

ECONOMIC IMPACT ASSESSMENT OF THE PROVISIONS OF NTCC-17 GUIDELINES TO COMPUTE THE EFFECTIVE STIFFNESS IN NON-DUCTILE RC FRAMES

Eber Alberto Godínez Domínguez⁽¹⁾, Heriberto Villafuerte Altúzar⁽²⁾, Arturo
Tena Colunga⁽³⁾, Oscar Manuel González Cuevas⁽³⁾

⁽¹⁾Profesor, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chiapas, Campus-I, Blvd. Belisario Domínguez, km 1081, S/N, Col. Terán, 29050, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

eber.godinez@unach.mx

⁽²⁾Estudiante, Maestría en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chiapas, Campus-I, Blvd. Belisario Domínguez, kilómetro 1081, Sin número, Col. Terán, 29050, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. cipe_ing@hotmail.com

⁽³⁾Profesor, Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Materiales, Av. San Pablo 180, Col. Reynosa Tamaulipas, 02200, Ciudad de México, México. atc@correo.azc.uam.mx; omgc@correo.azc.uam.mx

Received: December 2019. Accepted: February 2020

ABSTRACT

In this paper, the authors summarize the results of a study devoted to assess the economic impact of using the new version of the reinforced concrete guidelines of Mexico's City Code (NTCC-17) regarding the calculation of effective flexural stiffness (EI_e) in reinforced concrete structural members. Although since the last version of RC guidelines for Mexico (NTCC-04 2004) the criteria to be considered when applying elastic analysis methods for seismic analysis is clearly specified, from some surveys conducted among Mexican structural design firms it was found that different criteria are used for the definition of flexural stiffnesses (EI_e) in RC members. Frame models were analyzed and designed considering three different hypothesis for the definition of EI_e : 1) uncracked sections are used, 2) the criterion of the last version of the NTCC-04 is used ($EI_e=0.5EI_g$ for beams and $EI_e=EI_g$ for columns) and, 3) the criterion of the new version of the NTCC-17 is used ($EI_e=0.5EI_g$ for beams and $EI_e=0.7EI_g$ for columns). The studied frames have three, six, nine, 12 and 15-story and were assumed to be located in soft soil conditions of Mexico City. For the assessment of the economic impact derived from the application of the new version of the NTCC-17 criteria, three different concepts were considered: a) the cost associated with the required concrete, b) the cost associated with the required reinforcing steel, and c) the cost associated with the required formwork. From the results obtained in this study, it is possible to conclude that, for the studied models, no significant differences in the volume of materials, and therefore in the total cost of the models designed according to the new version of the NTCC with respect to those obtained using the current version of NTCC.

Keywords: RC structures. Effective stiffness. Seismic design. Construction costs.

EVALUACIÓN DEL IMPACTO ECONÓMICO DE LAS DISPOSICIONES DE LAS NTCC-17 PARA EL CÁLCULO DE RIGIDECES EFECTIVAS EN MARCOS NO DÚCTILES DE CONCRETO REFORZADO

RESUMEN

Se presenta un estudio en que se evalúa el impacto económico derivado de la aplicación de las nuevas Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTCC-17) referente al cálculo de rigideces efectivas a flexión (EI_e) en elementos estructurales de concreto reforzado. A pesar de que desde la versión de las NTCC de 2004 (NTCC-04) se especifica el criterio que debe considerarse cuando se apliquen métodos de análisis elástico para el análisis sísmico, algunos sondeos entre diseñadores de la Ciudad de México y algunos Estados de la República Mexicana indicaron que se siguen prácticas diversas para la definición de EI_e . Se analizaron y diseñaron modelos de marcos planos considerando las siguientes variantes en la definición de EI_e : 1) uso de secciones gruesas, 2) uso de las hipótesis de las NTCC-04 ($EI_e = 0.5 EI_g$ en vigas y $EI_e = EI_g$ en columnas), 3) uso de las hipótesis de las NTCC-17 ($EI_e = 0.5 EI_g$ en vigas y $EI_e = 0.7 EI_g$ en columnas). Los marcos planos cuentan con tres, seis, nueve, 12 y 15 niveles y se ubicaron para su diseño en la zona del lago de la Ciudad de México. Para la evaluación del impacto económico derivado de la aplicación de la nueva propuesta de las NTCC se definieron tres conceptos: a) costo asociado al concreto, b) costo asociado al acero de refuerzo y, c) costo asociado a la cimbra. Del conjunto de resultados se concluye que, para las estructuras estudiadas, no se detectan diferencias significativas en las cantidades de materiales, y por consiguiente en el costo total, de los diseños realizados conforme a la nueva versión de las NTCC respecto a los realizados con base en la versión de 2004.

Palabras clave: Estructuras de concreto. Rigidez efectiva. Diseño sísmico. Costos de construcción.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los aspectos de mayor relevancia y debate dentro del gremio de la ingeniería estructural radica en la forma en que deben calcularse las rigideces efectivas (EI_e) de los elementos estructurales que conforman una estructura de concreto reforzado. Lo anterior se debe a que la definición de dicho criterio tiene un impacto directo en la estimación de parámetros tales como: las propiedades dinámicas del sistema estructural y por ende las demandas de aceleración de diseño, la distribución de fuerzas entre los elementos sismorresistentes (función de las rigideces relativas entre los elementos estructurales), los efectos de segundo orden (de gran importancia en estructuras esbeltas), así como en la determinación de desplazamientos y/o distorsiones de entrepiso. Asociado a este último rubro, se encuentra también implícito el costo total del sistema estructural, aspecto relevante para el desarrollo de un proyecto.

Los criterios para el análisis de los sistemas estructurales especificados en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras

de Concreto (NTCC) han evolucionado a través de los años, pues previo a la aparición de la versión de 2004 (NTCC-04 2004), el criterio general, en que se consideraban métodos de análisis elástico, se basaba en el uso de secciones gruesas para definir las rigideces efectivas a flexión (EI_e), y fue hasta la aparición de la versión de las NTCC de 2004 (NTCC-04 2004) cuando se especificó que cuando se recurra a métodos de análisis elástico, deberá tomarse en cuenta el efecto del agrietamiento en el cálculo de las rigideces de los miembros estructurales.

Las disposiciones de las NTCC-04 se basaron en las del Reglamento vigente del ACI 2002 (2001) en ese momento. En este reglamento se especificaban momentos de inercia efectivos de $0.35I_g$ para vigas, $0.70 I_g$ para columnas, $0.70 I_g$ para muros no agrietados, $0.35 I_g$ para muros agrietados y $0.25 I_g$ para losas planas y placas planas. En los comentarios a este Reglamento se señala que estos valores fueron tomados de trabajos desarrollados por Mac Gregor en 1977; sin embargo, los valores originalmente propuestos por él fueron reducidos empleando factores del orden de 0.80 a 0.85. Estas reducciones se justificaban por la inclusión de un factor de reducción por inestabilidad general y porque las deflexiones de segundo orden se calculan con el módulo de elasticidad nominal del concreto, basado en la resistencia nominal del concreto a compresión, f_c' , que es menor que el promedio real en la estructura. En las NTCC-04 no se incluyeron estas reducciones por lo que, por ejemplo, para el caso de vigas las inercias efectivas a flexión se calculan como $I_e=0.5I_g$ y para columnas no agrietadas como $I_e=I_g$, sin brindarse recomendaciones para columnas agrietadas. Respecto al módulo de elasticidad, E , la práctica común, es usar el módulo de elasticidad del concreto, E_c , material predominante en el volumen total de los elementos, en comparación con el acero de refuerzo.

Con la entrada en vigor de la nueva versión de las NTCC (NTCC-17 2017), en la que a diferencia de las NTCC-04, las rigideces de columnas se calcula considerando el efecto del agrietamiento mediante un factor igual a 0.7 ($EI_e=0.7 EI_g$), existe la inquietud de conocer el impacto económico de esta nueva disposición reglamentaria. El criterio para el cálculo de las rigideces efectivas en vigas se mantiene en las NTCC-17, es decir, se considera el efecto del agrietamiento mediante una reducción del momento de inercia grueso en 50% ($EI_e=0.5 EI_g$).

Es importante hacer notar que, de un sondeo realizado recientemente (España 2016), se observó que el criterio basado en el empleo de secciones gruesas para la definición de las rigideces efectivas a flexión aún es ampliamente usado en la práctica del diseño estructural en México, por lo que, como se comenta posteriormente, también se considera en este estudio.

Por lo anterior, este estudio tiene como objetivo evaluar el impacto económico derivado de la aplicación de la nueva propuesta de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTCC-17 2017) referente al cálculo de rigideces efectivas a flexión (EI_e) en elementos estructurales de concreto reforzado. Para tal fin, se analizaron y diseñaron modelos de marcos planos considerando las siguientes hipótesis para la definición de EI_e : 1) uso de secciones gruesas, 2) uso de las hipótesis de las NTCC-04 ($EI_e=0.5 EI_g$ en vigas y $EI_e=EI_g$ en columnas), 3) uso de las hipótesis de las NTCC-17 ($EI_e=0.5 EI_g$ en vigas y $EI_e=0.7 EI_g$ en columnas). Los marcos planos cuentan con tres, seis, nueve, 12 y 15 niveles y se ubicaron para su diseño en la zona del lago de la Ciudad de México. Para la evaluación del impacto económico derivado de la aplicación de

la nueva propuesta de las NTCC se definieron tres conceptos: a) costo asociado al concreto, b) costo asociado al acero de refuerzo y, c) costo asociado a la cimbra.

2. CRITERIOS PARA DETERMINAR LA RIGIDEZ EFECTIVA

En esta sección se describen algunos de los estudios analíticos y/o experimentales que se han desarrollado a la fecha con la finalidad de proponer expresiones que permitan determinar la rigidez efectiva de elementos de concreto reforzado (Duan *et al.* 1989, Al-Zaid *et al.* 1991, Khuntia y Ghosh 2004a y 2004b, Elwood y Eberhard 2009, Rodríguez y Restrepo 2012). Cada propuesta aborda el problema con diferente nivel de detalle, y, en algunos casos, han servido como base para el planteamiento de las propuestas de los reglamentos de diseño vigentes. Por lo anterior, se considera importante brindar un panorama general sobre cuáles son las bases en que algunos de los autores sustentan sus propuestas, así como las correspondientes implicaciones.

Khuntia y Ghosh (2004a y 2004b) realizaron un estudio analítico/experimental, donde toman en consideración un gran número de variables que tienen influencia en la estimación de las rigideces efectivas a flexión de vigas y columnas (EI_e). En este estudio paramétrico, las rigideces efectivas se calcularon como la relación entre el momento flexionante y la curvatura ($EI_e=M/\phi$) y representa uno de los más completos realizados a la fecha. Ellos propusieron la ec. 1 para estimar la rigidez efectiva a flexión (EI_e) de columnas de concreto reforzado. Si los valores de las combinaciones de carga (P_u , M_u) son cercanos a la curva que define el diagrama de interacción de diseño, se puede plantear una relación aproximada razonable entre P_u/P_0 y e/h (ec. 2), lo que permite reescribir la ec. 1 en función de la relación de excentricidades e/h (ec. 3), o en función de la relación de cargas P_u/P_0 (ec. 4).

$$EI_e = E_c I_g \left(0.80 + 0.25 \rho_g \right) \left(1 - \frac{e}{h} - 0.5 \frac{P_u}{P_0} \right) \leq E_c I_g \geq E_c I_{viga} \quad (1)$$

$$P_u / P_0 + e / h = 0.7 \quad (2)$$

$$EI_e = E_c I_g \left(0.80 + 0.25 \rho_g \right) \left(0.65 - 0.5 \frac{e}{h} \right) \leq E_c I_g \geq E_c I_{viga} \quad (3)$$

$$EI_e = E_c I_g \left(0.80 + 0.25 \rho_g \right) \left(0.30 - 0.5 \frac{P_u}{P_0} \right) \leq E_c I_g \geq E_c I_{viga} \quad (4)$$

En las ecuaciones 1 a 4, ρ_g es la cuantía total de refuerzo longitudinal, e es la excentricidad de la carga axial, h es el peralte de la columna, P_u es la carga axial factorizada, P_0 es la resistencia nominal a carga axial pura (para $e=0$), I_g es el momento de inercia de la sección gruesa (despreciando el acero de refuerzo), I_e es el momento de inercia efectivo de la sección, I_{viga} es el momento de inercia efectivo de un miembro en flexión y, E_c es el módulo de elasticidad del concreto.

Asimismo, proponen la ecuación 5 para la determinación de las rigideces efectivas en vigas construidas con concretos de resistencia normal ($f'_c \leq 6000$ psi) y

la ec. 6 para el caso en que se emplean concretos de alta resistencia ($f'_c > 6000$ psi). Finalmente, el efecto de los patines, en el caso de vigas T o L , puede tomarse en cuenta mediante la ec. 7, la cual captura el hecho de que la rigidez efectiva se incrementa al incrementarse el espesor del patín a compresión (t_f).

$$EI_e = E_c I_g (0.10 + 25\rho) \left(1.2 - 0.2 \frac{b}{d} \right) \leq 0.6 E_c I_g \quad (5)$$

$$EI_e = E_c I_g (0.10 + 25\rho) \left(1.2 - 0.2 \frac{b}{d} \right) (1.15 - 4 \times 10^{-5} f'_c) \leq 0.6 E_c I_g \quad (6)$$

$$\frac{EI_{eT}}{EI_e} \left(1 + 2 \frac{t_f}{h} \right) \leq 1.4 \quad (7)$$

En las ecuaciones 5 a 7, ρ es la cuantía de refuerzo longitudinal en tensión, b es el ancho de la viga, d es la distancia desde la fibra extrema en compresión al centroide del acero de tensión, f'_c es la resistencia a compresión del concreto y, t_f es el espesor del patín en vigas T o L , EI_{eT} es la rigidez a flexión de una viga T o en que que se considera la losa. El resto de variables se definió previamente.

Para analizar una estructura mediante análisis elásticos de primer o segundo orden, los autores indican que se pueden suponer rigideces iniciales de $0.35 E_c I_g$ en vigas y de $0.70 E_c I_g$ en las columnas. El primer valor corresponde a una relación de refuerzo ρ de 1% en vigas en la ecuación 5 y el segundo a valores de ρ_g de 1.5%, $e/h=0.20$ y $P_u/P_o = 0.40$ en la ecuación 1. Sin embargo, al hacer el análisis definitivo ante cargas laterales deben recalcularse los valores de EI_e con las ecuaciones 1 y 5.

De acuerdo con Khuntia y Ghosh (2004b), su propuesta permite obtener valores más realistas de la amplificación de momentos en análisis elásticos de segundo orden, así como una mejor estimación de los desplazamientos al realizar análisis de primer orden. Además, de acuerdo con ellos, las ecuaciones son aplicables para cualquier intensidad de carga, por lo que se pueden evaluar condiciones de servicio y últimas. Los dos trabajos realizados por Khuntia y Ghosh (2004a y 2004b) sentaron las bases para la propuesta del Reglamento del Instituto Americano del Concreto (ACI-318 2014), en el que se incluyen de forma alternativa para el cálculo de EI_e las ecuaciones descritas previamente, pero modificadas por un factor de reducción de rigidez ($\phi_{kk}=0.875$), el cual también está incluido en los valores de EI_e que se han presentado en las versiones anteriores de este reglamento.

Posteriormente, Elwood y Eberhard (2009) realizaron un estudio en que obtuvieron las rigideces efectivas analíticas de columnas de concreto reforzado empleando una base de datos recopilada por el Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) que cuenta con más de 400 ensayos de columnas bajo cargas cíclicas. Para limitar los análisis a columnas típicas de la práctica, los autores consideraron los casos en que la carga axial no excede de $0.66 P/A_g f'_c$ y la relación claro de cortante a peralte es menor a 1.4. En la base de datos se cubre una amplia gama de variables: la forma de la sección transversal (rectangular, circular, octagonal, cuadrada), las condiciones de apoyo (voladizo simple, doble voladizo y

doble curvatura), la resistencia del concreto (18.9-118 MPa), la cuantía de refuerzo longitudinal (0.005-0.06), el esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo (240-587 MPa), la magnitud de la carga axial ($-0.1 < P/A_g f'_c < 0.63$), entre otras. Finalmente, los autores consideraron una base de datos de 329 columnas (221 rectangulares y 108 circulares).

En el estudio los autores toman en consideración las componentes de deformación por flexión, deslizamiento de las barras por falla de adherencia y cortante para la determinación del desplazamiento de fluencia empleado en el cálculo de la rigidez efectiva. Para columnas tanto rectangulares como circulares, la deformación por flexión contribuye entre 50 y 100% de la deformación total, dependiendo de la relación de carga axial y la relación de aspecto. Respecto a la contribución de la deformación por deslizamiento, ésta es nula para columnas con cargas axiales elevadas, pero puede representar hasta un 40% en columnas robustas con cargas axiales bajas ($P/A_g f'_c < 0.3$). Finalmente, con excepción de columnas robustas con cargas axiales elevadas, la contribución de las deformaciones por cortante al desplazamiento de fluencia es inferior al 15%.

Elwood y Eberhard (2009) concluyen que varias de las recomendaciones existentes para el cálculo de la rigidez efectiva en columnas (las del FEMA-356, el suplemento 1 del ASCE-41, el ACI-318, Paulay and Priestley 1992, Mehanny y colaboradores 2001 y, Khuntia y Ghosh 2004) tienden a sobreestimar las rigideces de las columnas estudiadas. Lo anterior, según los autores, se debe a que dichos modelos se basan en una estimación de la rigidez efectiva a flexión y se desprecian los efectos de deformación debidos al deslizamiento de las barras por falla de adherencia y a efectos de cortante.

Con base en el estudio descrito, los autores propusieron una expresión (ec. 8) para la determinación de las rigideces efectivas de columnas de concreto sin necesidad de recurrir a relaciones momento curvatura.

$$0.2 \leq EI_e/EI_g = \frac{0.45 + 2.5P/A_g f'_c}{1 + 110 \left(\frac{d_b}{D}\right) \left(\frac{D}{a}\right)} \leq 1.0 \quad (8)$$

En la ec.8, P es la carga axial actuante, A_g es el área total de la sección transversal de la columna, f'_c es la resistencia a compresión del concreto, d_b es el diámetro de las barras longitudinales, D es el diámetro de columnas circulares o el peralte total en columnas rectangulares en la dirección de la carga, y a es el claro de cortante. Ya que el diámetro de las barras generalmente no se conoce al iniciar el análisis de la estructura, los autores recomiendan usar d_b/D igual a 1/25 para columnas de puentes y 1/18 para columnas de edificios.

En un estudio más reciente, Rodríguez y Restrepo (2012) evaluaron la rigidez lateral efectiva de un conjunto de columnas rectangulares previamente ensayadas ante cargas laterales cíclicas reversibles. Los elementos estudiados forman también parte de la base de datos recopilada por el PEER, pero en este caso emplearon únicamente 19 especímenes representativos de columnas en edificios. Indican que hay una fuerte correlación entre la rigidez efectiva y la relación de carga axial ($P/A_g f'_c$), donde nuevamente P es la carga axial actuante, A_g es el área transversal de la columna y f'_c es la resistencia a compresión del concreto medida en los cilindros de prueba correspondientes a los especímenes. Además,

ellos indican que para valores de esta relación menores que 0.3, que se pueden considerar típicos en columnas de edificaciones de concreto, los valores de la inercia efectiva son menores que $0.4I_g$. Lo anterior concuerda nuevamente con lo reportado por Elwood y Eberhard (2009); sin embargo, es contrario a lo reportado por Khuntia y Ghosh (2004a y 2004b), donde se muestra que, para una excentricidad fija, conforme se incrementa el nivel de carga axial, la rigidez efectiva de las columnas decrece.

Rodríguez y Restrepo (2012) proponen una expresión que varía linealmente (ec. 9) para evaluar el momento de inercia efectivo, I_e , de columnas rectangulares de concreto reforzado. Todas las variables que intervienen en la ec. 9 se han definido previamente.

$$I_e = \left(0.16 + \frac{P}{A_g f'_c} \right) I_g \quad (9)$$

De acuerdo con esos autores, para los casos en que la relación de carga es menor que 0.3 ($P_u/A_g f'_c < 0.3$), las NTCC-04 y el ACI 318-11 estarían sobrestimando la rigidez de estas columnas en más del 100%, pues en ambos casos se especifica que para el análisis se considere el valor de I_g . Es de gran interés resaltar que, de acuerdo a los autores, en los resultados experimentales la rigidez efectiva en columnas con baja relación de carga axial puede alcanzar valores muy bajos, del orden del 20% del valor de la rigidez correspondiente a la sección bruta, y que sólo para valores de la relación de carga axial mayores que 0.5 se tendría rigideces efectivas mayores que alrededor del 50% de la rigidez correspondiente a la sección bruta.

Es importante hacer notar que en lo que respecta al caso de estructuras dúctiles, en la sección 7.3.1 de las NTCC-04 y en la 9.3.1 de las NTCC-17 (para estructuras de ductilidad alta), existe un requisito geométrico que indica que el área gruesa de la sección transversal (A_g) de columnas no debe ser menor que $P_u/0.5f'_c$ para toda combinación de carga. Lo anterior podría interpretarse claramente como una restricción en el nivel máximo de la carga axial de diseño para garantizar una capacidad de rotación adecuada; es decir, que la carga de diseño, P_u , no debe exceder de $0.5A_g f'_c$, por lo que en todas las columnas que formen parte de marcos dúctiles ($Q=4$), de acuerdo con los estudios de referencia y la limitante de las NTCC-04 y NTCC-17, la rigidez efectiva a flexión tendría valores inferiores al 50% de la rigidez correspondiente a la sección bruta, lo cual en definitiva tendría un impacto muy significativo en el proceso de diseño sísmico de dichos sistemas estructurales, pues de entrada, el cumplimiento de los criterios de rigidez lateral únicamente se lograrían empleando secciones muy robustas. Lo anterior podría también tener impacto en el costo final del sistema estructural.

Además de la influencia de las variables ya comentadas en la determinación de la rigidez efectiva, es importante notar que la degradación de rigidez que sufren los elementos estructurales no es únicamente dependiente de la condición que induce la carga que actúa en el elemento (axial, flexión, flexocompresión, flexotensión, cortante o torsión), sino también de su ubicación en planta y elevación. Respecto a esto, existen estudios que muestran, por ejemplo, que las vigas y/o entrepisos ubicados en la parte intermedia de edificios regulares de mediana y gran altura sufren mayores niveles de degradación que las vigas y/o entrepisos ubicados

en la parte superior, observando en muchos casos comportamiento elástico en los entresijos superiores (Tena *et al.* 1996, Luna y Tena 1999 y 2000, Tena y Correa 2008, Tena *et al.* 2008, Godínez y Tena 2011, Tena *et al.* 2012, Godínez *et al.* 2012, Tena y Nangullasmú 2013, Tena y Cortés 2014, Godínez y López 2014, Nangullasmú y Tena 2016), lo cual se observa aún en estructuras con base en marcos de concreto reforzado con fuertes irregularidades estructurales en elevación (Tena 2001, Tena 2010). Además, es importante hacer notar que los autores no muestran el nivel de daño asociado a las rigideces efectivas que se proponen. En realidad, la rigidez de un elemento de concreto se degrada importantemente solo en zonas específicas (previamente consideradas para estar sometidas a grandes demandas de deformación, con fines prácticos, la longitud de articulación plástica), permaneciendo el resto del elemento con un nivel de daño menor, e incluso en algunos casos elástico. Lo anterior podría indicar que las actuales reglas aplicadas para la obtención de rigideces efectivas podrían modificarse de tal manera que los factores empleados para considerar el agrietamiento en los elementos varíe también en función de la ubicación de los elementos estructurales en planta y/o elevación (Tena *et al.* 2008). Lo anterior podría brindar estimaciones más realistas de la respuesta estructural.

De lo comentado hasta el momento, es evidente que existen diferentes criterios para la determinación de las rigideces efectivas de secciones de concreto (EI_e), la cuales toman en consideración un número diferente de factores y por ende tienen una precisión variable.

Varios de los Reglamentos con reconocido prestigio internacional, como el del Instituto Americano del Concreto (ACI-318-14 2014), el de Nueva Zelanda (NZS-06 2006), el Eurocódigo (EC-8 2010), las NTCC (NTCC-04 2004), la nueva versión de las NTCC (NTCC-17 2017), así como documentos de referencia como el de la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de los Estados Unidos de América (FEMA-356 2000), incluyen propuestas para la determinación de las rigideces efectivas (EI_e) en diferentes elementos estructurales. En general, el criterio se basa en reducir el momento de inercia de la sección gruesa (I_g) mediante el empleo factores, los cuales intentan representar de forma simplificada los resultados derivados de estudios analíticos y/o experimentales, como los comentados previamente en esta sección. Por ejemplo, la propuesta actual del ACI-318-14 (ACI-318-14 2014) se basa en los estudios realizados por Khuntia y Ghosh (2004a y 2004b), donde también se presenta como opción el empleo de las ecuaciones derivadas por los autores, considerando una modificación a través de un factor reductor igual a 0.875. Asimismo, la propuesta del código de Nueva Zelanda (NZS-06 2006, Paulay 1996) se basa en el estudio desarrollado por Paulay y Priestley (1992).

En la tabla 1 se presenta, exclusivamente para vigas y columnas, un resumen con diferentes propuestas para la determinación de EI_e . Como se observa, son pocos los casos en donde los factores de reducción empleados son función de los niveles de carga axial a los que está sujeto el elemento estructural en cuestión (para columnas), o en el caso de vigas, de la consideración u omisión del aporte de la losa a la rigidez lateral de la estructura. En vigas T, la sección bruta debe incluir los anchos de patín.

Tabla 1 Criterios para calcular la rigidez efectiva en vigas y columnas de concreto

Criterio	Vigas	Columnas
NTCC-04	$0.50E I_g$	$1.0E I_g$
NTCC-17	$0.50E I_g$	$0.70E I_g$
ACI-318	$0.35E I_g$	$0.70E I_g$
EUROCÓDIGO	$0.50E I_g$	$0.70E I_g$ (en compresión) $0.50E I_g$ (en tensión)
NZS-06	“Rectangulares” $0.40E I_g$ “T” y “L” $0.35E I_g$	$0.80E I_g$ si $P_u > 0.5A_g f'_c$ $0.60E I_g$ si $P_u = 0.2A_g f'_c$ $0.40E I_g$ si $P_u = -0.05A_g f'_c$
FEMA-356	$0.50E I_g$	$0.70E I_g$ si $P_u \geq 0.5A_g f'_c$ $0.50E I_g$ si $P_u \leq 0.3A_g f'_c$

3. ESTUDIO DE MARCOS PLANOS

3.1. Características de los modelos

Como se comentó, para evaluar el impacto económico derivado de la aplicación de las nuevas disposiciones de las NTCC-17 para el cálculo de las rigideces efectivas de elementos estructurales, se estudiaron modelos de marcos planos de tres, seis, nueve, 12 y 15 niveles. Los marcos forman parte de edificios de oficinas regulares en planta y elevación, y se ubicaron para su diseño en la zona del lago de la Ciudad de México. Se consideró una altura típica de entrepiso de 3.5 m (fig. 1). Los sistemas de pisos están formados por losas macizas de concreto reforzado de 10 cm de espesor, diseñados conforme a lo indicado en las NTCC. Los tableros en losas tanto de entrepisos como azotea están divididos por trabes secundarias con el fin de distribuir de manera uniforme las cargas gravitacionales (Tena *et al.* 2012). En todos los marcos planos se consideró un factor de comportamiento sísmico $Q=2$ (sistemas no dúctiles o de ductilidad baja, conforme a la nomenclatura de las nuevas NTCC).

Para el análisis de cargas se consideran los requisitos que se indican en las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones del RCDF-04 (NTCCA-04 2004). Por ello, en este estudio, en el diseño de cada modelo se consideraron tanto las cargas verticales de servicio como las combinaciones críticas últimas de diseño por cargas verticales exclusivamente y combinaciones de cargas laterales por sismo más cargas verticales con intensidad instantánea establecidas en el RCDF-04.

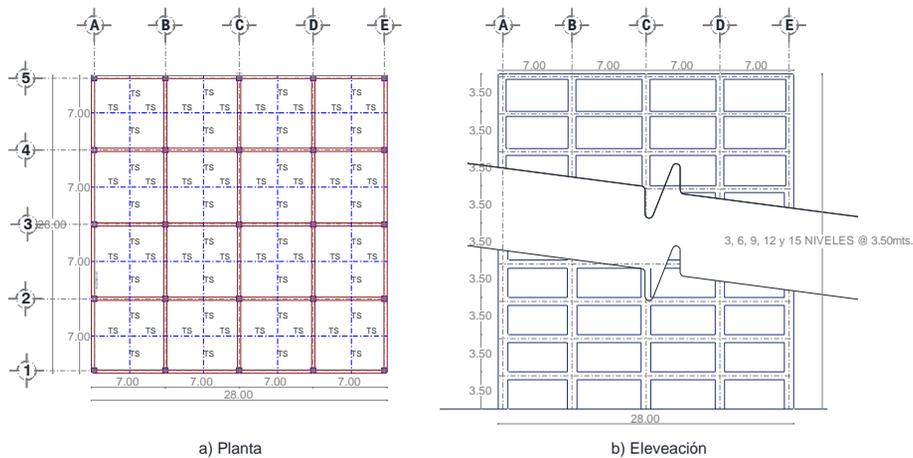


Figura 1 Planta tipo y elevación del edificio empleado para el estudio de marcos planos

3.2. Espectros para diseño sísmico

Los espectros de diseño se obtuvieron con base en lo especificado en Apéndice A (AA) de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTCS-04 2004) del RCDF-04 (RCDF-04 2004) para un periodo del terreno $T_s=0.75$ s (fig. 2). Conforme a lo indicado en el AA de las NTCS-04, para la determinación del espectro de diseño inelástico, las ordenadas del espectro elástico se reducen por efecto de ductilidad y sobrerresistencia. Se adoptaron las disposiciones de las NTCS-04 ya que al momento de la elaboración de este estudio, la nueva versión de las NTCS aún no entraba en vigor, y existía incertidumbre respecto a la fecha en que lo haría.

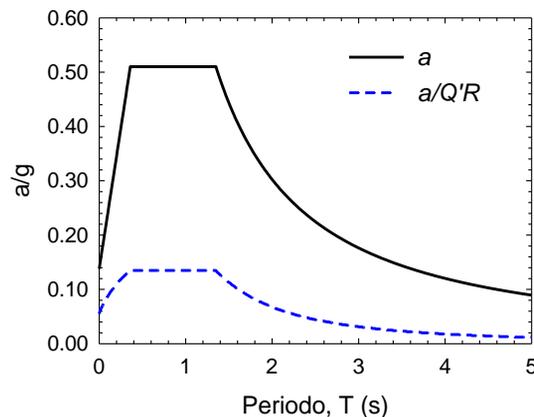


Figura 2 Espectros de diseño

3.3. Criterios de análisis y diseño sísmico

En todos los casos se realizó un análisis modal espectral conforme a lo indicado en las NTCS, empleando como apoyo el software de análisis estructural SAP2000 en su versión 18.0.1 (SAP2000 2015). Se consideran los efectos $P-\Delta$ y se

ignora la interacción suelo-estructura. Además, para el modelado de las uniones viga-columna se consideró una zona de rigidez infinita en una longitud del 50% del ancho de las columnas en el caso de vigas e igual al peralte de las vigas para el caso de las columnas (Tena 2007). Con la finalidad de obtener resultados congruentes con la práctica profesional, en todos los casos se modelaron vigas de sección rectangular.

Se considera concreto clase I con una resistencia a la compresión $f'_c=250$ kg/cm² y acero de refuerzo con esfuerzo de fluencia $f_y=4,200$ kg/cm².

Los elementos estructurales se dimensionaron para cumplir simultáneamente con los estados límite de servicio y prevención de colapso. Conforme a las NTCS-04, para el caso de marcos no dúctiles de concreto reforzado ($Q=2$), se consideraron distorsiones de entrepiso límite de 0.004 y 0.015, para servicio y prevención de colapso, respectivamente. Para el diseño por resistencia se emplean los criterios de las NTCC-04, cumpliendo en todos los casos con los requisitos de refuerzo longitudinal y transversal.

3.4. Evaluación económica de la propuesta de las NTCC-17

En esta sección se presentan los resultados derivados del estudio de los modelos de marcos planos (tres, seis, nueve, 12 y 15 niveles), los cuales fueron analizados y diseñados considerando tanto las recomendaciones para el cálculo de las rigideces efectivas de las NTCC-04 como de las NTCC-17 (tabla 1). Asimismo, se considera un criterio adicional para el cálculo de las rigideces en todos los elementos estructurales basado en el empleo de secciones gruesas (identificado como "Gruesas").

Con la finalidad de contar con un marco de comparación, el criterio general de diseño se basó en aproximar, en la medida de lo posible, las distorsiones de entrepiso al valor máximo considerado en las NTCS-04 para el estado límite de prevención de colapso (fig. 3). Dada la estrategia de diseño, los periodos fundamentales de vibrar de los modelos asociados a cada hipótesis de análisis, para cada altura, son muy parecidos entre sí. En la tabla 2 se muestran tanto los periodos fundamentales de vibrar como las secciones de diseño de cada modelo.

Los resultados obtenidos en este estudio ratifican la práctica profesional de limitar el empleo de estructuras con base únicamente en marcos rígidos de concreto a edificios de no más de diez pisos aproximadamente en zona del lago, ya que el tamaño de las columnas resulta excesivo (tabla 2). Cuando se sobrepasan estas alturas, es conveniente combinar los marcos con muros o con contravientos para rigidizar las estructuras e incrementar su resistencia ante carga lateral.

Además de lo anterior, el uso de secciones muy robustas produce afectaciones en el uso eficiente de los espacios originalmente planteados en el proyecto arquitectónico.

Una vez realizado el diseño de la rigidez lateral global de los modelos, se procedió a realizar el diseño por resistencia de los elementos estructurales. De forma ilustrativa, en la figura 4a se muestran las secciones transversales y el respectivo acero de refuerzo del modelo de tres niveles en que se consideran

secciones gruesas para el cálculo de EI_e . Asimismo, en las figuras 4b y 4c se muestra lo respectivo a los casos en que se consideran los criterios de las NTCC-04 y de las NTCC-17 para el cálculo de EI_e (tabla 1). Los detalles de cada uno de los diseños se pueden consultar en Villafuerte (2020).

Con base en lo anterior, se realizó la cuantificación de los materiales requeridos en cada uno de los diseños realizados. Esto permite conocer el impacto económico derivado de la aplicación de los nuevos criterios estipulados en las NTCC-17 (NTCC-17 2017) para el cálculo de las rigideces efectivas respecto a un diseño basado en las NTCC-04 (NTCC-04 2004). También se comparan los resultados respecto a los diseños realizados con base en secciones gruesas. El costo total del sistema estructural se integró considerando tres conceptos: 1) acero de refuerzo, 2) cimbra y 3) concreto. En la cuantificación del acero de refuerzo, se considera la distribución del acero de refuerzo transversal y los cortes de barras del acero longitudinal.

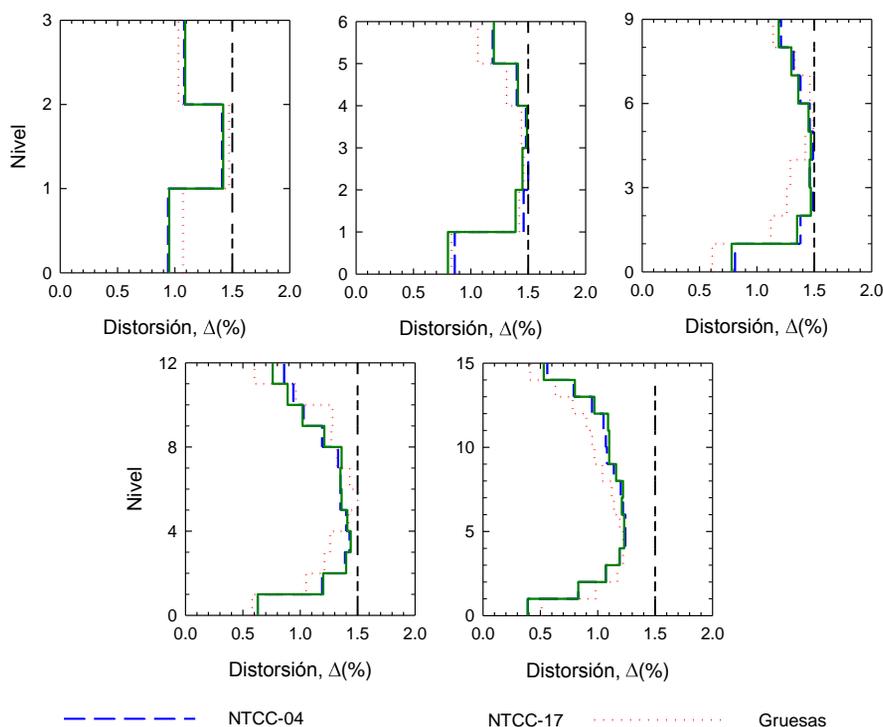


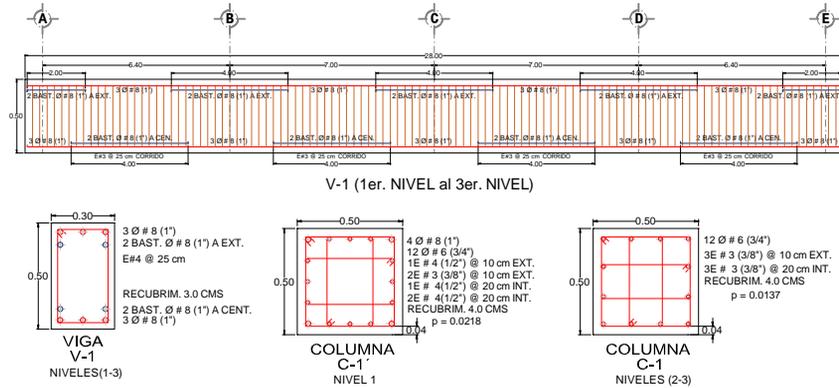
Figura 3 Distorsiones de entrepiso de los modelos de marcos planos asociados a diferentes hipótesis para el cálculo de las rigideces efectivas

En la figura 5 se muestra la comparativa de los costos derivados de la cuantificación de los materiales asociados a cada uno de los diseños realizados. Con la finalidad de facilitar la interpretación de las gráficas, los costos asociados a cada concepto, así como los costos totales, están normalizados respecto a los costos obtenidos en los modelos en que se consideran las hipótesis de las NTCC-04 para el cálculo de EI_e .

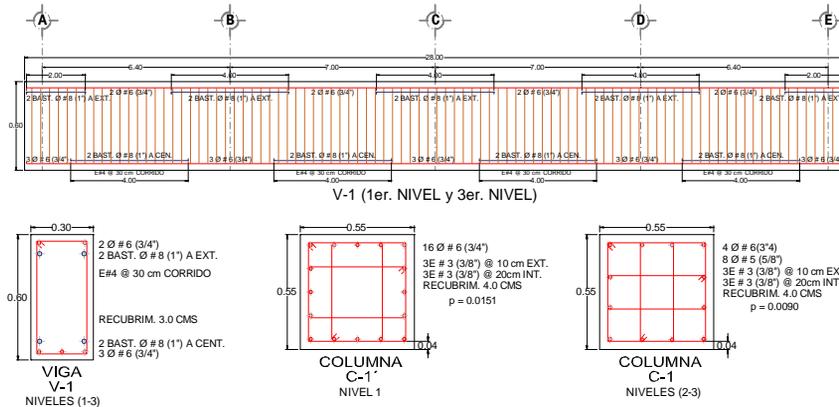
Tabla 2 Periodos de vibrar y secciones de diseño

Modelo	Hipótesis	T (seg.)	Vigas, b x h (cm)	Columnas, b x h (cm)
3 niveles	Gruesas	0.746	30 X 50 (N1-N3)	50 X 50 (N1-N3)
	NTCC-04	0.726	30 X 60 (N1-N3)	55 X 55 (N1-N3)
	NTCC-17	0.728	30 X 60 (N1-N3)	60 X 60 (N1-N3)
6 niveles	Gruesas	1.00	40 X 60 (N1-N4)	70 X 70 (N1-N3)
			30 X 50 (N5-N6)	60 X 60 (N4-N6)
	NTCC-04	1.021	40 X 75 (N1-N4)	70 X 70 (N1-N3)
			30 X 60 (N5-N6)	60 X 60 (N4-N6)
	NTCC-17	1.00	40 X 75 (N1-N4)	80 X 80 (N1-N3)
			30 X 60 (N5-N6)	65 X 65 (N4-N6)
9 niveles	Gruesas	1.242	50 X 70 (N1-N4)	70 X 70 (N1-N6)
			40 X 70 (N5-N7)	60 X 60 (N7-N9)
			30 X 50 (N8-N9)	
	NTCC-04	1.224	50 X 85 (N1-N4)	80 X 80 (N1-N6)
			40 X 80 (N5-N7)	70 X 70 (N7-N9)
			30 X 60 (N8-N9)	
	NTCC-17	1.216	50 X 85 (N1-N4)	90 X 90 (N1-N6)
			40 X 80 (N5-N7)	80 X 80 (N7-N9)
			30 X 60 (N8-N9)	
12 niveles	Gruesas	1.317	50 X 80 (N1-N7)	100 X 100 (N1-N4)
			50 X 70 (N5-N8)	90 X 90 (N5-N9)
			40 X 65 (N9-N12)	70 X 70 (N10-N12)
	NTCC-04	1.338	50 X 95 (N1-N6)	105 X 105 (N1-N7)
			50 X 85 (N7-N10)	95 X 95 (N8-N12)
			40 X 65 (N11-N12)	
	NTCC-17	1.339	50 X 95 (N1-N6)	115 X 115 (N1-N7)
			50 X 85 (N7-N10)	100 X 100 (N8-N12)
			40 X 70 (N11-N12)	
15 niveles	Gruesas	1.350	45 X 90 (N1-N10)	120 X 120 (N1-N7)
			40 X 80 (N11-N15)	105 X 105 (N8-N13)
				85 X 85 (N14-N15)
	NTCC-04	1.347	60 X 100 (N1-N10)	155 X 155 (N1-N7)
			50 X 85 (N11-N15)	130 X 130 (N8-N13)
				100 X 100 (N14-N15)
	NTCC-17	1.338	60 X 100 (N1-N10)	170 X 170 (N1-N7)
			50 X 85 (N11-N15)	130 X 130 (N8-N13)
				100 X 100 (N14-N15)

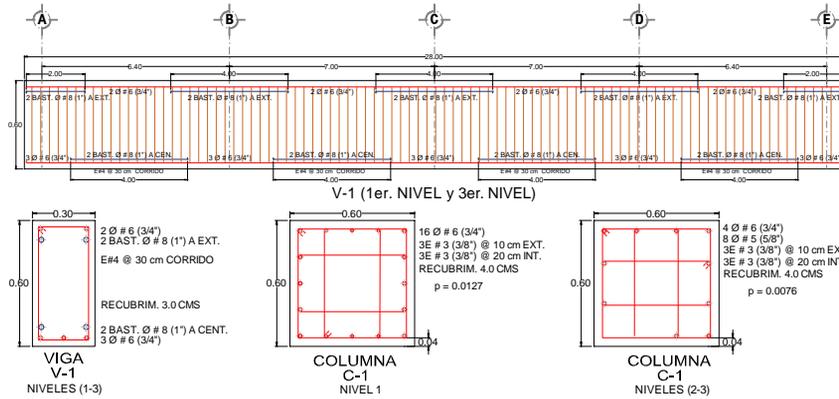
De la figura 5 se observa que, como es normal, cuando se emplean secciones gruesas para el cálculo de las rigideces efectivas, los volúmenes de concreto requeridos en todos los modelos son inferiores a aquéllos donde se consideran secciones agrietadas (34.39% inferior en el caso más crítico al comparar con los criterios de las NTCC-04). Sin embargo, para cumplir con los requerimientos de resistencia, al considerar secciones gruesas, la demanda de acero de refuerzo se incrementa, particularmente para los modelos de tres a nueve niveles, donde en varias secciones de vigas los momentos flexionantes de diseño se rigen por combinaciones de cargas verticales más que por combinaciones de cargas verticales con cargas por sismo. En los modelos de 12 y 15 niveles, el beneficio económico asociado al empleo de secciones gruesas es evidente, pues la demanda de concreto, cimbra y acero de refuerzo es menor respecto a los casos en que se consideran secciones agrietadas. En edificaciones de estas alturas normalmente el diseño por flexión de vigas lo rigen las combinaciones de cargas por sismo con cargas verticales con intensidad instantánea.



a) Secciones gruesas



b) NTCC-04



c) NTCC-17

Figura 4 Secciones transversales y detallado del acero de refuerzo de los elementos del marco de tres niveles considerando diferentes hipótesis para el cálculo de E_l

Es por ello que, contrario a lo esperado (si sólo se consideraran cargas de diseño por sismo), y debido a lo comentado en el párrafo anterior, los modelos de

tres y seis niveles en que se consideran secciones gruesas resultan con costos totales superiores a los obtenidos con base en los criterios de las NTCC-04. Sin embargo, en los modelos de nueve, 12 y 15 niveles se obtuvieron costos totales menores (7.25%, 15.76% y 18.52%, respectivamente), incrementándose la diferencia conforme se incrementa el número de niveles. Estos resultados indican que, para la zona de estudio considerada, el diseño de marcos de baja altura en que se considera el uso de secciones gruesas no necesariamente conduce a una reducción en el costo total del sistema estructural, por el impacto dominante en el diseño a flexión de vigas de cargas verticales exclusivamente. Sin embargo, el beneficio económico se incrementa conforme se incrementa la altura de los marcos. Por este y otros motivos, muchos de los ingenieros de la práctica recurren a este criterio para el análisis y diseño de estructuras de concreto reforzado.

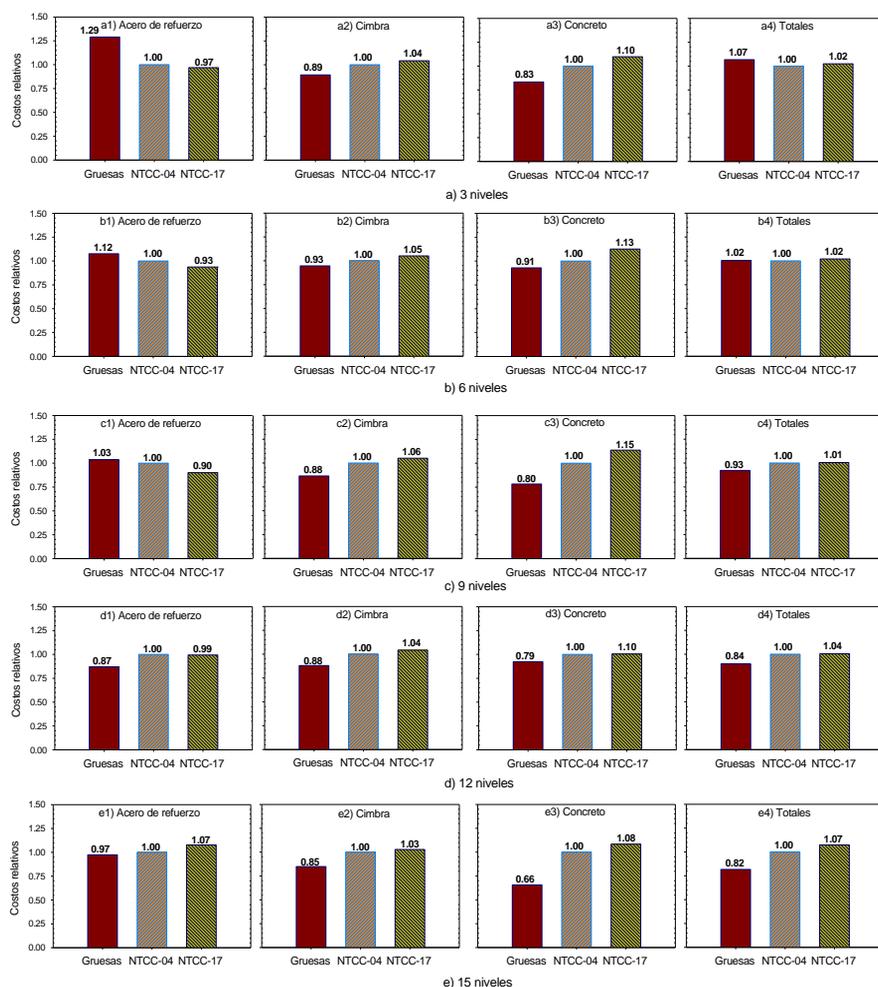


Figura 5 Comparativa de los costos relativos de materiales en marcos planos diseñados empleando diferentes hipótesis para el cálculo de E/e

Al comparar los resultados asociados a las nuevas NTCC (NTCC-17), se observa que en todos los casos existe una demanda de concreto mayor respecto a

la requerida al emplear los criterios de las NTCC-04 (con un incremento máximo de 14.58%, fig. 5c3). Por otro lado, con excepción del modelo de 15 niveles (fig. 5e1), la demanda de acero de refuerzo es inferior en todos los modelos diseñados con base en las NTCC-17. Al comparar los costos totales asociadas a estas dos hipótesis, se observan diferencias poco significativas, pues de los diseños basados en las NTCC-17 se obtuvieron incrementos del 2.34%, 1.91%, 0.97%, 4.23% y, 7.13% para los modelos de tres, seis, nueve, 12, 15 niveles, respectivamente.

Lo anterior indica que, a pesar del nuevo criterio considerado en las NTCC-17 para el cálculo de las rigideces efectivas en columnas ($EI_e=0.7EI$), no existe un incremento significativo en el costo final de los marcos diseñados con base dicha propuesta, respecto a lo obtenido con base en los criterios de las NTCC-04.

4. CONCLUSIONES

Se presentó un estudio en que se evalúa el impacto económico derivado de la aplicación de las nuevas Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTCC-17) referente al cálculo de rigideces efectivas a flexión (EI_e) en elementos estructurales de concreto reforzado. Para tal fin, se analizaron y diseñaron modelos de marcos planos de diferentes alturas considerando las siguientes variantes para la definición de EI_e : 1) uso de secciones gruesas, 2) uso de las hipótesis de las NTCC-04, 3) uso de las hipótesis de las NTCC-17. Para la evaluación del impacto económico derivado de la aplicación de las nuevas NTCC se definieron tres conceptos: a) costo asociado al concreto, b) costo asociado al acero de refuerzo y, c) costo asociado a la cimbra.

De los resultados expuestos, y reconociendo las limitantes del estudio, se pueden hacer los siguientes comentarios y observaciones:

- a) Como es normal, cuando se emplean secciones gruesas para el cálculo de las rigideces efectivas, los volúmenes de concreto requeridos en todos los modelos de marcos planos son inferiores a aquéllos donde se consideran secciones agrietadas (34.39% inferior en el caso más crítico). Sin embargo, al considerar dicha hipótesis, la demanda de acero de refuerzo se incrementa, particularmente para los modelos de tres a nueve niveles, porque en edificios de estas alturas las combinaciones por cargas verticales exclusivamente rigen frecuentemente el diseño a flexión de muchas vigas.
- b) En los modelos de 12 y 15 niveles, el beneficio económico es evidente, pues la demanda de acero de refuerzo es inferior. Es por ello que, contrario a lo esperado si sólo se consideraran cargas de diseño por sismo exclusivamente, los modelos de tres y seis niveles en que se consideran secciones gruesas resultan con costos totales superiores a los obtenidos con base en los criterios de las NTCC-04.
- c) Únicamente en los modelos de nueve, 12 y 15 niveles se obtuvieron costos totales menores (7.25%, 15.76% y 18.52%, respectivamente), incrementándose la diferencia conforme se incrementa el número de niveles. Estos resultados le sugieren a uno que, para marcos de baja altura, el criterio basado en el uso de secciones gruesas no necesariamente

conduce a una reducción en los costos totales del sistema estructural, debido a que en muchas ocasiones el diseño de las vigas a la flexión se rigen por combinaciones de cargas verticales exclusivamente. Únicamente para los modelos de 12 y 15 niveles existen ahorros significativos.

- d) Al comparar los resultados asociados a la nuevas NTCC (NTCC-17), se observó que en todos los casos existe una demanda de concreto mayor respecto a la requerida al emplear los criterios de las NTCC-04 (incrementos de hasta el 14.58%). Asimismo, con excepción del modelo de 15 niveles, la demanda de acero de refuerzo es inferior en todos los modelos diseñados con base en las NTCC-17. Sin embargo, al comparar los costos totales asociadas a estas dos hipótesis, se observan diferencias poco significativas, pues de los diseños basados en las NTCC-17 se obtuvieron incrementos del 2.34%, 1.91%, 0.97%, 4.23% y, 7.13% para los modelos de tres, seis, nueve, 12, 15 niveles, respectivamente.
- e) Lo anterior le sugiere a uno que, a pesar del nuevo criterio considerado para calcular las rigideces efectivas en columnas en las NTCC-17, no existe un incremento significativo en el costo final de los marcos diseñados con base dicha propuesta, respecto a lo obtenido con base en las NTCC-04, particularmente en edificios de seis niveles o menos, donde el diseño de muchas vigas a flexión se rige frecuentemente por combinaciones por cargas verticales exclusivamente.

5. AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece el apoyo de CONACYT para la elaboración de este estudio, como parte del Proyecto de Investigación de Ciencia Básica No. 258271 "Determinación de rigideces efectivas de elementos estructurales para el análisis por sismo de sistemas diseñados con base en marcos de concreto reforzado".

REFERENCIAS

1. ACI-2002 (2001), *Building code requirements for structural concrete, ACI 318-02 y ACI 318R-02*, Farmington Hills. (MI, USA) American Concrete Institute.
2. ACI 318-14 (2014), *Building code requirements for structural concrete (ACI-318-14) and commentary*, Farmington Hills. (MI, USA) American Concrete Institute.
3. Al-Zaid, R. Z., A. H. Al-Shaikh y M. N. Abud-Hussein (1991), "Effect of loading type on the effective moment of inertia of reinforced concrete beams", *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No. 2, marzo, pp. 184-190.
4. Duan, L., F. Wang y W. Chen (1989), "Flexural rigidity of reinforced concrete members", *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, Vol. 86, No. 4, julio, pp. 419-427.

5. Elwood, K. J. y M. O. Eberhard (2009), "Effective stiffness of reinforced concrete columns", *ACI Structural Journal*, julio-agosto, pp. 476-484.
6. España, S. F. (2016), "Influencia del agrietamiento en vigas durante el proceso de diseño sísmico de edificios de concreto reforzado", *Tesis de Licenciatura*, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chiapas, marzo.
7. FEMA-356 (2000), *NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings. FEMA publication 356*. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, noviembre.
8. 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.
9. Godínez, E. A., A. Tena y L. E. Pérez (2012), "Comportamiento sísmico de edificios con base en marcos dúctiles de concreto reforzado con contraventeo chevrón", *Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS*, No. 86, pp. 55-87.
10. Godínez, E. A. y F. López (2014), "Importancia del diseño de las conexiones viga-columna en la capacidad sismorresistente de edificios dúctiles de concreto reforzado en México", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, Vol. 19, No. 2, pp. 113-142.
11. González, O. M. y C. A. Becerra (2004), "Evaluación de las disposiciones de las NTCC 04 para calcular las rigideces de elementos de concreto reforzado", *Memorias, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Acapulco, Guerrero.
12. Khuntia, M. y S. K. Ghosh (2004a), "Flexural stiffness of reinforced concrete columns and beams: analytical approach", *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 3, mayo-junio, pp. 351-363.
13. Khuntia, M. y S. K. Ghosh (2004b), "Flexural stiffness of reinforced concrete columns and beams: Experimental verification", *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 3, mayo-junio, pp. 364-374.
14. Luna, J. L. y A. Tena (1999), "Estudio de los criterios del RCDF para el diseño sísmico de edificios regulares con marcos dúctiles de concreto reforzado", *Memorias, XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Morelia, México, Vol. II, pp. 1051-1060, noviembre.
15. Luna, J. L. y A. Tena (2000), "Estudio de los criterios del RCDF para el diseño sísmico de edificios regulares con base en marcos de concreto reforzado con baja ductilidad", *Memorias, XII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, León, México, CDROM, noviembre.

16. Nanguillasmú, H. J. y A. Tena (2016), "Requisitos mínimos de detallado dúctil en marcos de concreto reforzado protegidos con disipadores histeréticos de energía", *Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS*, No. 95, pp. 1-32.
17. NTCC-04 (2004), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto", *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, Tomo II, No. 103-BIS, octubre.
18. NTCC-17 (2017), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto", *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*, No. 220-BIS, diciembre.
19. NTCCA-04 (2004), "Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones", *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, Tomo II, No. 103-BIS, octubre.
20. NTCS-04 (2004), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo", *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, Tomo II, No. 103-BIS, octubre.
21. NZS-06 (2006), "Code of practice for the design of concrete structures", NZS 3101. *Standards Association of New Zealand*. Private Bag. Wellington.
22. Paulay, T. (1996), "Seismic design of concrete structures the present needs of societies", *Proceedings, 11th World Conference on Earthquake Engineering*, paper No. 2001. ISBN 0080428223.
23. Paulay, T. y M. J. N. Priestley (1992), *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*, John Wiley and Sons, Inc., New York.
24. RCDF-04 (2004), "Reglamento de Construcciones del Departamento del Distrito Federal", *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, octubre.
25. Rodríguez, M. E. y J. I. Restrepo (2012), "Práctica y diseño sísmico de edificios en México - Cambios necesarios", *Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS*, No. 86, pp. 89-118.
26. Tena, A., E. del Valle y E. Filloy (1996), "Evaluación de las recomendaciones del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal sobre el diseño por sismo de estructuras a base de marcos de concreto reforzado", *Reporte FJBS/CIS-96/06*, Centro de Investigación Sísmica, AC, Fundación Javier Barros Sierra, diciembre.
27. Tena, A. (2001), "Respuesta sísmica de edificios de concreto reforzado irregulares en esbeltez y en elevación diseñados para distorsiones de entrepiso altas", *Memorias, XIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Guadalajara, México, CDROM, noviembre.
28. Tena, A. y H. Correa (2008), "Evaluación de los criterios de diseño por sismo del RCDF para marcos dúctiles de concreto reforzado", *Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS*, No. 78, pp. 79-101.

29. Tena, A., H. Correa, J. Luna y G. Gatica (2008), "Seismic behavior of code-design medium rise special moment-resisting frame RC buildings in soft soils of Mexico City", *Engineering Structures*, Vol. 30, No. 12, pp. 3681-3707.
30. Tena, A. (2010), "Review of the soft first story irregularity condition of buildings for seismic design", *The Open Civil Engineering Journal*, Vol. 4, pp. 1-15.
31. Tena, A., G. Gatica, L. A. Urbina y L. Victoria (2012), "Impacto de la disposición de vigas secundarias en losas perimetralmente apoyadas en el comportamiento sísmico de edificios diseñados con base en marcos de concreto reforzado", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, Vol. 17, No. 1 y 2, pp. 63-85.
32. Tena, A. y J. Cortes (2014), "Impacto de la redundancia estructural en el comportamiento sísmico de marcos dúctiles de concreto reforzado", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, Vol. 19, No. 1, pp. 1-34.
33. Tena, A. (2007). *Análisis de estructuras con métodos matriciales*, primera edición, editorial Limusa, septiembre.
34. Tena, A. y H. Nanguillasmú (2013), "Diseño sísmico de marcos no dúctiles de concreto reforzado con disipadores de energía histeréticos: definición de parámetros de diseño", *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, Vol. 13, No. 2, pp. 275-299.
35. Villafuerte, H. (2020), "Diseño sísmico de estructuras de concreto reforzado considerando diferentes criterios para definir la rigidez efectiva de los elementos estructurales", *Tesis de Maestría*, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chiapas, (en desarrollo).
36. Wilson. SAP2000 (2015), "SAP2000 Nonlinear Version 18.0.1, Structural analysis program. Berkeley (California): Computer and Structures Inc.