

FACTORES DE REDUCCIÓN POR SOBRERRESISTENCIA PARA MARCOS DÚCTILES DE CONCRETO REFORZADO CON CONTRAVENTEEO METÁLICO TIPO CHEVRÓN

OVERSTRENGTH REDUCTION FACTORS FOR DUCTILE STEEL CHEVRON-BRACED RC FRAMES STRUCTURES

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 propone una expresión para la determinación de factores de reducción por sobrerresistencia para marcos dúctiles de concreto reforzado con contraventeo metálico tipo chevrón susceptible a pandeo con base en los resultados de análisis estáticos no lineales. Los marcos estudiados se encuentran en el intervalo de los 4 a 24 niveles y se ubicaron para su diseño en la zona del lago de la Ciudad de México. Para el diseño de todos los modelos se empleó una metodología de diseño por capacidad. De los resultados obtenidos, es posible concluir que la propuesta actual de las Normas Técnicas para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal para estimar los factores de sobrerresistencia debería modificarse y ser dependiente del sistema estructural, como se propone actualmente en algunos códigos de reconocido prestigio internacional.

Palabras clave: Sobrerresistencia; contravientos de acero; marcos de concreto; diseño sismorresistente

ABSTRACT

In this paper the authors summarize the results of a study devoted to propose an equation to assess the overstrength reduction factors of low to medium rise ductile moment-resisting reinforced concrete concentric braced

frames structures (RC-MRCBFs) based on the results from nonlinear static analyses. Studied RC-MRCBFs frame models ranged from 4 to 24 stories and were assumed to be located in soft soil conditions in Mexico City. A capacity design methodology was used for the design of all models. From the results obtained in this study it is possible to conclude that overstrength reduction factors currently proposed in seismic provisions of Mexico's Federal District Code should be modified in order to take into account the specific structural system under consideration, as it is currently proposed in some international building codes.

Keywords: Overstrength; ductile RC frames; steel bracing; seismic design.

1 INTRODUCCIÓN

En general, las estructuras cuentan con reservas de resistencia debidas a diversos factores, dentro de las cuales se encuentran la redundancia o la sobrerresistencia local de algunos elementos. Algunos requisitos especificados por los reglamentos de diseño, como el empleo de áreas de acero mínimo, factores de reducción de resistencia, metodologías empleadas para evaluar resistencias, efectos debidos a las cargas verticales, o consideraciones relacionadas con aspectos constructivos, como el uso de secciones tipo, pueden inducir niveles de sobrerresistencia considerables (Miranda y Bertero 1994, Ordaz *et al.* 2003, Tena-Colunga y Cortés-Benitez 2015). Además de lo anterior, debe considerarse que la sobrerresistencia desarrollada por distintos edificios durante eventos sísmicos puede no ser constante, aún para edificios con diseños semejantes y construidos en la misma zona, incluso por el mismo diseñador (Tena-Colunga *et al.* 2005).

La sobrerresistencia depende, además, de factores tales como (Park y Paulay 1978): a) relaciones esfuerzo-deformación del concreto y el acero de refuerzo, b) dimensión de los elementos, c) niveles de esfuerzo axial y, d) magnitud de la carga. Otros factores de importancia pueden ser: e) el confinamiento del núcleo de concreto, f) la participación del refuerzo de la losa a la resistencia a flexión de las vigas y, g) la participación de los elementos no estructurales que no son correctamente desligados del sistema. En particular, la participación de los elementos no estructurales puede llegar a ser de mucha importancia en estructuras existentes, especialmente cuando existen muros de mampostería no desligados propiamente del sistema estructural.

Durante varios años se han desarrollado estudios enfocados a la determinación de factores de reducción por sobrerresistencia en marcos de concreto reforzado, con y sin contravientos, empleando tanto análisis estáticos como dinámicos no lineales (Mitchell y Paultre 1994, Elnashai y Mwafy 2002, Maheri y Akbari 2003, Tena-Colunga *et al.* 2008, Godínez-Domínguez y Tena-Colunga 2010, Godínez-Domínguez *et al.* 2012, Godínez-Domínguez 2014, Godínez-Domínguez y Tena-Colunga 2016). Maheri y Akbari (2003) realizaron estudios sobre la variación de factores por sobrerresistencia en marcos de concreto con contraventeo metálico en configuraciones X y K, encontrando una dependencia de dichos factores con la configuración del sistema de contraventeo empleado y la altura de los modelos. Ellos indican que para marcos con contraventeo en X, entre mayor sea el aporte del sistema de

contraventeo para resistir cargas laterales, los valores del factor de sobrerresistencia decrecen en modelos de baja altura (cuatro niveles). Sin embargo, esto no ocurre en modelos de altura media (12 niveles), ni cuando se consideran sistema de contraventeo con configuraciones en K. Posteriormente, Godínez-Domínguez y Tena-Colunga (2010) y Godínez-Domínguez *et al.* (2012) estudiaron con profundidad diferentes aspectos relacionados con el diseño sísmico a nivel local y global de sistemas estructurales con base en marcos dúctiles de concreto reforzado con contravientos metálicos susceptibles a pandeo dispuestos en configuración chevrón (V invertida). Propusieron y evaluaron con éxito una metodología para el diseño de estos sistemas duales empleando conceptos de capacidad, así como parámetros de diseño específicos con base en resultados de análisis estáticos y dinámicos no lineales.

En este artículo se presenta una propuesta para la determinación de factores de sobrerresistencia en marcos dúctiles de concreto reforzado con contravientos metálicos susceptibles a pandeo dispuestos en configuración chevrón. Asimismo, se muestra la relación de dichos factores con la relación de esbeltez (H/L), considerando dos diferentes hipótesis para la determinación de resistencias en los elementos estructurales. Finalmente, los resultados obtenidos se comparan con las propuestas del Apéndice A de las Normas Técnicas Complementarias para diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (NTCS-04 2004), y del Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (MOC-08 2009, MOC-15 2015).

2 PROPUESTAS NORMATIVAS EN MÉXICO

Actualmente, tanto en el Apéndice A de las Normas Técnicas Complementarias para diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (NTCS-04 2004) como en el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (MOC-08 2008, MOC-15 2015), los factores por sobrerresistencia se toman directamente en cuenta para reducir el espectro de diseño elástico (Ordaz *et al.* 2003, Tena-Colunga *et al.* 2009). Lo anterior, tiene como finalidad transparentar el proceso de diseño sísmico, tomando en forma explícita, mediante factores específicos, efectos relevantes en el comportamiento sísmico de sistemas estructurales, tales como: la capacidad de deformación inelástica, la redundancia, el comportamiento cíclico del material y, la sobrerresistencia.

De acuerdo con el Apéndice A de las NTCS-04 (NTCS-2004), el factor de reducción por sobrerresistencia, que en las normas de México se denomina con la letra R , se calcula con base en la ecuación 1, donde R es el factor de reducción por sobrerresistencia, T es el periodo natural de la estructura y, T_a es el periodo que define el inicio de la meseta del espectro de diseño.

$$R = \begin{cases} \frac{10}{4 + \sqrt{T/T_a}} & \text{si } T \leq T_a \\ 2 & \text{si } T > T_a \end{cases} \quad (1)$$

Debe notarse que, por simplicidad, en la propuesta del Apéndice A de las NTCS-04 se considera un factor de reducción por sobrerresistencia constante $R=2$ para estructuras con periodos naturales mayores a T_a , e igual a R_0 en las propuestas del MOC (MOC-08 2008 y MOC-15 2015). Como comentan Ordaz *et al.* (2003), no existen en realidad bases teóricas o empíricas para explicar una variación de R como la que se presenta en la ecuación 1. Dicha forma funcional fue elegida ya que conduce a resistencias necesarias del orden de las que se obtienen en las actuales NTCS-04 para $Q=3$ y $Q=4$ y además porque conduce a formas espectrales razonables. En las normas de México, Q es el factor de comportamiento sísmico (relacionado con la capacidad de deformación inelástica del sistema estructural, por ejemplo, Godínez-Domínguez y Tena-Colunga 2010).

Por otro lado, en las propuestas del MOC-08 (ecuación 2) y el MOC-15 (ecuación 3), a diferencia de la propuesta de las NTCS-04 (ecuación 1), se reconoce de forma explícita la dependencia de los factores R en función del sistema estructural.

$$R = \begin{cases} R_0 + 0.5(1 - \sqrt{T/T_a}) & \text{si } T \leq T_a \\ R_0; & \text{si } T > T_a \end{cases} \quad (2)$$

$$R = \begin{cases} R_0 + 1 - \sqrt{T/T_a} & \text{si } T \leq T_a \\ R_0; & \text{si } T > T_a \end{cases} \quad (3)$$

Con base en resultados recientes, en la nueva propuesta del MOC-15 se considera una pendiente mayor de la curva propuesta respecto a la indicada en el MOC-08 (fig. 1). Como se observa de la figura 1, en la propuesta del MOC se reconoce explícitamente la dependencia de los factores R en función del sistema estructural en estudio mediante el uso de un factor denominado sobrerresistencia índice ($R_0=2.0, 2.5, 3.0$), estrategia que parece adecuada, conforme se indica en secciones posteriores. En la figura 1 se consideró un $R_0=3.0$, que corresponde a sistemas duales dúctiles diseñadas con $Q=4$, como los estudiados en este artículo. Asimismo, para mostrar el efecto de la sobrerresistencia índice, se muestra la curva correspondiente a $R_0=2.5$.

De lo comentado en las dos secciones precedentes, resulta clara la importancia de realizar una adecuada estimación de los factores de reducción por sobrerresistencia en función del sistema estructural en consideración, tal y como se estipula en los reglamentos internacionales modernos (por ejemplo, MOC-08 2008, MOC-15 2015, ASCE 7-10 2010), así como su correspondiente comparativa con las principales propuestas normativas existentes en México.

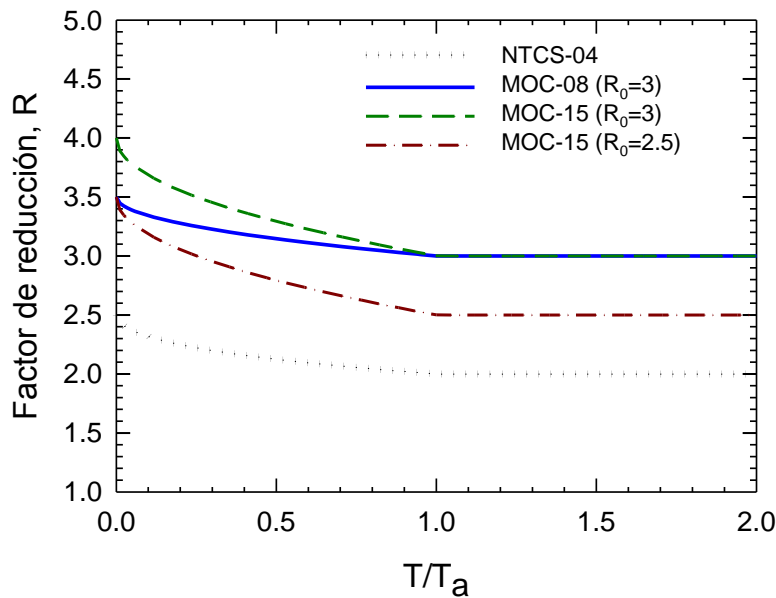


Figura 1 Propuesta de las NTCS y el MOC para la determinación de factores de reducción por sobrerresistencia (R)

3 METODOLOGÍA

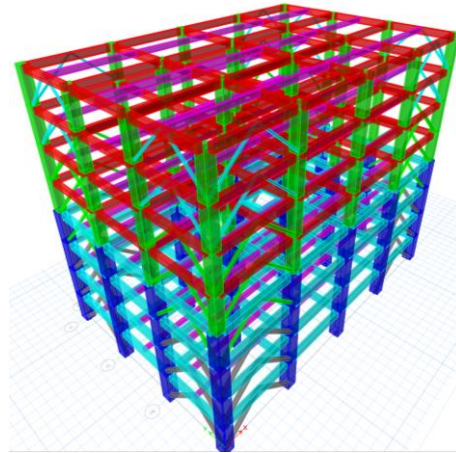
3.1 Características de los modelos estudiados

En la figura 2 se muestran los modelos considerados en la determinación de los factores de reducción por sobrerresistencia, cuyas alturas (4 a 24 niveles) representan estructuras típicas de oficinas en México. En el isométrico se indica, mediante colores, la forma general en que se fueron variando las secciones transversales (y acero de refuerzo) de los elementos estructurales. Se muestran también, esquemáticamente, las acciones consideradas para el análisis de los modelos. Se consideró un altura típica de entrepiso de 3.40 m.

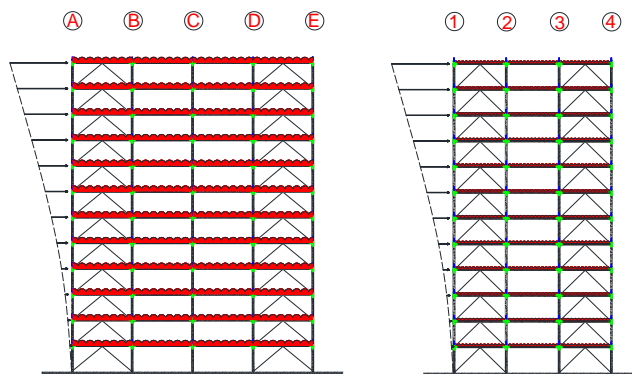
La gama de alturas estudiada permite obtener resultados representativos para un intervalo de periodos amplio, lo cual es deseable para un mejor entendimiento del comportamiento estructural conforme se incrementa la altura de los marcos y valorar cómo impacta la esbeltez (H/L) en los factores de reducción por sobrerresistencia (R).

De acuerdo con las normas de diseño por sismo de México (NTCS-04 2004), para el diseño de sistemas dúctiles, como los considerados en este estudio, en que se emplea un factor de comportamiento sísmico $Q=4$ (asociado con la capacidad de deformación global del sistema estructural), en cada entrepiso los marcos deben ser capaces de resistir, sin contar con contravientos, cuando menos el 50 por ciento de la fuerza sísmica actuante. Debido a lo anterior, y a que el comportamiento estructural de los sistemas duales está altamente influenciado por la resistencia relativa a cortante de sus componentes (Maheri y

Akbari 2003, Godínez-Domínguez y Tena-Colunga 2010, Tong *et al.* 2012), se estudiaron variantes en que el 25%, 50% y 75% de la carga lateral es resistida por las columnas de los marcos.



a) Isométrico (misma geometría para todas las elevaciones)



b) Elevaciones y cargas de los modelos en dirección X e Y

Figura 2 Geometría y cargas de los sistemas duales en estudio

3.2 Consideraciones de análisis y diseño

Las estructuras en consideración se ubicaron para su diseño en una de las zonas con mayor peligro sísmico de la Ciudad de México (zona III-b del lago). Se consideró el factor de comportamiento sísmico más alto permitido en las Normas de diseño sísmico de México para el sistema en consideración $Q=4$.

El análisis estructural se realizó empleando el software SAP2000 (SAP200 2009). Se consideró el aporte de la losa tanto en rigidez como en resistencia, y para el modelado de las uniones viga-columna, como es práctica común en los despachos de cálculo estructural y recomendado en la literatura especializada (Horvilleur y Cheema 1994, Tena 2007), se consideró que su rigidez es 50% de la que tendrían si fueran infinitamente rígidas a flexión.

Con la finalidad de fomentar mecanismos de colapso estables y consistentes, se empleó una metodología de diseño por capacidad en que los elementos se diseñan conforme a la secuencia de formación del mecanismo de colapso esperado, es decir, en primera instancia se diseña el sistema de contraventeo, posteriormente se diseñan las vigas y columnas, y finalmente, se revisa la integridad de los uniones viga-columna (Godínez-Domínguez y Tena-Colunga 2010 y 2011).

Cada uno de los diseños realizados se identifica fácilmente conforme a la siguiente nomenclatura: $Ndpp$, donde N indica el número de niveles del marco, d indica la dirección de análisis (X o Y) conforme al isométrico de la figura 2a, y los últimos dos caracteres (pp) indican el porcentaje de fuerza cortante que toman las columnas del marco.

En la figura 3 se muestra la variación de los periodos fundamentales de vibrar de cada modelo. El valor sobre cada barra indica la masa asociada al primer modo de vibrar (prácticamente en todos los casos mayor al 70%).

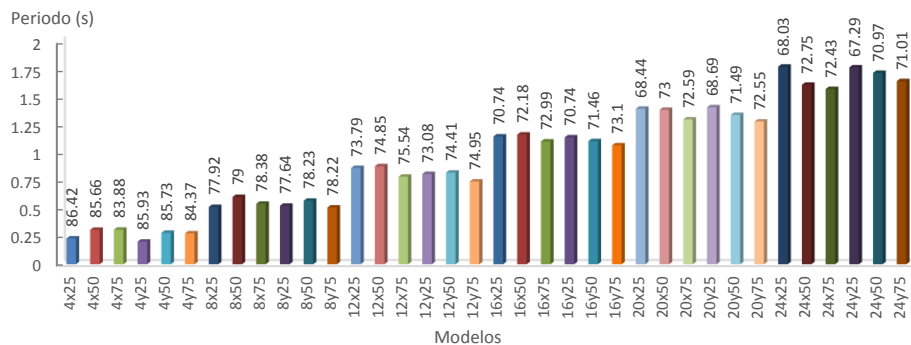


Figura 3 Variación de los periodos fundamentales de vibrar y masas asociadas al primer modo de vibrar

4 RESULTADOS

4.1 Factores de reducción por sobrerresistencia (R)

Para realizar la estimación de los factores de reducción por sobrerresistencia (R) se obtuvieron curvas bilineales idealizadas (Newmark y Hall 1982, FEMA-273 1997) a partir de las curvas de capacidad globales de cada modelo. Con la finalidad de contar con resultados numéricos congruentes con las secciones transversales y su correspondiente acero de refuerzo propuestos en cada diseño, las curvas de capacidad obtenidas empleando el programa DRAIN-2DX (Prakash *et al.* 1992) se limitaron en función de la capacidad de rotación máxima de los elementos estructurales, así como de las longitudes de pandeo calculadas para los contravientos.

Con la finalidad de comparar los factores de reducción por sobrerresistencia propuestos en el Apéndice A de las NTCS-04 (NTCS-04 2004) definidos por la

ec. 1, con los calculados en este estudio, en la figura 4 se presentan dichas comparaciones, tanto para los casos en que se consideran resistencias nominales (V_{nom}/V_{dis}), como al considerar efectos de sobrerresistencia (V_{sr}/V_{dis}). Los periodos se normalizaron respecto al periodo característico T_a considerado. Los criterios empleados para el cálculo de las resistencias se describen con detalle en Godínez-Domínguez y Tena-Colunga (2010). En la figura 4 se incluyen también las curvas descritas por las ecuaciones 2 y 3, correspondientes a las propuestas del MOC-08 (MOC-08 2009) y el MOC-15 (MOC-15 2015).

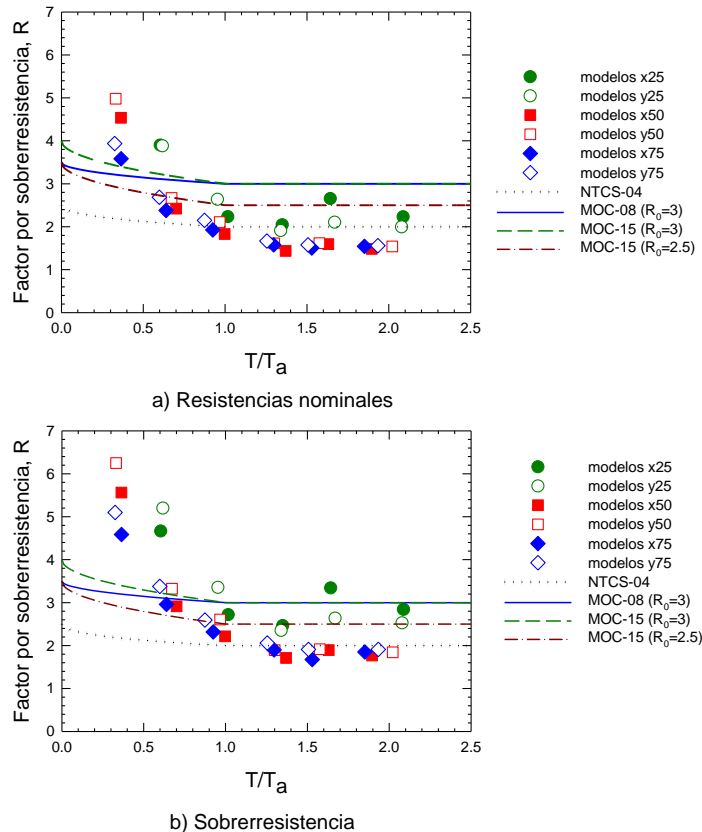


Figura 4 Comparativa de los factores R estimados contra las diferentes propuestas normativas

De los resultados expuestos en la figura 4, se hacen las siguientes observaciones:

- (1) Los marcos con periodos naturales bajos (modelos de cuatro niveles) presentan niveles de sobrerresistencia mayores que los propuestos en el Apéndice A de las NTCS-04. Este efecto se debe, en parte, al incremento en la resistencia lateral derivado del diseño por cargas verticales, pues se sabe que la sobrerresistencia por efecto de las cargas verticales impacta en mayor medida a estructuras bajas que a estructuras altas.

- (2) Se observa una relación entre los valores estimados de R y el porcentaje que las columnas aportan al cortante resistente de entrepiso. A medida que crece el porcentaje de resistencia lateral aportado por las columnas del marco, los factores de reducción por sobrerresistencia (R) decrecen. Este efecto es más notorio en los modelos de baja altura (cuatro niveles) que en el resto de los modelos.
- (3) Como se esperaba, para los casos en que se consideraron efectos adicionales de sobrerresistencia, se observan factores R superiores a los obtenidos al considerar resistencias nominales. Como se comentó en las hipótesis para el cálculo de resistencias, al considerar efectos de sobrerresistencia, la losa se consideró tanto en el cálculo de rigideces como de resistencias; en tanto para el caso nominal se consideraron secciones rectangulares. Es importante mencionar que la forma en que se estima el ancho efectivo de la losa para el cálculo de las rigideces en las NTCS-04 (NTCS-04 2004) o el Reglamento ACI-318-14 (ACI-318-14 2014), puede brindar valores que sobreestimen dichas rigideces.
- (4) En general, se observan diferencias entre los valores estimados con base en la curva global de comportamiento y los propuestos en el Apéndice A de las NTCS-04 (AA) y el MOC, especialmente en los modelos con resistencias nominales en que las columnas del marco resisten menos del 50% de la carga lateral. Estas diferencias son mayores para los modelos de altura baja (cuatro niveles) que para los modelos más altos. Para los modelos en que se consideran efectos de sobrerresistencia, los valores calculados y los propuestos en el AA presentan diferencias menores, en especial para los modelos de 12 a 24 niveles, en que las columnas de los marcos contribuyen con al menos el 50% de la resistencia a fuerza cortante. Para estos casos, las propuestas del MOC sobreestiman la sobrerresistencia.
- (5) En la mayoría de los casos se obtuvieron factores de sobrerresistencia mayores para los modelos en dirección Y (símbolos vacíos) que para los modelos en dirección X (símbolos rellenos). Lo anterior probablemente es consecuencia de las sobrerresistencias locales de los elementos de contraventeo de los modelos en dirección Y , los cuales usualmente presentan relaciones de esbeltez inferiores a las de los modelos en dirección X , introduciendo sobrerresistencias locales mayores.

Tal y como se ha reportado para otros sistemas estructurales (Tena-Colunga y Cortés-Benitez 2015), se observó que los factores de reducción por sobrerresistencia R decrecen significativamente conforme se incrementa la relación de esbeltez (H/L) de los marcos estudiados (figura 5). En las figuras 5a y 4b se muestran las gráficas correspondientes a los casos en que las columnas fueron diseñadas para aportar aproximadamente el 50% y 75% de la resistencia a fuerza cortante de entrepiso (sistemas dúctiles); en tanto que en las figuras 5c y 4d, se muestra lo respectivo al caso en que las columnas fueron diseñadas para resistir aproximadamente el 25% de la fuerza cortante

total (sistemas no dúctiles). En cada caso se muestra una ecuación propuesta para el cálculo del factor de reducción por sobrerresistencia (R) como función de la relación de esbeltez (H/L). Las propuestas son conservadoras, pues, para su planteamiento, se trató que las curvas descritas por dichas ecuaciones cubrieran los valores analíticos inferiores. De los resultados expuestos en las figuras 4b y 5d se observa que, si se considera un factor $R_0 = 2.5$ en la propuesta actual del MOC (MOC-15 2015), se cubrirían conservadoramente los valores analíticos obtenidos para los modelos no dúctiles en que se consideran efectos de sobrerresistencia (principalmente cuando $T/T_a \geq 1$).

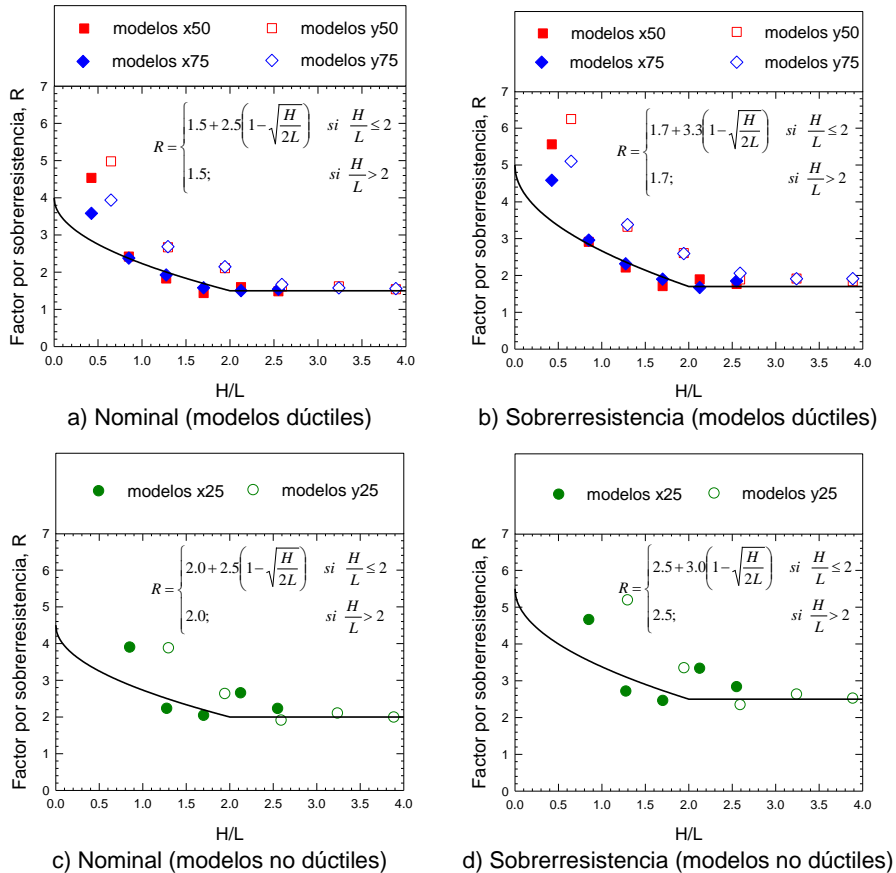


Figura 5 Relación entre los factores de reducción por sobrerresistencia (R) y la relación de esbeltez (H/L) para ambas condiciones de resistencia

4.2 Ecuación propuesta para la determinación de factores R

Con la finalidad de obtener parámetros útiles desde un punto de vista de diseño sísmico, la estimación de los factores de reducción por sobrerresistencia se realizó para una capacidad de deformación fija. En este caso la máxima permisible para el diseño de marcos dúctiles de concreto contraventeados $Q = 4$. Por lo anterior, en los modelos en que las capacidades de deformación global (μ_{global}) resultaron mayores que el factor de comportamiento sísmico para

el cual fueron diseñados ($\mu_{global} > Q$), se realizaron los ajustes necesarios, y se recalcularon los factores R .

Los valores presentados en esta sección se estimaron con base únicamente en los resultados de los modelos en que las columnas de los marcos aportan como mínimo el 50% de la resistencia a fuerza cortante (modelos con comportamiento dúctil), pues como se comenta en estudios previos (Godínez-Domínguez y Tena-Colunga 2010), del estudio detallado de las curvas cortante-distorsión y de los mapeos de rotaciones plásticas acumuladas, se observó que el comportamiento de los modelos en que las columnas aportan un porcentaje menor al 50% de la resistencia a fuerza cortante (modelos y25 y x25), no es satisfactorio para el diseño de sistemas dúctiles.

Con base en los resultados expuestos en la sección anterior, se propone una expresión para la determinación de los factores de reducción por sobrerresistencia (ec. 4), para sistemas con base en marcos de concreto con contraventeo metálico tipo chevrón susceptible a pandeo. La ecuación propuesta tiene la forma general con la cual se determinan los factores de reducción por sobrerresistencia en la propuesta del Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad [MOC-08 2008, MOC-15 2015]. Siguiendo dicho enfoque, se tendrían valores de $R_0 = 1.7$ y $R_1 = 3.3$.

$$R = \begin{cases} 1.7 + 3.3(1 - \sqrt{T_e/T_a}) & \text{si } T_e \leq T_a \\ 1.7; & \text{si } T_e > T_a \end{cases} \quad (4)$$

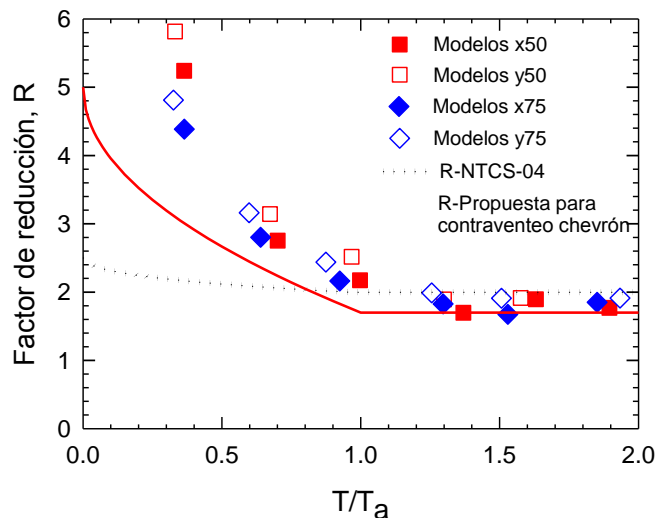


Figura 6 Propuesta para la determinación de factores de reducción por sobrerresistencia en marcos con contraventeo metálico tipo chevrón susceptible a pandeo

En la figura 6 se muestran los valores con base en los cuales se derivó (4), así como las curvas descritas por dicha ecuación y la propuesta actual del Apéndice A (AA) de las NTCS-04 (NTCS-04 2004). Como se observa, la propuesta es conservadora, pues en la mayoría de los casos, la curva

propuesta se encuentra por debajo de los valores teóricos. Al comparar la curva propuesta con la correspondiente de las NTCS-04, se observa que se proponen valores superiores a los especificados en el AA para la zona de periodos cortos; en tanto que para la zona de periodos largos se proponen valores inferiores. Con lo anterior se obtienen valores más cercanos a los calculados teóricamente. La expresión propuesta está sustentada en evidencia analítica desarrollada específicamente para el sistema estructural considerado, a diferencia de la propuesta actual de las NTCS-04, la cual, como se comenta en Tena-Colunga *et al.* (2008), se basa en los valores obtenidos de modelos de marcos momento-resistentes de concreto reforzado.

De las figuras 4 a 6 se observa que los factores de reducción por sobrerresistencia decrecen de manera significativa conforme se incrementa la relación de esbeltez y el periodo de la estructura. Se observa también, que para las estructuras más rígidas, conforme se incrementa el porcentaje de fuerza cortante que resisten las columnas, decrecen los valores de R .

El criterio empleado para el planteamiento de la ecuación (4) se basa en procurar que las curvas descritas por dichas ecuaciones se encuentren lo más cercano posible a los valores teóricos mínimos calculados para cada periodo o relación T/T_a . Dado el criterio adoptado, es claro que para aquellos casos en que para un mismo valor de T/T_a existen varios valores de R , las estimaciones realizadas mediante (4) ajustarán de muy buena forma a los valores analíticos inferiores, y la diferencia se incrementará conforme dichos valores teóricos se alejen del valor mínimo. Sin embargo, se procuró que en todos los casos las estimaciones realizadas no fueran inferiores al 75% de cada valor teórico calculado. Con lo anterior se obtienen valores menos conservadores que los actualmente propuestos en las NTCS-04 [14], además de estar basados en resultados analíticos específicos al sistema estructural reportado.

5 CONCLUSIONES

Se presenta un estudio en que se propone, a partir de los resultados de análisis estáticos no lineales ante cargas monótonas crecientes, una expresión para la determinación de factores de reducción por sobrerresistencia (R) para marcos dúctiles de concreto reforzado con contraventeo metálico tipo chevrón susceptible a pandeo. De los resultados expuestos, se pueden hacer los siguientes comentarios y observaciones:

- 1) Los marcos con periodos naturales bajos (modelos de cuatro niveles) presentan niveles de sobrerresistencia mayores que los propuestos tanto en el Apéndice A de las NTCS-04 como en el MOC. Este efecto se debe en parte al incremento en la resistencia lateral derivado del diseño por cargas verticales, pues es bien sabido que la sobrerresistencia por efecto de las cargas verticales impacta en mayor medida a estructuras bajas que a estructuras altas.
- 2) Los factores de reducción por sobrerresistencia decrecen de manera significativa conforme se incrementa la relación de esbeltez y el periodo de la estructura. Se observa también que, para las estructuras más

rígidas, conforme se incrementa el porcentaje de fuerza cortante que resisten las columnas, los valores de R decrecen.

- 3) Se observó que las propuestas de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, así como las del Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad, para el cálculo de factores de reducción por sobrerresistencia brindan estimaciones que difieren de los resultados obtenidos analíticamente para el sistema estructural en estudio. Por lo anterior, se propuso una expresión para el cálculo de los factores R en marcos dúctiles de concreto reforzado con contraventeo metálico tipo chevrón susceptible a pandeo. La ecuación propuesta brinda resultados menos conservadores que los especificados en las NTCS-04.
- 4) Si se considera un factor $R_o=2.5$ en la propuesta actual del MOC [16], se cubrirían conservadoramente los valores analíticos obtenidos para los modelos no dúctiles en que se consideran efectos de sobrerresistencia (principalmente cuando $T/T_a \geq 1$).

REFERENCIAS

1. ACI 318-14 (2014). *Building code requirements for structural concrete (ACI-318-14) and commentary*. Farmington Hills. (MI, USA) American Concrete Institute.
2. ASCE 7-10 (2010). *Minimum design loads for buildings and other structures*. ASCE Standard ASCE/SEI 7-10, American Society of Civil Engineers, ISBN 978-0-7844-1085-1.
3. Elnashai, A.S. y Mwafy, A.M. (2002), "Overstrength and force reduction factors of multistorey reinforced-concrete buildings", *The Structural Design Of Tall Buildings*, **11**, 329-351. doi:10.1002/tal.204.
4. FEMA-273 (1997). *NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*. FEMA publication 273. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, octubre.
5. Godínez-Domínguez E.A. y Tena-Colunga, A. (2010), "Nonlinear behavior of code-designed reinforced concrete concentric braced frames under lateral loading", *Engineering Structures*, **32**, 944-963. doi:10.1016/j.engstruct.2009.12.020.
6. Godínez-Domínguez E.A., Tena-Colunga, A. y Pérez-Rocha, L.E. (2012), "Case studies on the seismic behavior of reinforced concrete chevron braced framed buildings", *Engineering Structures*, **45**, 78-103. doi: 10.1016/j.engstruct.2012.05.005.
7. Godínez-Domínguez, E.A. (2014), "Influencia del esquema de contraventeo en el comportamiento no lineal de marcos dúctiles de concreto reforzado". *Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS*, **91**, 1-30.
8. Godínez-Domínguez E.A. y Tena-Colunga, A. (2016), "Redundancy factors for the seismic design of ductile reinforced concrete chevron braced frames". *Latin American Journal of Solids and Structures*, **13** (11), 2088-2112. doi:10.1590/1679-78252827.
9. Horvilleur, J.F. y Cheema, M.A. (1994), "Análisis lateral de marcos de concreto reforzado sometidos a cargas laterales sísmicas", *Memorias*

- IX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Zacatecas, Zacatecas, México. Vol. I, 244-259.
10. Maheri, M.R. y Akbari, R. (2003), "Seismic behaviour factor, R, for steel X-braced and knee-braced RC buildings". *Engineering Structures*, **25**, 1505-1513. doi: 10.1016/S0141-0296(03)00117-2.
 11. Miranda, E. y Bertero, V.V. (1994), "Evaluation of strength reduction factors for earthquake-resistant design", *Earthquake Spectra*, **10 (2)**, 357-79.
 12. Mitchell, D. y Paultre, P. (1994), "Ductility and overstrength in seismic design of reinforced concrete structures". *Can. J. Civ. Eng.*, **21**, 1049-1060.
 13. MOC-08 (2009). *Manual de diseño de obras civiles. Diseño por sismo*. Comisión Federal de Electricidad, noviembre.
 14. MOC-15 (2015). *Manual de diseño de obras civiles. Diseño por sismo*. Comisión Federal de Electricidad.
 15. Newmark, N.M. y Hall, W.J. (1982), *Earthquake spectra and design*. Monograph series, Earthquake Engineering Research Institute. Oakland.
 16. NTCS-04 (2004). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo*. *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, Tomo II, No. 103-BIS, octubre.
 17. Ordaz, M., Miranda, E. y Avilés, J. (2003), "Propuesta de espectros de diseño por sismo para el DF". *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, **8 (2)**, 189-207.
 18. Park, R. y Paulay, T. (1978). *Reinforced concrete structures*. Primera edición, John Wiley & Sons, Inc.
 19. Prakash, V., Powell, G.H. y Fillipou, F. (1992). DRAIN-2DX: Base program user guide. *Report No. UBC/SEMM-92/29*, Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley.
 20. SAP2000 (2009). *SAP 2000 Nonlinear Version 14.0 Structural analysis program*. Computer and Structures, Inc., Berkeley, California.
 21. Tena, A. (2007). *Análisis de estructuras con métodos matriciales*. Primera edición, México: editorial Limusa, septiembre.
 22. Tena-Colunga, A., Godínez-Domínguez, E.A. y Pérez-Rocha, L.E. (2007), "Vulnerability maps for reinforced concrete structures for Mexico City's Metropolitan Area under a design earthquake scenario". *Earthquake Spectra*, **23 (4)**, 809-840.
 23. Tena-Colunga, A., Correa-Arizmendi, H., Luna-Arroyo, J. y Gatica-Avilés, G. (2008), "Seismic behavior of code-design medium rise special moment-resisting frame RC buildings in soft soils of Mexico City". *Engineering Structures*, **30 (12)**, 3681-3707. doi:10.1016/j.engstruct.2008.05.026.
 24. Tena-Colunga, A. y Cortés-Benitez, J. (2015), "Assessment of redundancy factors for the seismic design of special moment resisting reinforced concrete frames". *Latin American Journal of Solids and Structures*, **12**, 2330-2350. doi: 10.1590/1679-78251800.
 25. Tena-Colunga, A., Mena-Hernández, U., Pérez-Rocha, L.E., Avilés, J., Ordaz, M. y Vilar J.I. (2009), "Updated seismic design guidelines for buildings of a model code of Mexico". *Earthquake Spectra*, **25 (4)**, 869-898. doi: 10.1193/1.3240413.