

EFFECTO DE LOS MODOS SUPERIORES EN LA RESPUESTA NO LINEAL DE MARCOS DÚCTILES DE CONCRETO REFORZADO CON CONTRAVENTEEO METÁLICO TIPO CHEVRÓN. CASO DE ESTUDIO.

Eber Alberto Godínez Domínguez

Profesor, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chiapas, Campus-I, Blvd. Belisario Domínguez, kilómetro 1081, Sin número, Col. Terán, 29050, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

Correo electrónico: eber.godinez@unach.mx .

Arturo Tena Colunga

Profesor, Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco,

Edificio P4, 3er Piso, Av. San Pablo # 180, 02200 México, D.F.

Correo electrónico: atc@correo.azc.uam.mx.

RESUMEN

Se presenta un estudio en que se evalúa, mediante análisis estáticos no lineales ante carga monótona creciente, el efecto de los modos superiores en la respuesta no lineal de marcos dúctiles de concreto reforzado con contraventeo metálico tipo chevrón ubicados en la zona del lago del Distrito Federal, México. Para este fin, se comparan los resultados de uno de los modelos de mayor altura considerados en el estudio (24 niveles), de análisis basados en distribuciones de cargas laterales asociadas al modo fundamental de vibración respecto a los obtenidos al considerar la contribución en la respuesta de un número mayor de modos de vibrar (“modal pushover”), procediendo conforme a lo actualmente descrito en la literatura especializada. Con base en los resultados obtenidos, es posible concluir que existe un impacto poco significativo de los modos superiores en la respuesta no lineal de los modelos estudiados, por lo que la obtención de parámetros de diseño globales, tales como la capacidad de deformación inelástica y factores de reducción por sobrerresistencia, con base en las curvas cortante-distorsión calculadas a partir de la respuesta del modo fundamental de vibración en el sistema estructural considerado, resulta adecuado para los modelos considerados, en que la masa modal asociada al modo fundamental de vibración es, en general, superior al 70%.

Palabras clave: Efecto de modos superiores; marcos de concreto reforzado contraventeados; análisis estáticos no lineales.

ABSTRACT

In this paper the authors summarize the results of a study devoted to evaluate, using nonlinear static analysis, the influence of higher mode effects on the response of ductile moment-resisting reinforced concrete concentric braced frames structures (RC-MRCBFs) using chevron steel bracing. RC-MRCBFs were assumed to be located in the lake bed zone of Mexico City. In order to evaluate such effects, the results obtained for a representative 24 story model using pushover analyses based upon the fundamental mode were compared with those obtained from the same 24 story model now using modal pushover analyses as presented in the literature. From the results obtained, it is possible to conclude that higher mode effects have a reduced impact on the response of the studied models. Hence, the procedure to obtain global seismic design parameters, such as ductility capacity and overstrength reduction factors, based on the results obtained from the pushover analyses in which only the fundamental mode seems to be adequate. It is important to consider that the modal mass associated to the fundamental mode is higher than 70% for most of the buildings with ductile behavior.

Keywords: Higher mode effects; RC braced frames; Nonlinear static analyses.

1. INTRODUCCIÓN

Dado el buen comportamiento observado en estructuras con base en marcos de concreto reestructuradas con contravientos metálicos, tanto en México como alrededor del mundo, y al hecho de que esta estructuración se propone en las Normas de Diseño por Sismo de México desde hace décadas, considerando incluso la posibilidad de que el comportamiento sea dúctil, es necesario valorar metodologías de diseño para estructuras nuevas que garanticen que una estructuración con base en marcos de concreto reforzado con contravientos concéntricos pueda comportarse dúctilmente. Asimismo, se requiere de la obtención de parámetros de diseño específicos que representen y predigan de la mejor manera posible el comportamiento del sistema estructural en estudio (Godínez y Tena 2011).

En Godínez (2010) y Godínez y Tena (2011) se proponen expresiones de diseño para edificios estructurados con base en marcos dúctiles de concreto reforzado con contraventeo metálico tipo chevrón (V invertida) con base en los resultados de análisis estáticos no lineales ante cargas monótonas crecientes de modelos de 4, 8, 12, 16 y 24 niveles, en que se consideraron distribuciones de cargas asociadas al primer modo de vibración. Es bien sabido que en algunos casos los modos superiores pueden tener un impacto importante en la respuesta estructural de edificios altos. Por lo tanto, es de interés evaluar el efecto que los modos superiores tienen en la respuesta no lineal de los modelos considerados. Con ello se podrá comprobar si la premisa de análisis realizada por Godínez (2010) es válida o no para realizar la propuesta de parámetros globales de diseño para edificios altos con marcos contraventeados. Para este fin, se comparan los resultados de un modelo de 24 niveles, con mayor susceptibilidad al efecto de los modos superiores que los

modelos de menor altura, realizando análisis estáticos no lineales ante cargas monótonas crecientes basados en distribuciones de cargas laterales asociadas al modo fundamental de vibración, respecto a los obtenidos al considerar la contribución en la respuesta de un número mayor de modos de vibrar (“modal pushover”), procediendo conforme a lo actualmente descrito en la literatura especializada (Chopra y Goel 2001 y 2002, Goel y Chopra 2004). Con base en los resultados obtenidos, es posible concluir que existe un impacto poco significativo de los modos superiores en la respuesta no lineal de los modelos estudiados, por lo que la obtención de parámetros de diseño globales, tales como la capacidad de deformación inelástica y factores de reducción por sobrerresistencia, con base en las curvas cortante-distorsión calculadas a partir de la respuesta del modo fundamental de vibración en el sistema estructural considerado, tal y como se realizó en el estudio de referencia, resulta adecuado para los modelos considerados, en que la masa modal asociada al modo fundamental de vibración es, en general, superior al 70%.

2. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN DE REFERENCIA Y OBJETIVO DEL ESTUDIO

Los resultados reportados en este artículo representan una parte puntual de la primera etapa de una investigación integral, enfocada tanto a la obtención de parámetros específicos para el diseño de marcos dúctiles de concreto reforzado con contraventeo metálico tipo chevrón, como en la evaluación de una metodología de diseño por capacidad adaptada de los lineamientos de las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal vigente (RCDF-04). Para tal fin, primeramente se diseñaron marcos con contraventeo tipo chevrón de 4, 8, 12, 16, 20 y 24 niveles, considerando tres diferentes balances de rigidez y/o resistencia entre el sistema de contraventeo y las columnas del marco. Como se comentó, la metodología de diseño, así como los parámetros de diseño propuestos con base en los resultados de los análisis estáticos no lineales, se describen con detalle en Godínez (2010), Godínez-Domínguez y Tena-Colunga (2010) y Godínez y Tena (2011).

Congruente con la investigación de referencia, para identificar los distintos diseños, se utilizó la siguiente nomenclatura general para los modelos: $Ndpp$, donde N indica el número de niveles del marco, d indica la dirección de análisis (X o Y) conforme a la planta de los modelos (figura 1a), y los últimos dos caracteres (pp) indican el porcentaje de fuerza cortante que toman las columnas del marco. Por ejemplo, el modelo 24x75, empleado posteriormente para estudiar el efecto que los modos superiores tienen en su respuesta no lineal, identifica el diseño de un marco de 24 niveles en la dirección X de la planta de la figura 1a, donde las columnas aportan aproximadamente el 75% de la resistencia a fuerza cortante en el entrepiso.

Posteriormente, con los resultados obtenidos de los diseños de los marcos, se realizaron análisis no lineales ante cargas monótonas crecientes (“pushover”), para los cuales se empleó el programa DRAIN-2DX (Prakash *et al.* 1992). Por simplicidad, en todos los análisis se empleó el vector de cargas correspondiente al primer modo de vibración. Lo anterior se realizó para contar

con un marco de comparación, tomando en cuenta que: (a) los modelos en estudio están en el intervalo de los cuatro a los 24 niveles, (b) la masa modal asociada al modo fundamental de vibración es, en general, superior al 70% en el caso de los modelos con comportamiento dúctil (tabla 1) y, (c) los sistemas estudiados tienen una rigidez lateral importante, por lo que inicialmente se consideró que el efecto de los modos superiores no tiene impacto significativo en la respuesta estructural.

Para evaluar la validez de dicha premisa; es decir, evaluar el efecto que los modos superiores tienen en la respuesta del sistema estructural estudiado, se comparan los resultados de análisis no lineales ante carga monótona creciente, basados en distribuciones de cargas laterales asociadas al modo fundamental de vibración, respecto a los obtenidos al considerar la contribución en la respuesta de un número mayor de modos de vibrar (“modal pushover”), procediendo conforme lo actualmente descrito en la literatura especializada (Chopra y Goel 2001 y 2002, Goel y Chopra 2004), para uno de los modelos en que se considera el efecto de los modos superiores puede afectar su respuesta estructural (modelo de 24 niveles).

La importancia de lo anterior, como se comentó, radica en que algunos de los parámetros obtenidos de los análisis no lineales basados en distribuciones de cargas laterales asociadas al modo fundamental de vibración, tales como factores de reducción por sobrerresistencia (R), capacidades de deformación inelástica (μ) y distorsiones de diseño asociadas a diferentes estados límite, fueron estimados con base en las curvas globales de comportamiento (cortante basal vs desplazamiento de azotea), basados en las capacidades de deformación última de los elementos sismorresistentes (diagonales de contraventeo, vigas y columnas), como se comenta con detalle en Godínez (2010) y Godínez y Tena (2011).

Si se hubiese optado por el empleo de análisis en que se considera el aporte de los modos superiores de vibración (“modal pushover”), no sería posible obtener curvas cortante basal vs distorsión globales que consideren la contribución a la respuesta de todos los modos, sino curvas asociadas a cada modo particular. Asimismo, no sería posible definir la capacidad de deformación última del sistema con base en las rotaciones plásticas acumuladas (o en el caso de los contravientos, acortamientos y extensiones) calculadas para cada modo particular en cada elemento, pues no pueden sumarse directamente al corresponder estas curvas para periodos o frecuencias distintas, tal y como se comenta en Chopra y Goel (2002) y Goel y Chopra (2004).

Tabla 1. Casos de estudio y características dinámicas de los modelos (Godínez 2010)

Modelo	Caso de estudio *	H/L	T (seg)	Masa modal I (%)	Modelo	Caso de estudio *	H/L	T (seg)	Masa modal I (%)
---------------	--------------------------	------------	----------------	-------------------------	---------------	--------------------------	------------	----------------	-------------------------

4x25	I	0.43	0.231	86.42	16x25	I	1.70	1.147	70.74
4x50	II	0.43	0.309	85.66	16x50	II	1.70	1.164	72.18
4x75	III	0.43	0.310	83.88	16x75	III	1.70	1.102	72.99
4y25	I	0.65	0.203	85.93	16y25	I	2.59	1.139	70.74
4y50	II	0.65	0.282	85.73	16y50	II	2.59	1.105	71.46
4y75	III	0.65	0.277	84.37	16y75	III	2.59	1.067	73.10
8x25	I	0.85	0.514	77.92	20x25	I	2.13	1.396	68.44
8x50	II	0.85	0.604	79.00	20x50	II	2.13	1.386	73.00
8x75	III	0.85	0.543	78.38	20x75	III	2.13	1.300	72.59
8y25	I	1.30	0.525	77.64	20y25	I	3.24	1.409	68.69
8y50	II	1.30	0.570	78.23	20y50	II	3.24	1.340	71.49
8y75	III	1.30	0.509	78.22	20y75	III	3.24	1.281	72.55
12x25	I	1.28	0.864	73.79	24x25	I	2.55	1.774	68.03
12x50	II	1.28	0.880	74.85	24x50	II	2.55	1.611	72.75
12x75	III	1.28	0.786	75.54	24x75	III	2.55	1.573	72.43
12y25	I	1.94	0.810	73.08	24y25	I	3.89	1.767	67.29
12y50	II	1.94	0.822	74.41	24y50	II	3.89	1.718	70.97
12y75	III	1.94	0.743	74.95	24y75	III	3.89	1.644	71.01

*** Casos de estudio:**

Caso I. Cuando las columnas de los marcos resisten un porcentaje menor al 50% de la carga sísmica actuante (aproximadamente 25%), lo cual no está permitido en las NTCS-04 para comportamiento dúctil.

Caso II. Cuando la condición estipulada en las NTCS-04 para comportamiento dúctil se cumple al límite, es decir, el 50% de la carga actuante es resistida por las columnas de los marcos y el 50% por los contravientos.

Caso III. Cuando un porcentaje mayor de carga lateral es resistida por las columnas de los marcos (aproximadamente 75%).

Por lo anterior, a pesar de que el método de análisis en que se considera el efecto de modos superiores es una buena opción para el diseño de estructuras específicas en que se desee tomar en consideración el efecto mencionado, tal y como se comenta en la literatura especializada, no es aún un método óptimo para la determinación de parámetros de diseño globales al considerar un inventario de estructuras amplio, tal y como ocurre en la investigación de referencia. Por lo tanto, el estudio realizado por Godínez (2010) tiene una limitante: los parámetros de diseño y las capacidades de deformación inelástica se determinaron con base en análisis no lineales estáticos al considerar un patrón de cargas basado en el modo fundamental de vibración. Sin embargo, ésta no es una limitante mayor a las que se reportan en varios estudios en que se determinan, por ejemplo, valores de los factores de reducción de fuerzas sísmicas R_{μ} (Q') con base en estadísticas de las respuestas dinámicas de sistemas de un grado de libertad con comportamiento histerético elastoplástico perfecto, en vez de emplear sistemas de varios grados de libertad con comportamiento histerético representativo del sistema estructural en estudio.

Por lo expuesto, el objetivo de este estudio radica en determinar el efecto que los modos superiores tienen en la respuesta no lineal de marcos dúctiles de concreto reforzado con contraventeo metálico convencional tipo chevrón, en particular, centrándose en la estimación de las distorsiones de

entrepiso. Lo anterior permitirá valorar si la metodología empleada por Godínez (2010) para determinar parámetros de diseño globales es adecuada o no.

3. EFECTO DE LOS MODOS SUPERIORES EN LA RESPUESTA NO LINEAL DE MARCOS DÚCTILES DE CONCRETO CONTRAVENTADOS

3.1. Descripción de los modelos de análisis

Los marcos analizados en el estudio de referencia corresponden a una estructura regular tridimensional con uso supuesto para albergar oficinas. El edificio cuenta con una planta rectangular de 21 m de ancho (dirección Y) y 32 m de largo (dirección X), en la que los marcos periféricos se encuentran contraventados en sus crujías exteriores. El edificio cuenta con cuatro crujías en la dirección X y tres en la dirección Y con claros de 8 m y 7 m respectivamente (figura 1). En la dirección X existen vigas secundarias. La altura típica de entrepiso es de 3.40 m. Por lo tanto, las alturas totales de los modelos de 4, 8, 16, 20 y 24 niveles son 13.6, 27.2, 40.8, 54.4, 68.0 y 81.6 m respectivamente.

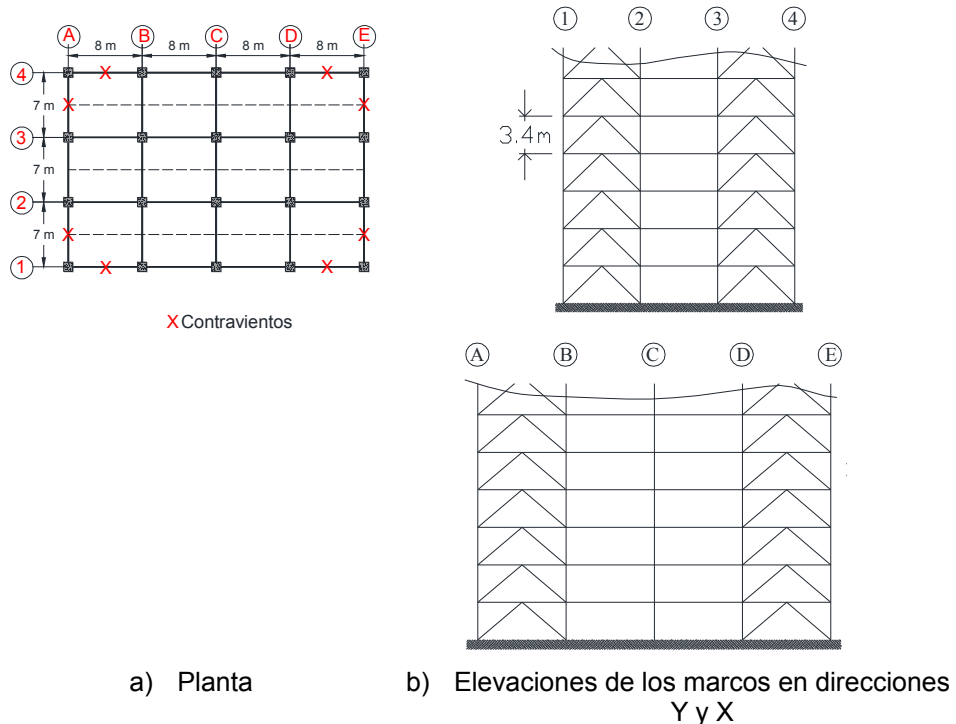


Figura 1. Planta y elevaciones de los modelos estudiados por Godínez (2010)

3.2. Evaluación del efecto de los modos superiores en la respuesta estructural

En esta sección se presenta la comparativa de la respuesta no lineal de uno de los modelos de mayor altura considerados en el estudio de referencia (modelo 24x75, fig. 2), en el cual los efectos de los modos superiores pudieran tener mayor impacto respecto a los modelos de menor altura (tabla 1). En la figura 2 se muestran también, esquemáticamente, las acciones consideradas para el análisis del modelo 24x75.

En la figura 3 se muestran las componentes de las formas modales normalizadas del modelo 24x75. Asimismo, en la tabla 2 se resumen las propiedades dinámicas y cantidades que, de acuerdo con Chopra y Goel (2002) y Goel y Chopra (2004), deben considerarse para realizar el llamado "pushover modal". Debe notarse que para el desarrollo del procedimiento se emplea el espectro de diseño de la zona de estudio (zona III_b según las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo-04 de México) y no un análisis equivalente de un sistema de un grado de libertad asociado a un acelerograma específico.

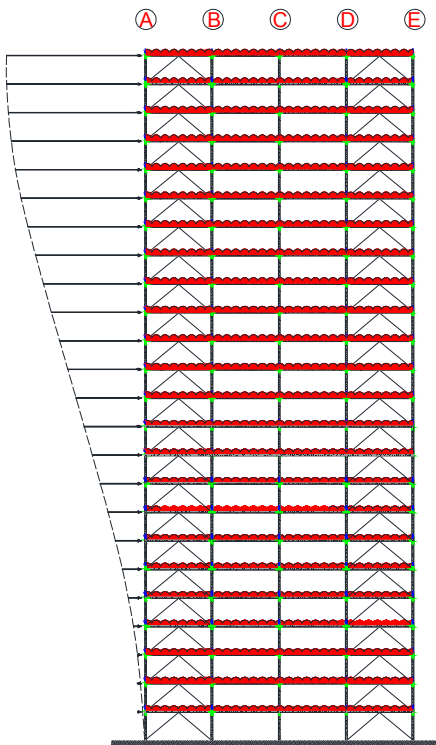


Figura 2. Configuración y cargas del modelo 24x75

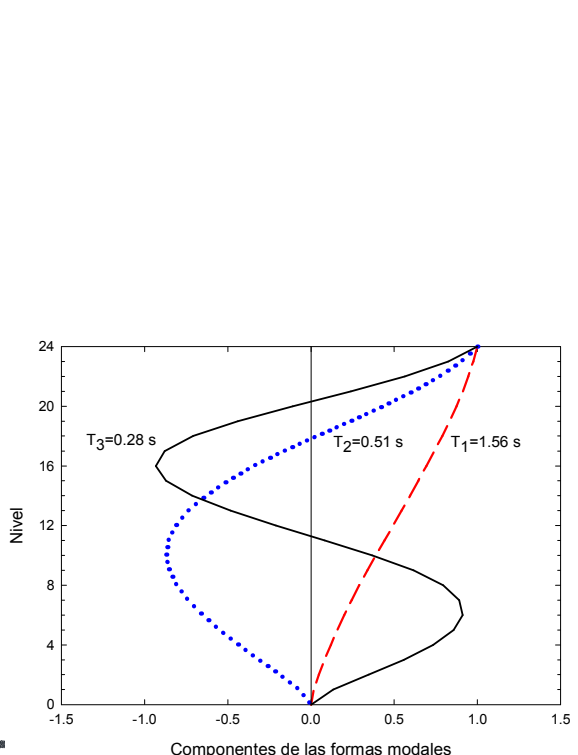


Figura 3. Componentes de los primeros tres modos de vibrar

Tabla 2. Parámetros asociados a cada modo

<i>Modo 1</i>	<i>Modo 2</i>	<i>Modo 3</i>
---------------	---------------	---------------

$\Phi_1^T M / \Phi_1^T M \Phi_1$	4702.5570	298.5996	92.3795
\mathcal{Y}_1	0.024195	-0.043310	0.043815
\mathcal{Y}_{m1}	2.752876	0.560177	0.177345
$\mathcal{Y}_{m1} / M_{tot} (\%)$	72.428840	14.738410	4.665981
$D_n (cm)$	27.361150	2.947530	0.895440
$U_{rno} (cm)$	38.735340	1.808960	0.294669

En la figura 4 se muestran las distribuciones de fuerzas modales obtenidas con base en lo especificado previamente. Dichas distribuciones de fuerzas se emplearon para realizar los análisis estáticos no lineales modales.

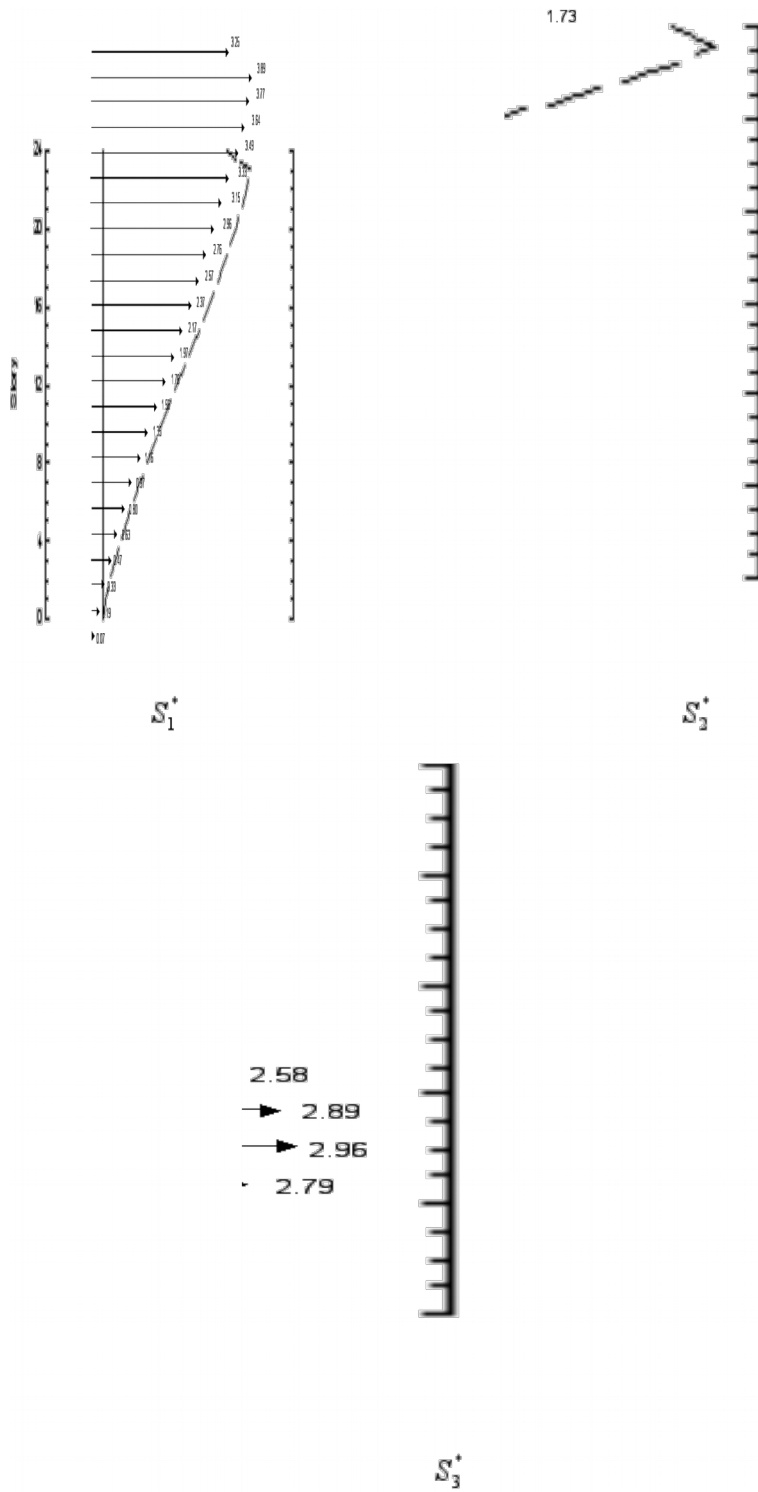


Figura 4. Distribuciones de fuerzas $S_n^* = m\varphi_n$

4. RESULTADOS

En la figura 5 se muestran las curvas cortante normalizado respecto al peso (V/W) contra distorsión promedio (definida con base en el desplazamiento de azotea) calculadas para cada modo, de acuerdo a lo especificado en la figura 4. En dichas curvas se identifica, mediante un círculo lleno, el desplazamiento que debería considerarse para cada modo, conforme a lo propuesto por Chopra y Goel (2002).

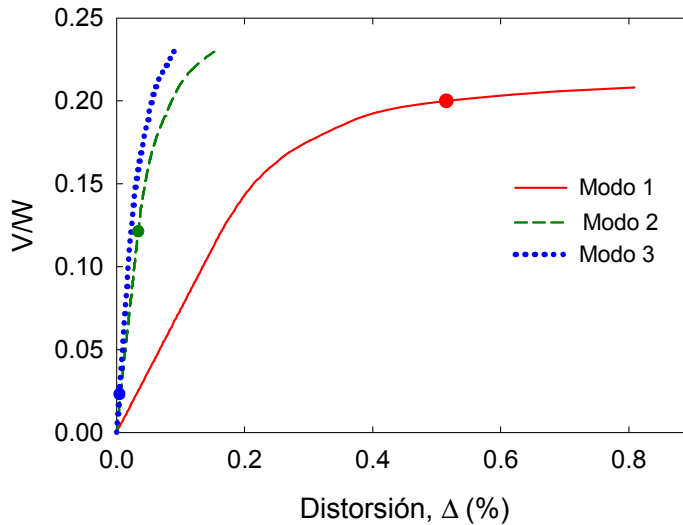


Figura 5. Curvas cortante-distorsión calculadas para cada modo

Asimismo, en la figura 6 se muestran las envolventes de distorsiones de entrepiso calculadas considerando en la respuesta estructural: (a) únicamente el modo fundamental, (b) los primeros dos modos de vibrar y, (c) los primeros tres modos de vibrar. En los casos (b) y (c) se empleó la regla de combinación basada en la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS por sus siglas en inglés). Como se observa de la figura 6, las diferencias obtenidas al emplear únicamente el modo fundamental respecto a los dos casos adicionales, en que se consideran dos y tres modos respectivamente, son poco significativas, aún en el caso de los pisos superiores, donde las diferencias son obviamente mayores. De hecho, las distorsiones máximas de entrepiso observadas (séptimo entrepiso) no presentan discrepancias significativas desde un punto de vista práctico.

Lo anterior justifica y respalda la determinación de parámetros de diseño globales, tales como la capacidad de deformación inelástica y factores de reducción por sobrerresistencia, con base en las curvas cortante-distorsión calculadas a partir de la respuesta del modo fundamental de vibración en marcos dúctiles de concreto reforzado con contraventeo convencional tipo chevrón.

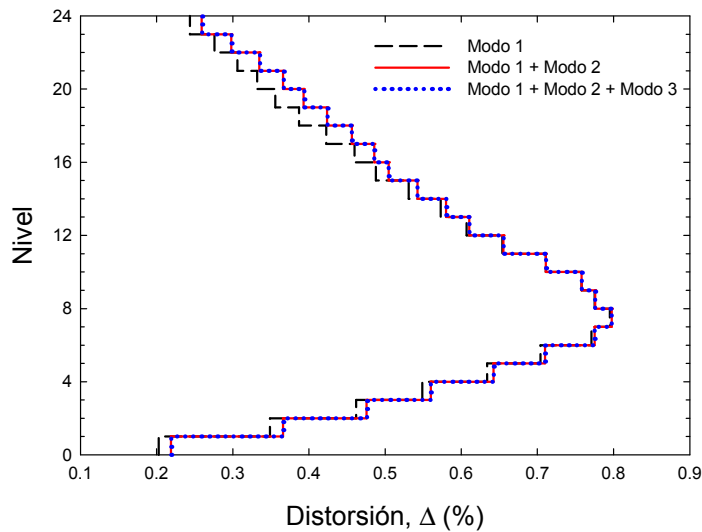


Figura 6. Envolventes de distorsiones de entrepiso calculadas al considerar: (a) únicamente el modo fundamental, (b) los primeros dos modos de vibrar y, (c) los primeros tres modos de vibrar

5. CONCLUSIONES

Se presenta un estudio en que se evalúa el efecto que los modos superiores tienen en la respuesta no lineal de marcos dúctiles de concreto reforzado con contraventeo metálico convencional tipo chevrón, de entre cuatro y 24 niveles, ubicados en la zona del lago del Distrito Federal. Para este fin, se comparan los resultados de un modelo de 24 niveles (con mayor susceptibilidad a dicho efecto), realizando análisis estáticos no lineales ante cargas monótonas crecientes, basados en distribuciones de cargas laterales asociadas al modo fundamental de vibración, respecto a los obtenidos al considerar la contribución en la respuesta de un número mayor de modos de vibrar. Con base en los resultados expuestos, es posible concluir que existe un impacto poco significativo de los modos superiores en la respuesta no lineal de los modelos estudiados. Por lo tanto, la obtención de parámetros de diseño globales, tales como la capacidad de deformación inelástica y factores de reducción por sobrerresistencia, con base en las curvas cortante-distorsión calculadas a partir de la respuesta del modo fundamental de vibración en el sistema estructural considerado, resulta adecuado para los modelos considerados en el estudio de referencia, en que la masa modal asociada al modo fundamental de vibración es, en general, superior al 70%.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la beca otorgada al primer autor por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (Conacyt) para sus estudios de doctorado.

REFERENCIAS

1. Chopra, A. K. y R. K. Goel (2001), "A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for buildings: Theory and preliminary evaluation", *Reporte No. PEER 2001-03*, Pacific Earthquake Engineering Research Center.
2. Chopra, A. K. y R. K. Goel (2002), "A modal pushover analysis for estimating seismic demands of buildings", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, pp. 561-582.
3. Godínez-Domínguez, E. A. y A. Tena-Colunga (2010), "Nonlinear behavior of code-designed reinforced concrete concentric braced frames under lateral loading", *Engineering Structures*, Vol. 32, pp. 944-963.
4. Godínez, E. A. (2010), "Estudio del comportamiento de marcos dúctiles de concreto reforzado con contraventeo chevrón", **Tesis de Doctorado**, Posgrado en Ingeniería Estructural, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana, julio.
5. Godínez, E. A. y A. Tena (2011), "Comportamiento no lineal de marcos dúctiles de concreto reforzado con contraventeo metálico chevrón. Propuesta de diseño", *Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS*, No. 85, pp. 61-102.
6. Goel, R. K. y A. K. Chopra (2004), "Evaluation of modal and FEMA pushover analyses: SAC Buildings", *Earthquake Spectra*, Vol. 20, No. 1, pp. 225-254.
7. NTCS-04 (2004), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo", *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, Tomo II, No. 103-BIS, octubre.
8. Prakash, V., G. H. Powell y Phillipou (1992), "DRAIN-2DX: base program user guide", *Report No. UBC/SEMM-92/29*, Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley.
9. RCDF-04 (2004), "Reglamento de Construcciones del Departamento del Distrito Federal", *Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal*, octubre.