

ESTUDIO ANALÍTICO DE LOS EFECTOS DE LA TORSIÓN NATURAL EN EL COMPORTAMIENTO DE EDIFICIOS DE VARIOS PISOS TORSIONALMENTE DESBALANCEADOS ANTE SOLICITACIONES SÍSMICAS

OSCAR JAVIER GÓMEZ RUEDA

Ingeniero Civil

oscargomez@universia.net.co

ESPERANZA MALDONADO RONDÓN

Profesora Titular

Escuela de Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

emaldona@uis.edu.co

RESUMEN

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

Este estudio se hace 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 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; siete procedimientos de diseño que reflejan las recomendaciones de los diferentes códigos de construcción y las desarrolladas en recientes investigaciones, y considera dos coeficientes de reducción de resistencia que involucran una evaluación en diferentes niveles de la respuesta inelástica.

PALABRAS CLAVE: Torsión, edificios asimétricos, torsión natural, excentricidad de diseño

ABSTRACT

Recommendations of design for torsionally unbalanced multistory buildings, that presents different codes from desing of buildings, in countries like Canada, United Status, Mexico and Australia among others and those that you propose different investigators, are analyzed in this document along with the recommendations presented within the Design and Constructions Earthquake Resistant Colombian Regulations NSR-98.

This study becomes by means of a comparative inelastic analysis of the normalized demands of ductility in the resistant planes of a building, whose centers of resistance of floor do not agree with the shear centers, with respect to that present these same planes in a model torsionally balanced. The study considers three models of buildings of five-story, subjected to both horizontal components of the El Centro (1940) ground motion; seven procedures of design that reflect the recommendations studied during all the investigation and consider two coefficients of resistance reduction.

KEYWORDS: Torsion, asymmetric buildings, natural torsion, eccentricity of desig

INTRODUCCIÓN

Las respuestas torsionales elásticas e inelásticas de edificios han sido estudiadas en diversas investigaciones; no obstante, sus conclusiones no son siempre consistentes unas con otras, lo cual 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 al modelo estudiado, a los valores

específicos de parámetros usados, y a 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 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.

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 por resultado momentos torsionales de piso, además de las fuerzas cortantes. Con un análisis estático y la aplicación simultánea de cortantes de piso y de momentos torsionales de piso, son calculadas las fuerzas en los elementos de resistencia lateral.

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

$$e_d = \alpha \cdot e + \beta b \quad \text{ó} \quad (1)$$

$$e_d = \delta \cdot e - \beta b \quad (2)$$

Donde "e" es la excentricidad estática de rigidez, es decir, la distancia entre el CM' (centro de masa) y el CR ; b es la mayor dimensión en planta del edificio perpendicular a la dirección del movimiento del terreno analizado; y α , δ , y β 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, αe y δe , intentan explicar la respuesta torsional del edificio que surge cuando éste presenta una planta asimétrica.

El segundo término, $+\beta b$, pretende tener en cuenta la excentricidad accidental², 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.

La torsión accidental en un edificio puede entenderse conceptualmente 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.

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 resistencia. Cuando los centros de resistencia no coinciden con los centros de masa, las fuerzas sísmicas causan el movimiento torsional en la estructura. Las estructuras con los centros de masa y de resistencia no coincidentes se definen como estructuras asimétricas, y el movimiento torsional de tales estructuras durante un terremoto es definido como torsión natural o torsión estructural.

TORSIÓN NATURAL EN SISTEMAS ELÁSTICOS DE UN SOLO PISO

La **Figura 1** muestra el modelo de edificio asimétrico de un piso estudiado por muchas 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 .

¹ El centro de masa es el punto geométrico de cada piso donde se supone concentrada la masa total del nivel y donde actúa la fuerza inercial inducida por un movimiento en la base del edificio.

² Algunos autores son de la opinión 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 accidental. J.L. Humar and P. Kumar, *Torsional motion of buildings during earthquakes. I. Elastic response*. Canadian Journal of Civil Engineering; Oct 1998.

Así, el centro de rigidez se encuentra en el eje X a una distancia "e" del centro de masa, la cual está dada por:

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

Donde 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.

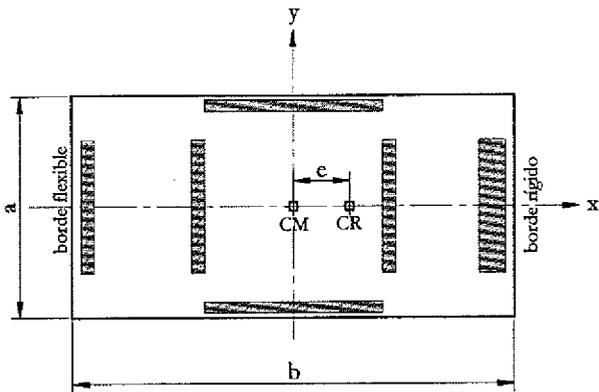


FIGURA 1. Planta de edificio asimétrico

Ecuaciones de movimiento

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

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

Donde 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_θ 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_θ es la rigidez torsional sobre el centro de masa, y u_{gy} es la aceleración del terreno en la dirección Y .

La rigidez torsional sobre el centro de resistencia esta dada por:

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

Donde 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 . La rigideces torsionales K_θ 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 ω_y , y frecuencia rotacional desacoplada ω_θ .

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

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

Realizando los cambios correspondientes, resulta la siguiente ecuación.

$$\begin{bmatrix} u_y \\ ru_\theta \end{bmatrix} + \omega_y^2 \begin{bmatrix} 1 & \frac{e}{r} \\ \frac{e}{r} & \Omega_r^2 + \left(\frac{e}{r}\right)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_y \\ ru_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -u_{gy} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Donde Ω_r se expresa como ω_θ/ω_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 mostrado en la Figura 1 está gobernada por ω_y , ω_θ , y e/r .

El parámetro Ω_r es estudiado a fondo por Humar y Kumar (1999). En general, un valor bajo de Ω_r puede conducir a un gran aumento en los desplazamientos del borde flexible y rígido, y puede causar peligro en los planos resistentes situados en esos bordes.

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 representan pórticos planos, los cuales asumen la responsabilidad estructural y de resistencia a cargas laterales. Las vigas que conforman

estos pórticos son rígidos; los elementos verticales corresponden básicamente a columnas de diferentes dimensiones de acuerdo con 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 las columnas y las vigas del primer modelo tienen dimensiones de 0,30*0,50 m; el lado con mayor inercia de las columnas se orienta en la dirección *Y* (ver Figura 2). En todos los niveles, los centros de masa se encuentran en el centro geométrico de cada planta.

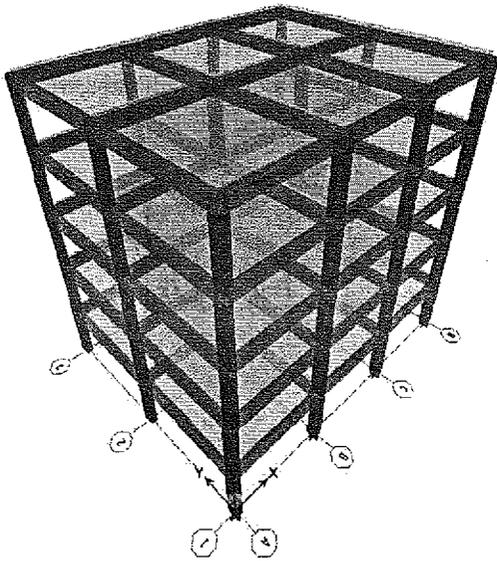


Figura 2. Vista isométrica, Modelo 1

• 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 por 1,50 m de longitud (ver Figura 3); esto hace que el centro 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, pasando estas a 0,30*0,40 m. En todos los niveles los centros de masa se encuentran, como en el primer modelo, en el centro geométrico de cada planta.

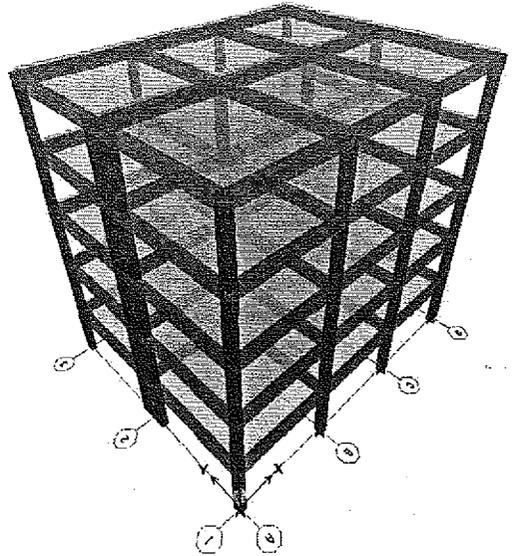


Figura 3. Vista isométrica, Modelo 2.

• Modelo 3

El tercer modelo considerado es 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
Quinto	124.6 Mg	3832.6 Mg.m	14.31%
Cuarto	186.6 Mg	5738.9 Mg.m	21.42%
Tercero	186.6 Mg	5738.9 Mg.m	21.42%
Segundo	186.6 Mg	5738.9 Mg.m	21.42%
Primero	186.6 Mg	5738.9 Mg.m	21.42%
Total	871.2 Mg	26788.3 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). En primer lugar se toma un pórtico y se le aplica un estado de cargas externas que

produzcan una deformación acorde con 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.

$$k_i = \frac{V_i}{\Delta_i} \quad (10)$$

Definición de procedimientos

Los procedimientos hacen referencia a las distintas recomendaciones de estimación de la torsión natural realizadas 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 α , y una excentricidad de diseño secundaria, en general encaminada al diseño del borde rígido de la planta, afectada por un factor δ .

El propósito de esta investigación solo es el estudio de la torsión natural; por tanto la excentricidad accidental, que involucra el factor β , no es considerada en ninguno de los siguientes procedimientos. La fuerza F_i del nivel superior del edificio³, considerada en algunos códigos, no es tomada en cuenta en esta investigación, razón por la cual no se hace referencia a ella; además, su aplicación en esta parte sería innecesaria, dado que los códigos que la recomiendan lo hacen para estructuras con periodos mayores a 0,7 segundos (De la Colina, 2002).

• Procedimiento I

En este procedimiento se hace referencia a las recomendaciones de las *Normas colombianas de diseño y construcción sismo resistente NSR-98* (1998), el cual considera que los valores de α y δ son iguales a uno (1). Su uso equivale a asumir que las fuerzas sísmicas son aplicadas estáticamente. Este procedimiento desconoce la amplificación del cortante en los elementos estructurales en el borde flexible de la planta, pero considera una disminución total de los efectos torsionales en el borde rígido del edificio.

• Procedimiento II

Hace referencia a las recomendaciones formuladas en el código estadounidense (*Uniform Building Code, UBC-97*). Este procedimiento utiliza α igual a 1.0 y δ 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, debido a la torsión natural.

• Procedimiento III

Este procedimiento concierne a las recomendaciones presentadas en el *Natural Building code of Canada (NBCC)*, las cuales fueron estudiadas extensamente por Humar y Kumar (1999). Aquí se utiliza α igual a 1,5 y δ igual a 0,5; es decir, se amplifican los efectos torsionales en el borde flexible y se reducen parcialmente en el borde rígido.

• Procedimiento IV

En este procedimiento se utilizan los valores recomendados por el *Mexico City Building Code*: α igual a 1,5 y δ igual a 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 el valor de δ es igual a 0,5 y el valor especificado para α .. corresponde a 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

Se incluyen en este procedimiento las recomendaciones presentadas por De la Colina (2002), el cual propone una fórmula para calcular el factor α (**Ecuación 12**) similar a la del código australiano, y un factor δ igual 0,5. El autor también recomienda una excentricidad mínima del 20% de la excentricidad promedio de todos los pisos; su consideración también se incluye en este procedimiento.

$$\alpha = [2.25 - 2.0.(e_s / b)] \geq 1.25 \quad (12)$$

³ En el estudio, realizado por De la Colina, 2002 se analizó la conveniencia de considerar esta fuerza

• **Procedimiento VII**

Involucra en parte las recomendaciones sugeridas por Humar y Kumar⁴, que se presentan en las Ecuaciones 13 y 14.

$$e_{d1} = e + 0.05b \tag{13}$$

$$e_{d2} = e - 0.05b \tag{14}$$

El valor +/-0.05b no hace referencia a la excentricidad accidental; es más bien una parte definida empíricamente para tener en cuenta la torsión natural.

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

Tabla 2. Resumen de procedimientos de diseño

Procedimiento	α	δ	Observaciones
I	1.0	1.0	
II	1.0	0.0	
III	1.5	0.5	
IV	1.5	1.0	e_{min} , 50% de la excentricidad adyacente
V	ecuación [10]	0.5	
VI	ecuación [11]	0.5	e_{min} , 20% de la excentricidad promedio
VII	1.0	1.0	considera, un factor +/- 0.05b

Propiedades Inelásticas

Involucran un diagrama fuerza deformación definido por los valores de fuerza de fluencia F_y y desplazamiento de fluencia Δ_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. Estos valores 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 α y δ para la excentricidad de diseño, las fuerzas de fluencia en los planos para el mismo modelo serán diferentes, al evaluarlas con distintos procedimientos.

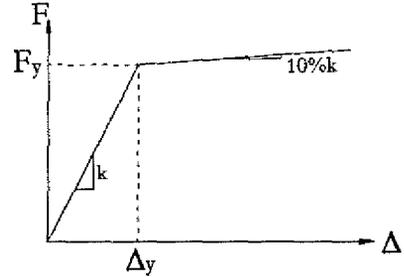


Figura 4. Relación fuerza deformación de los planos resistentes.

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 - $A_{max} = 0,348g$ - 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 (ver **Figuras 5 y 6**).

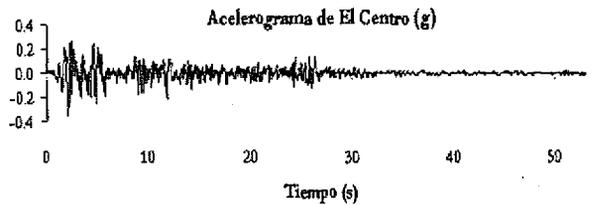


Figura 5. Registro "El Centro" - Componente NS - $A_{max} = 0.348g$ - Duración 53.8 s.

El periodo 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 es igual a 0,6s⁵.

El cortante sísmico en la base se estima como el producto del peso de la estructura por la máxima aceleración espectral de diseño ($S_a=0,90g$, $M=871,2 Mg$, $g=9,81 m/s^2$, $V_b=7691,8$).

⁴ Las recomendaciones originales de Humar y Kumar incorporan dos ecuaciones para el cálculo de la excentricidad de diseño para el borde rígido, que son dependientes del valor de la relación entre las frecuencias rotacional y traslacional del sistema.

⁵ T_a representa el periodo 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.

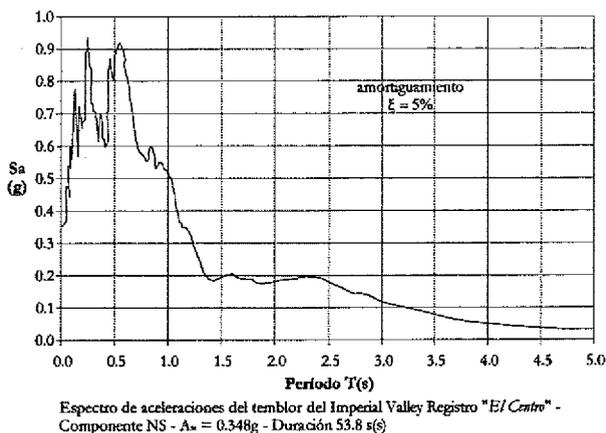


Figura 6. Espectro elástico de diseño

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.

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*. Luego, para los modelos 1 y 2, el centro de masa se localiza para todos los niveles en el centro geométrico de la planta; por lo tanto, el centro de cortante en todos los pisos coincide con el centroide. En el modelo 3 el centro de masa en cada piso está desplazado una distancia de 2,5 m a la derecha, presentándose una situación similar a la anterior; el centro de cortante para este modelo se localiza sobre una línea vertical que pasa 2,5 metros a la derecha del centro geométrico de la planta.

Evaluación del centro de rigidez del entrepiso

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

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

Donde 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 al centro geométrico, y esta asimetría

solo se presenta sobre el eje *Y*⁶. Para cada nivel de este modelo los valores del centro de rigidez, se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Cálculo del centro de rigidez, Modelo 2.

Nivel	Eje	Kj	Xj	CR _x	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				

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, el debido a la fuerza cortante de piso, *V* y el debido al momento torsional de piso *M_T*.

Los modelos se someten a la acción simultanea de dos componentes sísmicas, la primera equivalente al 100% en la dirección *Y*, y la segunda el 30% en la dirección *X*.

⁶ Dos procedimientos interesantes para el cálculo del centro de rigidez son presentados por Caro O. (2002). 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, mientras el segundo utiliza un procedimiento matricial abreviado.

Análisis

Una vez que las fuerzas de fluencia de todos los elementos de resistencia lateral han sido calculadas para los tres modelos de acuerdo con los siete procedimientos de diseño, y utilizando los dos coeficientes de reducción de resistencia R , los modelos son sujetos a la componente N-S, del movimiento sísmico de El Centro (1940).

Las demandas de ductilidad son calculadas para cada elemento de resistencia lateral; luego, estas demandas 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) $e1$ (elemento transversal a la componente principal del sismo).

En la búsqueda de 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 modelo. El procedimiento más adecuado será aquel cuyas demandas de ductilidad, para cada plano resistente, se aproximen en lo posible a las que presenta esos mismos planos en el modelo torsionalmente balanceado. Es decir 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.

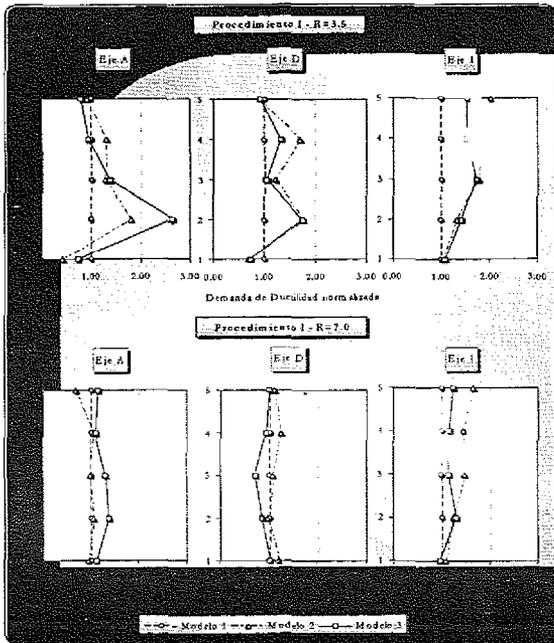


Figura 7. Demandas de ductilidad normalizadas - procedimiento I.

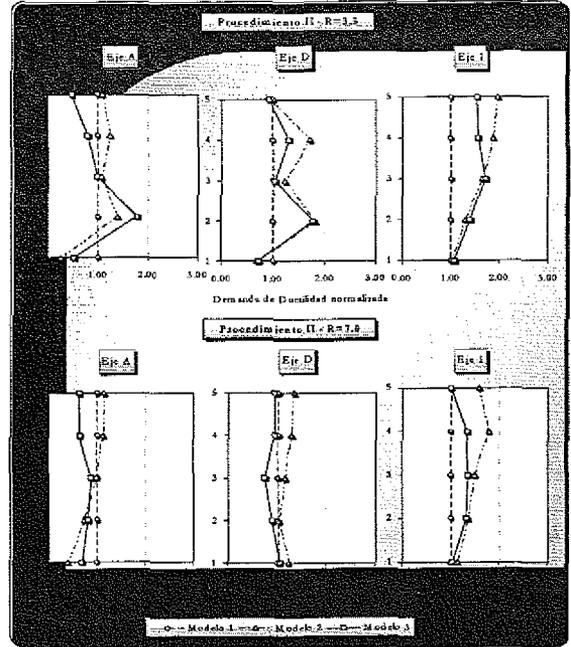


Figura 8. Demandas de ductilidad normalizadas - procedimiento II.

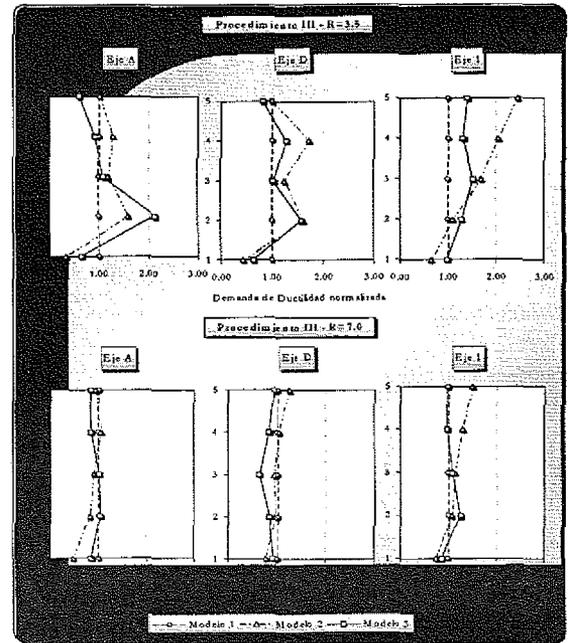


Figura 9. Demandas de ductilidad normalizadas - procedimiento III

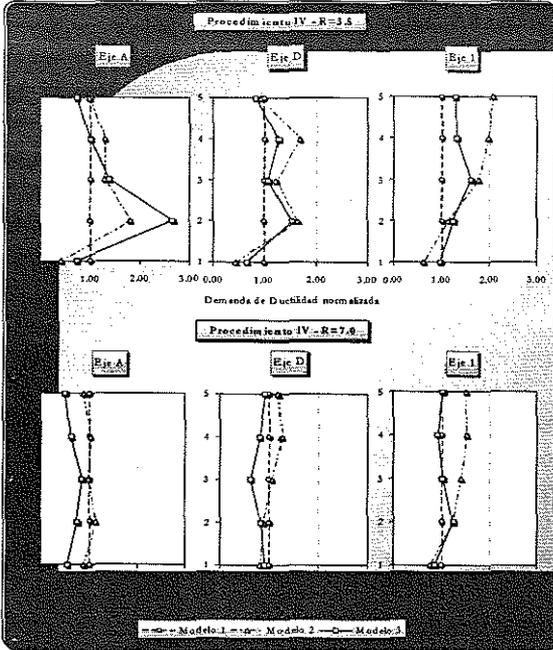


Figura 10. Demandas de ductilidad normalizadas - procedimiento IV

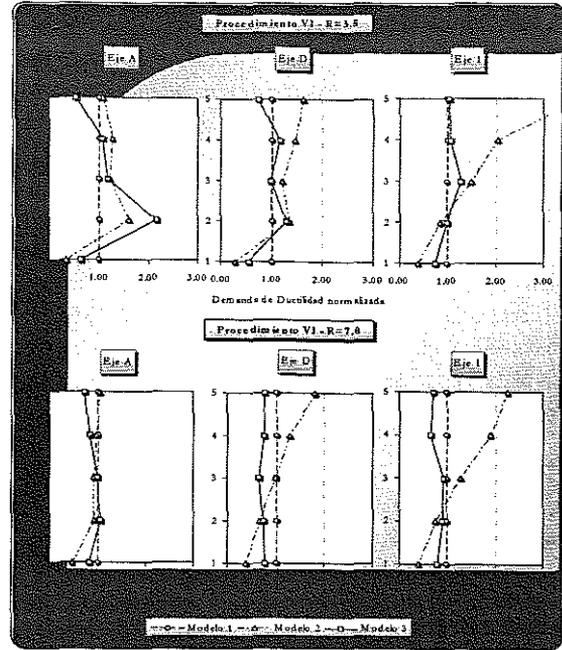


Figura 12. Demandas de ductilidad normalizadas - procedimiento VI

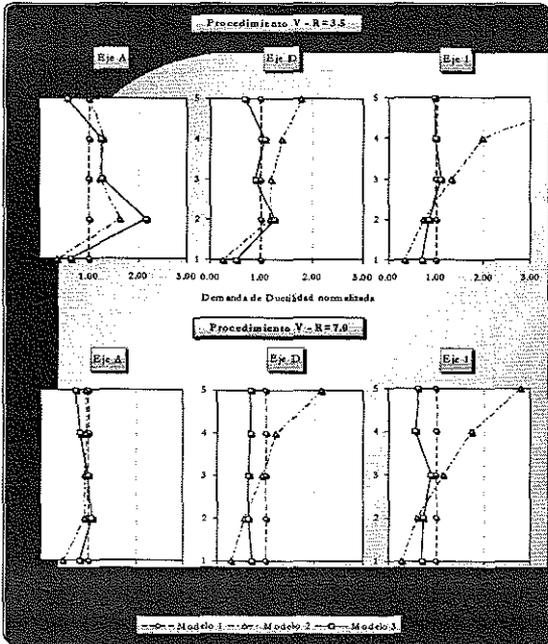


Figura 11. Demandas de ductilidad normalizadas - procedimiento V

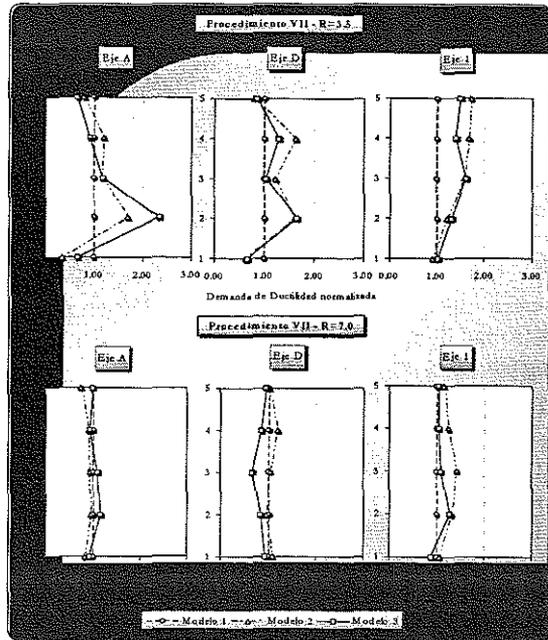


Figura 13. Demandas de ductilidad normalizadas - procedimiento VII.

- **Procedimiento I:** al igual que los demás procedimientos presenta un salto abrupto en la demanda de ductilidad del borde rígido de la planta (eje *A*) en el segundo nivel, siendo este comportamiento más predominante 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* igual a 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 1. El comportamiento de las demandas de ductilidad cuando se considera un *R* igual a 7,0, es más uniforme para todos los planos considerados y en todos los niveles del edificio (ver 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 α . La demanda de ductilidad del borde rígido con *R* igual a 3,5 presenta un salto menos brusco en el segundo nivel. Cuando se utiliza un *R* de 7,0 la respuesta del borde rígido mejora un poco, mientras que la del plano transversal hace lo contrario, pero todo esto en pequeñas proporciones (ver Figura 8).
- **Procedimientos III y IV:** presentan un comportamiento similar a los procedimientos anteriores, pero con un incremento considerable en las demandas de ductilidad de los niveles superiores para el plano transversal, cuando se utiliza un *R* igual a 3,5 (ver Figuras 9 y 10).
- **Procedimientos V y VI:** en estos dos procedimientos 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 (ver 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 un *R* de 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* es igual a 3,5 (ver Figura 13).

Aunque las gráficas no permiten una conclusión tajante y definitiva acerca de cuál es el procedimiento que produce los mejores resultados, si muestran algunas tendencias importantes en el comportamiento de las demandas de ductilidad de los diferentes planos resistentes cuando se

emplean distintos procedimientos estáticos de diseño en lo que a torsión natural se refiere.

El procedimiento I no presenta un comportamiento muy distante de los obtenidos con otros procedimientos y 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 utilizado en este estudio.

OTROS RESULTADOS PARCIALES OBTENIDOS

Del análisis realizado se obtuvieron 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* de 7,0.

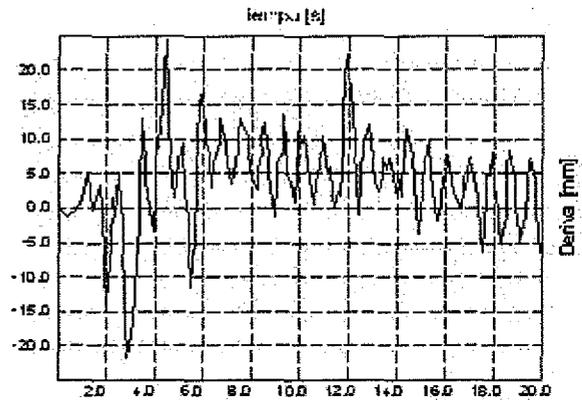


Figura 14. Curva deriva vs tiempo, plano resistente eje *D*, primer piso modelo 1, *R*=7,0.

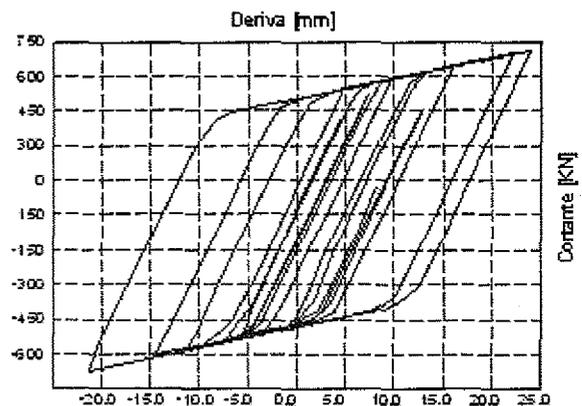


Figura 15. Curva fuerza cortante vs deriva, plano resistente eje *D*, primer piso modelo 1, *R*=7,0.

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 del 10% en la curva esfuerzo-deformación post-fluencia.

CONCLUSIONES

Las recomendaciones de diseño para edificios de varios pisos torsionalmente desbalanceados realizadas en diferentes códigos de diseño de edificaciones, de países como Canadá, Estados Unidos, México y Australia, entre otros, y las que proponen diferentes investigadores, son analizadas en este estudio, junto con las recomendaciones 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 resistencia no coinciden con los respectivos centros de 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 que el diseñador estime los momentos torsionales de piso. Las excentricidades de diseño tienen la forma de las ecuaciones [1] y [2], y los valores de los coeficientes α , δ y β varían de acuerdo con el código de diseño.

La **Ecuación (1)** esta destinada al diseño del borde flexible de la planta, que debido al movimiento torsional sufre un incremento en los desplazamientos de los planos resistentes localizados en este lado del edificio; por tanto, para todos los casos el valor de α nunca es inferior a la unidad.

La **ecuación (2)** generalmente está destinada 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 que en estos casos la **Ecuación (1)** ofrece resultados más acordes. El valor del factor δ es siempre menor o igual a la unidad. En las ecuaciones de excentricidad de diseño los valores de α y δ 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.

De acuerdo con los resultados obtenidos, y para finalizar, el análisis de las gráficas de demandas de ductilidad normalizada señala que el procedimiento que más se acerca al comportamiento esperado es el procedimiento VII, aunque este sigue estando bastante lejos del objetivo principal, en especial para valores de R igual a 3,5. Este procedimiento considera valores iguales a la unidad para los factores α y δ ; a su vez considera un factor adicional de $\pm 0.05b$ en la excentricidad de diseño, siendo éstas recomendaciones similares a las que proponen Humar y Kumar en su investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] CARO O., R. (2002). Diseño para el momento torsor en losas de concreto reforzado. En: Revista Tecnura No. 12, pp. 42-53.
- [2] DUAN, X. N., and CHANDLER, A. M. (1993) Inelastic seismic response of code-designed multistory frame buildings with regular asymmetry, Earthquake Eng. Struct. Dyn. 22 (5), 431-445, 1993.

- [3] HUMAR J.L. Y KUMAR, P. (1999) Torsional motion of buildings during earthquakes. I. Inelastic response. *Canadian Journal of Civil Engineering*; 1999.
- [4] MALDONADOR., E. Y CHIO C., G. (2004). Análisis sísmico de edificaciones. Universidad Industrial de Santander, pp. 273-276
- [5] DE LA COLINA, J. (2002). Assessment of Design Recommendations for Torsionally Unbalanced Multistory Buildings. *Earthquake Spectra*, Volume 19, No. 1, ps. 47-66
- [6] Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo resistente NSR-98 (1998). Asociación Colombiana de ingeniería Sísmica
- [7] PAZ, M. (1994). *International Handbook of Earthquake Engineering /Codes, Programs, and Examples*, Chapman & Hall