tercero	A	40941,66 kN/m	0,0 m			
	B	19579,05 kN/m	5,0 m			
	C	19579,05 kN/m	10,0 m	5,89 m	1,61 m	0,21 b
	D	19579,05 kN/m	15,0 m			
total		99678,8 kN				
Segundo	A	55161,54 kN/m	0,0 m			
	B	20334,06 kN/m	5,0 m			
	C	20334,06 kN/m	10,0 m	5,25 m	2,25 m	0,30 b
	D	20334,06 kN/m	15,0 m			
total		116163,7 kN				
Primero	A	123456,79 kN/m	0,0 m			
	B	29815,15 kN/m	5,0 m			
	C	29815,15 kN/m	10,0 m	4,20 m	3,30 m	0,44 b
	D	29815,15 kN/m	15,0 m			
total		212902,2 kN				

<sup>6</sup> Para el cálculo del centro de rigidez, Caro O. (2002) presenta dos procedimientos de interés. El primero de ellos supone una interconexión de los pórticos ubicados en la misma dirección por medio de elementos infinitamente flexibles e indeformables a fuerza axial; el segundo utiliza un procedimiento matricial abreviado.

### 9. Evaluación de los momentos torsionales de piso ( $M_T$ ) y distribución de las fuerzas sísmicas entre los planos resistentes de la edificación

El momento torsor de piso en cada entrepiso es igual al producto de la fuerza cortante en el entrepiso por cada una de las excentricidades de diseño descritas por los siete procedimientos. La fuerza cortante que debe ser resistida por cualquier elemento resistente es igual a la suma de dos efectos, debido a la fuerza cortante de piso  $V$  y el consecuente momento torsional de piso  $M_T$ .

Los modelos se someten a la acción simultánea de dos componentes sísmicas: la primera equivalente al 100% en la dirección  $Y$  y la segunda al 30% en la dirección  $X$ .

### 10. Análisis

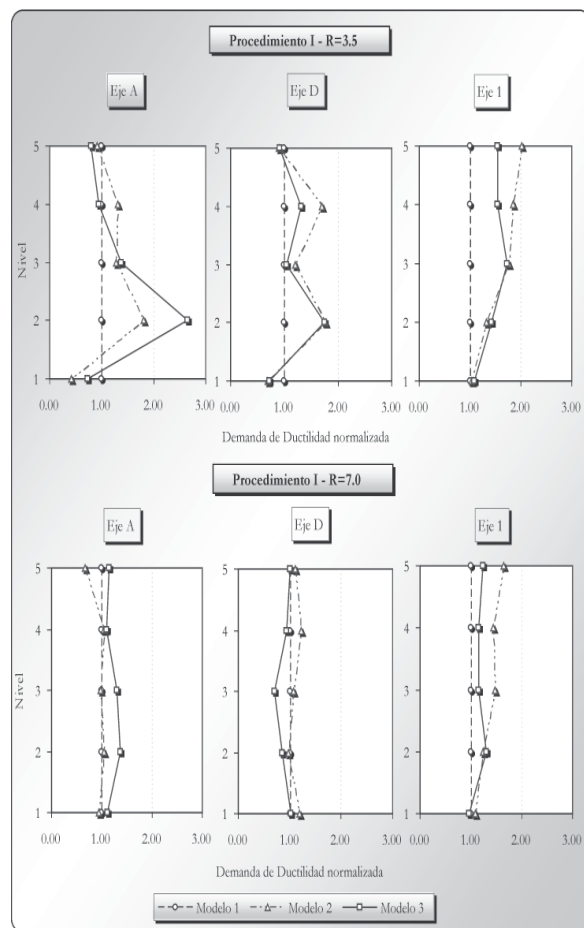
Una vez calculadas las fuerzas de fluencia de todos los elementos de resistencia lateral de los tres modelos, de acuerdo con los siete procedimientos de diseño, y utilizando los dos coeficientes de reducción de resistencia  $R$ , tales modelos son sujetos a la componente N-S del movimiento sísmico de “El Centro” (1940), escalado 1,0 y 0,3 en las direcciones  $Y$  y  $X$  respectivamente.

Las demandas de ductilidad son calculadas para cada elemento de resistencia lateral; luego, estas se normalizan para un análisis comparativo posterior. Debido a que los elementos más afectados por el movimiento torsional son los que se encuentran más alejados del centro de resistencia, solo son graficadas las demandas de ductilidad de los ejes  $A$  (borde rígido),  $D$  (borde flexible) e  $I$  (elemento transversal a la componente principal del sismo).

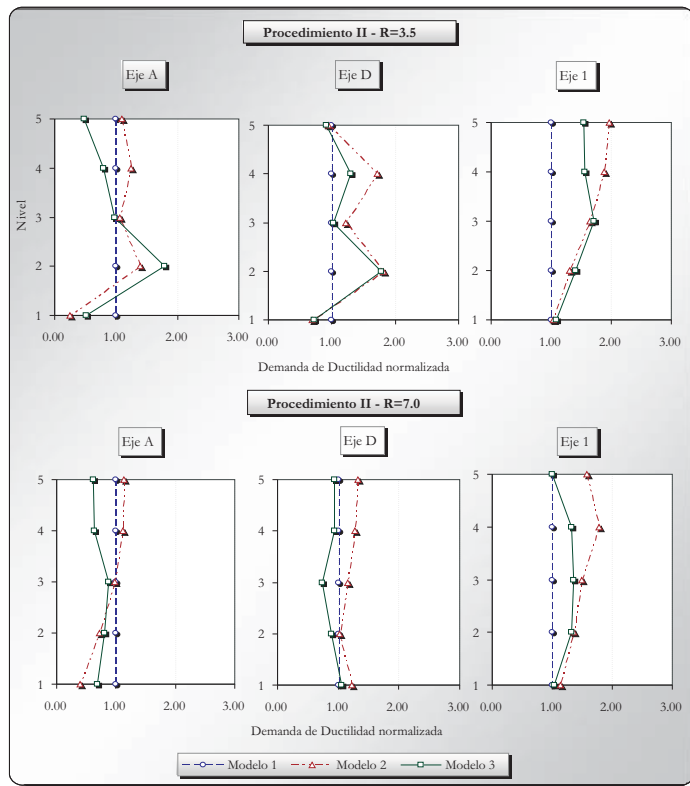
Buscando una verdadera comparación del comportamiento de los modelos torsionalmente desbalanceados, analizados de acuerdo con los diferentes procedimientos con el modelo torsionalmente balanceado, se calcula la demanda de ductilidad normalizada tomando como base este último modelo. El procedimiento más adecuado será aquel cuyas

demandas de ductilidad, para cada plano resistente, se aproximen en lo posible a las que presentan esos mismos planos en el modelo torsionalmente balanceado. Esto significa que las demandas de desplazamiento adicionales debidas a los efectos torsionales en los edificios torsionalmente desbalanceados son compensadas con fuerzas de diseño adicionales, acordes con este incremento en la exigencia.

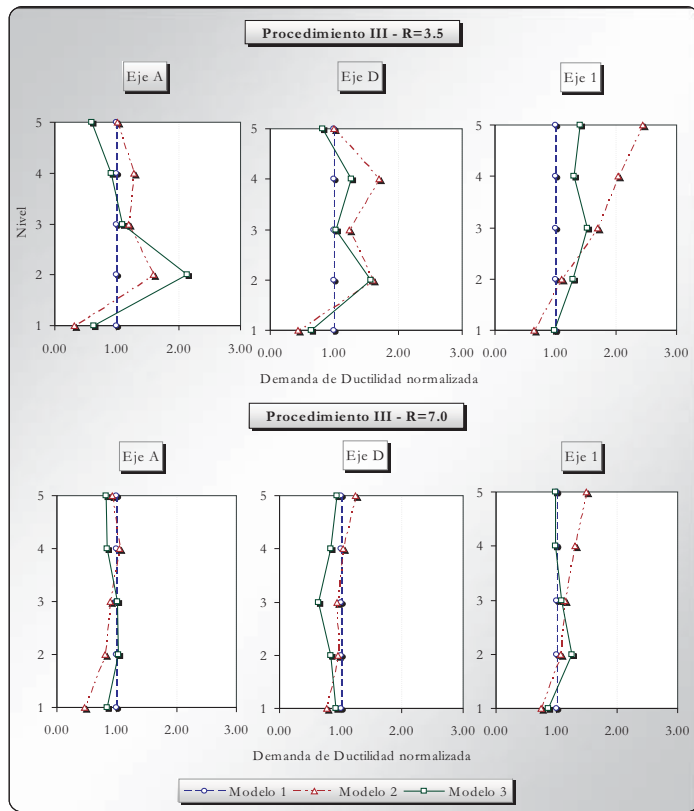
Figura 7. Demandas de ductilidad normalizadas (procedimiento I)



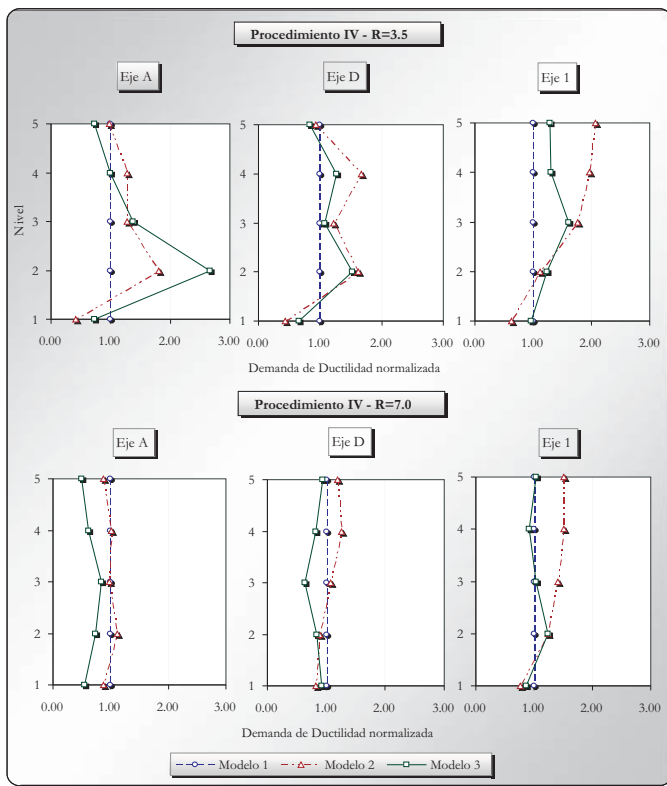
**Figura 8.** Demandas de ductilidad normalizadas (procedimiento II)



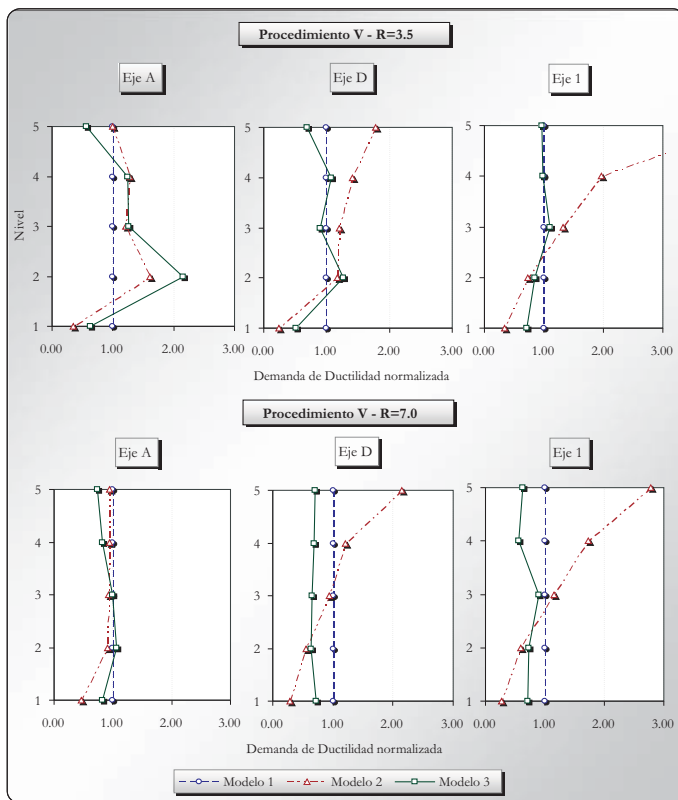
**Figura 9.** Demandas de ductilidad normalizadas (procedimiento III)



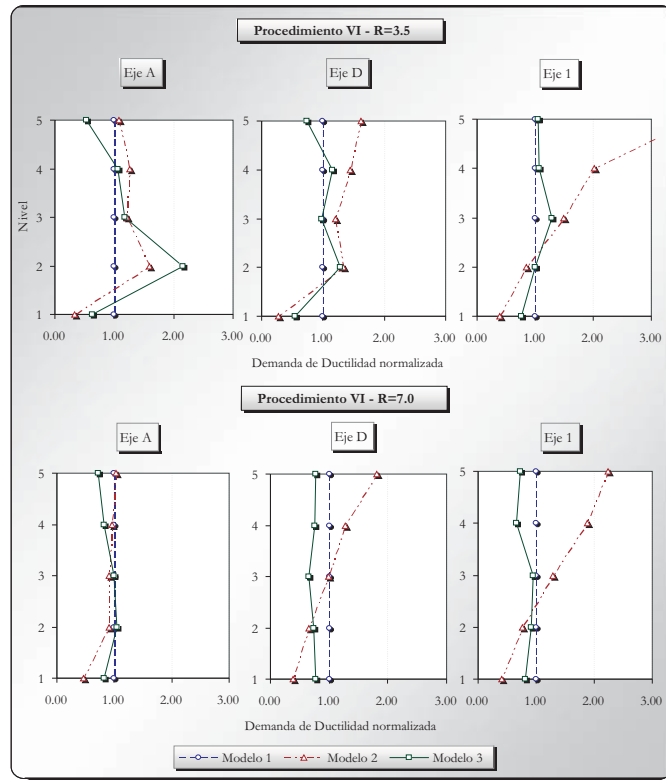
**Figura 10.** Demandas de ductilidad normalizadas (procedimiento IV)



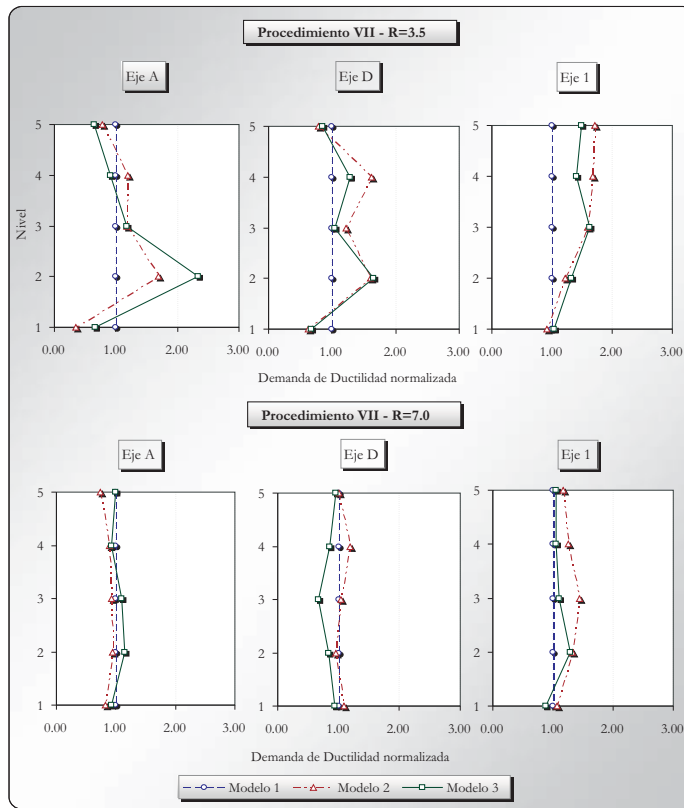
**Figura 11.** Demandas de ductilidad normalizadas (procedimiento V)



**Figura 12.** Demandas de ductilidad normalizadas (procedimiento VI)



**Figura 13.** Demandas de ductilidad normalizadas (procedimiento VII)



- *Procedimiento I:* al igual que los demás, presenta un salto abrupto en la demanda de ductilidad del borde rígido de la planta (eje *A*) en el segundo nivel (aunque este comportamiento predomina más en el modelo 3) con un  $R$  de 3,5. El borde flexible (eje *D*) y el plano transversal (eje *I*) no muestran un comportamiento más alentador para  $R = 3,5$ , dado que se presentan irregularidades en los niveles pares para el eje *D* en los modelos desbalanceados, y demandas de ductilidad superiores a las presentadas en el modelo balanceado para los niveles superiores en el eje *I*. Cuando se considera  $R = 7,0$ , el comportamiento de las demandas de ductilidad es más uniforme para todos los planos y en todos los niveles del edificio (figura 7).
- *Procedimiento II:* como es de esperar, el comportamiento del borde flexible de la planta es similar al procedimiento anterior, debido a la utilización del mismo valor del factor  $\alpha$ . La demanda de ductilidad del borde rígido con  $R = 3,5$  presenta un salto menos brusco en el segundo nivel. Cuando se utiliza  $R = 7,0$ , la respuesta del borde rígido mejora un poco, mientras que la del plano transversal hace lo contrario, todo esto en pequeñas proporciones (figura 8).
- *Procedimientos III y IV:* presentan un comportamiento similar a los anteriores, pero con un incremento considerable en las demandas de ductilidad de los niveles superiores para el plano transversal, cuando se utiliza un  $R = 3,5$  (figuras 9 y 10).
- *Procedimientos V y VI:* en ellos se observa que en el modelo 2 la demanda de ductilidad de los bordes flexible y transversal en los niveles superiores del edificio sobrepasa en buena medida la que presentan estos mismos planos en la estructura torsionalmente balanceada (figuras 11 y 12).
- *Procedimiento VII:* es quizás el que presenta un comportamiento más uniforme para las

demandas de ductilidad de los tres planos y en todos los modelos considerados, cuando se utiliza  $R = 7,0$ , aunque se siguen presentando irregularidades en las demandas de ductilidad en los planos resistentes de las estructuras asimétricas con respecto a las correspondientes en el modelo balanceado, cuando  $R = 3,5$  (figura 13).

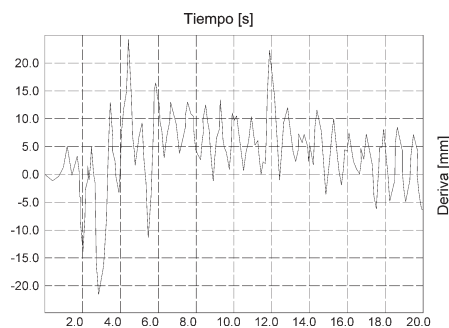
Aunque las gráficas no permiten una conclusión tajante y definitiva acerca de cuál es el procedimiento que produce los mejores resultados, sí muestra algunas tendencias importantes en el comportamiento de las demandas de ductilidad de los diferentes planos resistentes en cuanto a torsión natural, cuando se emplean distintos procedimientos estáticos de diseño.

El procedimiento I no presenta un comportamiento muy distante de los obtenidos con los demás ni con el procedimiento VII, que en este caso ofrece la respuesta más adecuada. Las afirmaciones solo son válidas para las estructuras analizadas en esta investigación, cuando son sometidas al registro acelerográfico aquí utilizado.

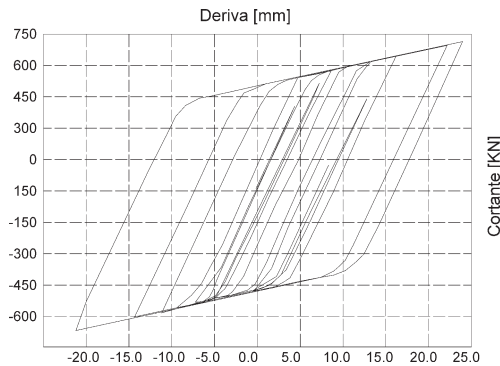
## 11. Otros resultados parciales obtenidos

Del análisis realizado se obtuvo gran cantidad de datos, imposibles de presentar en este documento por su extensión; entre ellos se encuentran las curvas de deformación en el tiempo para cada plano resistente y los diagramas histeréticos. Las figuras 14 y 15 muestran estos diagramas para el eje *D*, en el primer piso del modelo 1 cuando se utiliza un  $R = 7,0$ .

**Figura 14.** Curva deriva vs. tiempo, plano resistente eje *D*, primer piso modelo 1,  $R = 7,0$



**Figura 15.** Curva fuerza cortante vs. deriva, plano resistente eje D, primer piso modelo I, R = 7,0



En la figura 14 puede observarse que la deformación permanente del plano resistente se aleja de la posición de equilibrio; en la figura 15 se registra la pendiente de 10% en la curva esfuerzo-deformación posfluencia.

## 12. Conclusiones

En este estudio se analizan las recomendaciones de diseño para edificios de varios pisos torsionalmente desbalanceados presentadas por diferentes códigos de diseño de edificaciones de países como Canadá, Estados Unidos, México y Australia, entre otros; además, las propuestas por diferentes investigadores y los lineamientos de las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98.

La variación de las fuerzas cortantes en los planos resistentes debida a los efectos de movimientos torsionales, ocasionados en las estructuras cuyos centros de rigidez no coinciden con los respectivos centros de masa cortante, son tenidas en cuenta por la mayoría de los códigos, cuando se aplica un método estático de diseño, con el uso de excentricidades de diseño que permiten al diseñador estimar los momentos torsionales de piso. Las excentricidades de diseño tienen la forma de las ecuaciones (1) y (2), y los valores de los coeficientes  $\alpha$ ,  $\delta$  y  $\beta$  varían de acuerdo con cada código de diseño.

La ecuación (1) está destinada al diseño del borde flexible de la planta, que debido al movimiento torsional sufre un incremento en los despla-

mientos de los planos resistentes localizados en este lado del edificio; por tanto, para todos los casos el valor de  $\alpha$  nunca es inferior a la unidad. La ecuación (2) generalmente se destina al diseño del borde rígido de la planta del edificio; sin embargo, para edificios con cocientes de frecuencias bajos la ecuación (1) produce mayores fuerzas de diseño. Esto puede explicarse observando que, debido a los efectos torsionales, los desplazamientos en el borde rígido tienen dirección opuesta al desplazamiento solo por traslación. En estructuras torsionalmente flexibles, el desplazamiento debido al movimiento torsional sobrepasa varias veces el debido solo a la traslación, por lo cual en estos casos la ecuación (1) ofrece resultados más acordes. El valor del factor  $\delta$  es siempre menor o igual a la unidad. En las ecuaciones de excentricidad de diseño los valores de  $\alpha$  y  $\delta$  son considerados para tener en cuenta la naturaleza dinámica del evento sísmico, así como la amplificación y disminución de los desplazamientos en cada uno de los bordes.

Las marcadas diferencias entre las recomendaciones de los códigos de diseño de otros países y las que presentan las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98 son evidentes. Mientras los demás códigos consideran factores para tener en cuenta la naturaleza dinámica del evento sísmico, las recomendaciones de la NSR-98 involucran una aplicación estática de las fuerzas de piso cuando se estudian los efectos torsionales.

La conveniencia de utilizar como parámetro de comparación las demandas de ductilidad por desplazamiento queda al descubierto al saber que el objetivo real es un método óptimo, representado por las excentricidades de diseño, que considere de la mejor manera el cálculo de las fuerzas en los elementos resistentes de la estructura, incluyendo los efectos torsionales.

En la búsqueda de demandas de ductilidad por desplazamiento en los diferentes planos de la estructura torsionalmente desbalanceada, similares a las demandas de ductilidad correspondientes, en

la estructura sin desequilibrio torsional, se pretende en realidad que la variación en la respuesta de estos dos modelos, ocasionada por un movimiento torsional de la estructura, resultado de la asimetría en la distribución de la masa o la rigidez del edificio, sea compensada en la misma proporción por una variación en la fuerza con la cual se diseña este plano de resistencia lateral.

Una posible explicación al comportamiento más uniforme que se presenta en los modelos asimétricos cuando se utiliza  $R = 7,0$ , comparado con la respuesta de los mismos al utilizar  $R = 3,5$ , podría ser que en el primer sistema todos los elementos resistentes permanecen gran parte del tiempo en el intervalo plástico, desapareciendo la asimetría que genera el problema de torsión; en el segundo existen momentos en que la excentricidad se incrementa brutalmente por la plastificación de uno o varios elementos, presentándose temporalmente unos sistemas elásticos con excentricidades superiores a las iniciales. De acuerdo con los resultados obtenidos, el análisis de las gráficas de demandas de ductilidad

normalizada señala que el procedimiento que más se acerca al comportamiento esperado es el VII. Sin embargo, este no logra el objetivo principal, en especial para valores de  $R = 3,5$ .

Es importante reconocer las limitaciones de este estudio, al incluir solo tres modelos y considerar solo un evento sísmico. La complejidad del comportamiento de estructuras de varios pisos, considerando las características no lineales del análisis bajo los efectos torsionales, hace que el sistema sea muy sensible a cualquier variación, bien sea en las propiedades del edificio o en las características del evento sísmico. Existe, por tanto, la necesidad de profundizar más sobre este tema en futuras investigaciones, considerando más modelos de edificios y una amplia miscelánea de registros sísmicos. No obstante, estudios como el presente permiten entender los lineamientos propuestos por las diferentes normas para evaluar la torsión de estructuras asimétricas; además, logran destacar las alarmantes diferencias entre las recomendaciones de los diferentes códigos e investigadores analizados.




---

## Referencias bibliográficas

---

- [1] CARO, Raúl (2002). "Diseño para el momento torsor en losas de concreto reforzado". Revista Tecnura No. 12, pp. 42-53.
- [2] COLINA, J. De La (2002). "Assessment of Design Recommendations for Torsionally Unbalanced Multistory Buildings". Earthquake Spectra 19 (1): 47-66.
- [3] DUAN, X. N. y A. M. CHANDLER (1993). "Inelastic seismic response of code-designed multistory frame buildings with regular asymmetry", Earthquake Eng. Struct. Dyn. 22 (5): 431-445.
- [4] HUMAR, J. L. y P. KUMAR (1998). "Torsional motion of buildings during earthquakes. I. Inelastic response". Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 25, 5; ProQuest Science Journals, pp. 898-916.
- [5] MALDONADO, E. y G. CHIO CHO (2004). *Análisis sísmico de edificaciones*. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, pp. 273-276. ISBN 958-8187-30-3.
- [6] *Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98* (1998). Bogotá. D.C. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- [7] PAZ, M. (1994). *International Handbook of Earthquake Engineering/Codes, Programs, and Examples*, New York Chapman & Hall.