

ESTUDIO DE LA EFICIENCIA EN EL CONTROL DE DESPLAZAMIENTOS LATERALES EN SISTEMAS DE PÓRTICOS¹

Luis G. Daza Duarte²

Resumen: En este trabajo se estudia la eficiencia de diversas técnicas en el control de las derivas (“drift”), debido a la acción de cargas laterales en sistemas de pórticos. Las variables analizadas fueron: a) incremento de la rigidez de las vigas, b) incremento de la rigidez de las columnas, c) cantidad de ejes de columnas y d) efecto de la relación geométrica largo/altura (L/H) o “aspect ratio” de los vanos del pórtico. Los resultados señalan que el incremento en la rigidez de vigas permite alcanzar eficiencias en la reducción de las derivas entre el 75% y el 89%. En cuanto a las columnas, la eficiencia fluctúa entre el 25% hasta el 50%. Cuando se analiza el efecto de aumentar la cantidad de ejes de columnas se aprecia que es mucho más efectivo aumentar la rigidez de las columnas que aumentar la profundidad de las vigas. Se evaluaron diferentes relaciones geométricas (L/H) de los pórticos variando entre 1.67 hasta 3.0. En este caso se pudo observar que al aumentar la cantidad de ejes de columnas, para diferentes relaciones geométricas de los vanos, la eficiencia en el control de los desplazamientos debido al aumento en la rigidez de las vigas disminuye entre un 5% hasta un 7%. Por el contrario, cuando se aumenta la rigidez de las columnas y también se aumenta la cantidad de ejes de columnas, la eficiencia en la reducción de desplazamientos aumenta un 12%. Las conclusiones, gráficas y resultados numéricos permiten hacer recomendaciones en cuanto a estrategias para el control de deformaciones, minimizar daños estructurales y evaluar de manera preliminar el efecto en la redundancia del edificio de cada una de las variables analizadas.

Palabras clave: derivas, rigidez, relación geométrica, pórticos, control de desplazamientos.

STUDY OF DRIFT CONTROL EFFICIENCY IN R/C FRAMES

Abstract: This work is focused on the efficiency of different techniques to control the inter-story drift due to lateral loads in reinforced concrete frames. The parameters under consideration were: a) increasing the beam stiffness, b) increasing the column stiffness, c) number of column lines, and d) effect of the geometrical shape of the frame (aspect ratio = L/H). The results of the study show that the increment in beam stiffness could achieve drift reduction between 75% and 89% and the increment in column stiffness could produce drift reductions ranging from 25% to 50%. The best approach to reduce the lateral displacements, when the number of column lines is increased, was found to be the increase in the column depths rather than in the beam depths. Several aspect ratios were analyzed, varying from 1.67 to 3.0. It was found that the increment of column lines and the increment of beam depths could lead to reduction from 5 to 7% of the drift control efficiency. However, when column lines and column stiffness are increased, the efficiency in drift control rise up to 12%. The conclusions, graphs, and numerical results can help to make recommendations regarding strategies to control drift, to minimize structural damages and for preliminary evaluation of the effect on the frame redundancy of each of the variables examined.

Keywords: aspect ratio, displacement control, frames, interstory drifts, stiffness.

INTRODUCCIÓN

En el proceso de diseño estructural uno de los objetivos más importantes es limitar los desplazamientos laterales, de forma tal que se minimicen los daños estructurales asociados a eventos extremos. En el caso de marcos rígidos puros, las

¹ Artículo recibido el 15 de julio de 2006 y en forma revisada el 10 de enero de 2007.

² Ph.D., P.E., Catedrático Asociado, Escuela de Arquitectura, Universidad de Puerto Rico en Río Piedras, P.O. Box 21909, San Juan, Puerto Rico 00931-1909. E-mail: lgdaza@yahoo.com.

alternativas disponibles para controlar los desplazamientos laterales consisten en el incremento en la rigidez de las vigas y/o las columnas (individual o simultáneamente), mantener una relación geométrica específica en los tramos de los pórticos, así como incorporar líneas de columnas adicionales. Estas estrategias muchas veces se exploran intuitivamente, requiriendo gran cantidad de tiempo en análisis estructurales comparativos, sin saber hasta qué rango son eficientes y cuándo dejan de serlo. Es importante señalar que existen estudios previos como el de Schultz (1986), quien presentó una derivación para estimar desplazamiento relativo entre pisos. Otro estudio posterior de este mismo autor (Schultz, 1993) ofrece un procedimiento para estimar la rigidez lateral por piso en pórticos elásticos.

La importancia del presente estudio y su principal contribución radica en que a partir de un análisis paramétrico en pórticos sometidos a cargas de terremoto, es posible sugerir al ingeniero estructural o al arquitecto las estrategias más eficientes para el control de desplazamientos y seleccionar la que resulte apropiada para un proyecto en particular. Adicionalmente, la simplicidad de las ecuaciones y la gran precisión de los resultados con respecto a métodos exactos, permite desarrollar curvas que ayudan a visualizar la eficiencia de las estrategias seleccionadas para controlar desplazamientos. En este trabajo se ha estudiado el efecto individual de las diferentes variables del problema y luego la combinación de algunas de ellas, tal como suele ocurrir en la práctica profesional.

Como estudios posteriores asociados con este estudio, hay dos temas que vale la pena investigar: a) la modificación de las ecuaciones y curvas paramétricas para sistemas de pórticos sometidos a cargas de viento y b) el análisis del comportamiento inelástico de los pórticos, generando nuevas ecuaciones y curvas, que puedan describir cuando se entra en rangos más allá del estado elástico. En este último caso, pudiera resultar de gran interés correlacionar cómo se afecta la redundancia de un edificio de pórticos cuando se selecciona una u otra alternativa para controlar desplazamientos.

CÓMPUTO DE DEFLEXIONES

Para efectos de análisis se estudiaron estructuras regulares mediante modelos computacionales y métodos aproximados. Debido a la gran eficiencia y al bajo margen de error del método aproximado (menos del 10%) se optó por incluir dicha metodología como parte de este estudio. Es importante destacar que los fundamentos de este procedimiento aproximado fueron desarrollados por el Dr. Milton Martínez Delgado (q.e.p.d) en su cátedra en el Recinto Universitario de Mayagüez (RUM), de quien el autor de este artículo tuvo el privilegio de ser estudiante.

Criterios básicos:

Para simplificar los análisis se asumen los siguientes aspectos:

- El armazón está sujeto a cargas puntuales laterales aplicadas en cada piso
- El punto de inflexión en las vigas se encuentra en el centro de cada tramo
- Las vigas y columnas tienen inercia constante en todas las naves de un mismo piso
- Las columnas no tienen carga uniforme aplicada a lo largo de su altura, por lo tanto no generan momentos fijos (o de empotramiento) en los extremos
- La deriva (“drift”) de cada columna es la misma que la de todo el piso.

La Figura 1 indica las condiciones típicas de los pórticos analizados: pórticos regulares con una relación geométrica constante, acción de cargas laterales puntuales correspondientes a los cortantes acumulados de cada nivel (“*story shear*”), las vigas y columnas no cambian de sección en un mismo nivel. El efecto de las cargas laterales en una columna típica y su deformación se presentan en la Figura 2.

Si utilizamos la ecuación pendiente-desplazamiento cuya expresión general es:

$$M_{AB} = M_{AB}^F - \frac{2E \cdot I_{AB}}{H_{AB}} \left(2\theta_A + \theta_B - \frac{3\Delta}{H_{AB}} \right) \quad (1)$$

Como las columnas no tienen carga en su interior los momentos fijos $M_{AB}^F = 0$, y haciendo uso del concepto de rigidez relativa $K_c = I_c/H$, $K_b = I_b/L$, para columnas y vigas, respectivamente, entonces la ecuación queda así:

$$M_{AB} = -2E \cdot K_{AB} \left(2\theta_A + \theta_B - \frac{3\Delta}{H_{AB}} \right) \quad (2)$$

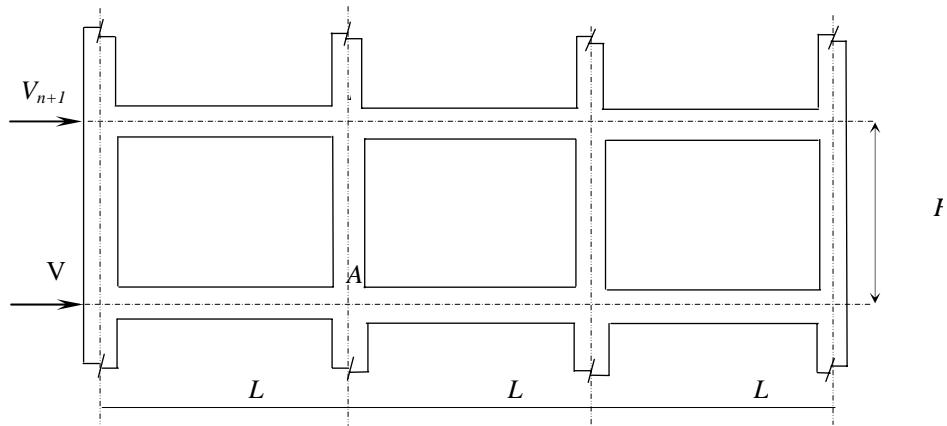
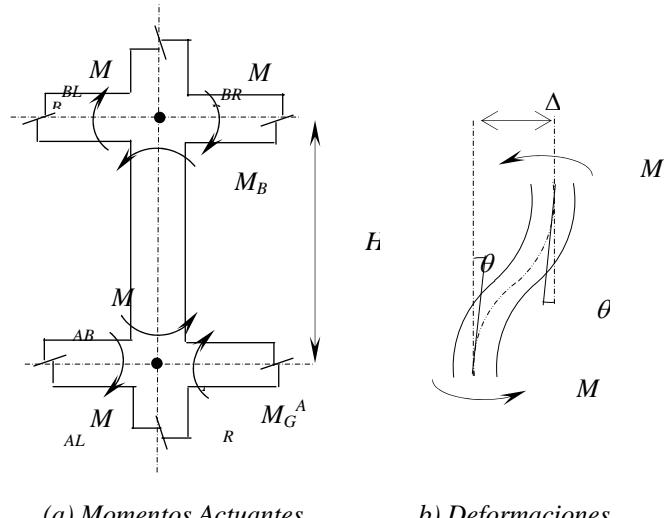


Figura 1: Diagrama general.



$$\frac{3 \cdot \Delta \cdot E}{H} = \frac{M_{AB}}{2K} + 2\theta_A \cdot E + \theta_B \cdot E \quad (3a)$$

$$\frac{3 \cdot \Delta \cdot E}{H} = \frac{M_{BA}}{2K} + 2\theta_B \cdot E + \theta_A \cdot E \quad (3b)$$

Sumando las ecuaciones (3a) y (3b) obtenemos la siguiente expresión:

$$\frac{6 \cdot \Delta \cdot E}{H_{\text{ext}}} = \frac{M_{AB} + M_{BA}}{2K_{\text{ext}}} + 3 \cdot \theta_A \cdot E + 3 \cdot \theta_B \cdot E \quad (4)$$

El comportamiento en las vigas con puntos de inflexión en el centro de cada tramo se puede estudiar según se ilustra en la Figura 3.

La pendiente θ_B se puede calcular resolviendo el diagrama de viga conjugada (Uribe, 2002); de la Figura 3b se puede expresar:

$$\theta_B = \frac{M_G^{BL} \cdot L_L}{12 \cdot E \cdot I_G} = \frac{M_G^{BL}}{12 \cdot E \cdot K_G^{BL}} \quad (5)$$

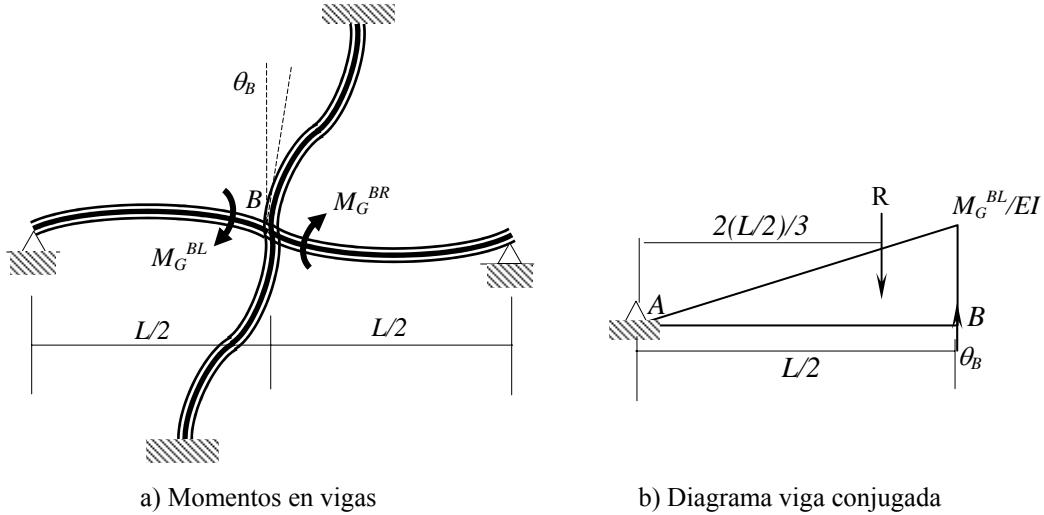


Figura 3: Momentos y rotaciones en las vigas.

La pendiente θ_B de la viga a la derecha del punto B también se puede obtener mediante el mismo procedimiento:

$$\theta_B = \frac{M_G^{BR} \cdot L_R}{12 \cdot E \cdot I_G} = \frac{M_G^{BR}}{12 \cdot E \cdot K_G^{BR}} \quad (6)$$

Sumando las ecuaciones (5) y (6) y según se asumió previamente que las vigas tienen rigidez constante en un mismo nivel ($K_G^{BR} = K_G^{BL}$), se obtiene:

$$\theta_B = \frac{1}{12 \cdot E \cdot K_G} (M_G^{BL} + M_G^{BR}) \quad (7)$$

Por analogía lo mismo sucede para la rotación en el otro extremo de la columna:

$$\theta_A = \frac{1}{12 \cdot E \cdot K_G} (M_G^{AL} + M_G^{AR}) \quad (8)$$

Si ahora multiplicamos la ecuación (4) por 2:

$$\frac{12 \cdot \Delta \cdot E}{H_{AB}} = \frac{M_{AB} + M_{BA}}{2K_{AB}} + 6 \cdot \theta_A \cdot E + 6 \cdot \theta_B \cdot E \quad (9)$$

y se reemplazan los valores de θ_A y θ_B de las ecuaciones (7) y (8) en la (9) para despejar el valor del desplazamiento:

$$\Delta = \frac{H_{AB}}{12E} \left[\frac{M_{AB} + M_{BA}}{K_C^{AB}} + \frac{M_G^{AL} + M_G^{AR}}{2K_G^A} + \frac{M_G^{BL} + M_G^{BR}}{2K_G^B} \right] \quad (10)$$

Debido a que los desplazamientos de cada columna debe ser el mismo desplazamiento de todo el piso, se debe entonces incluir la sumatoria de la rigidez de todas las vigas superiores e inferiores y las columnas del piso.

$$\Delta_i = \frac{H_i}{12E} \left[\frac{\sum(M_C^T + M_C^B)}{\sum K_C} + \frac{\sum M_G^T}{2 \sum K_G^T} + \frac{\sum M_G^B}{2 \sum K_G^B} \right] \quad (11)$$

donde:

M_C^T, M_C^B = momentos de las columnas superior e inferior, respectivamente,

M_G^T, M_G^B = momentos de las vigas superior e inferior, respectivamente,

K_C = rigidez relativa de las columnas

K_G^T, K_G^B = rigidez relativa de las vigas superior e inferior, respectivamente.

La sumatoria de todos los momentos de las columnas en los extremos superior e inferior debe igualar al efecto del cortante en el piso multiplicado por la altura del piso:

$$V_i H_i \approx \sum(M_C^T + M_C^B) \quad (12)$$

Reemplazando en la ecuación (11):

$$\Delta_i = \frac{H_i}{12E} \left[\frac{V_i H_i}{\sum K_C} + \frac{\sum M_G^T}{2 \sum K_G^T} + \frac{\sum M_G^B}{2 \sum K_G^B} \right] \quad (13)$$

El momento de vuelco en el piso es aproximadamente igual al promedio de la sumatoria de los momentos en las vigas superiores e inferiores:

$$V_i H_i \approx \frac{\sum(M_G^T + M_G^B)}{2} \quad (14)$$

Al reemplazar en la ecuación (13) se obtiene una expresión general para el desplazamiento del piso i debido a la carga lateral V_i :

$$\Delta_i = \frac{V_i \cdot H_i^2}{12E} \left[\frac{1}{\sum K_C} + \frac{1}{2 \sum K_G^T} + \frac{1}{2 \sum K_G^B} \right] \quad (15)$$

Esta expresión debe modificarse para el cómputo del desplazamiento del primer nivel dependiendo de la rigidez de la conexión a la fundación. Si las columnas están rígidamente conectadas a la fundación se puede asumir que $\sum K_G^B = \infty$. Entonces será:

$$\Delta_i = \frac{V_i \cdot H_i^2}{12E} \left[\frac{1}{\sum K_C} + \frac{1}{2 \sum K_G^T} \right] \quad (16)$$

De igual forma si la fundación es articulada la expresión a utilizar es:

$$\Delta_i = \frac{H_i}{3E} \left[\frac{V_i H_i}{\sum K_C} + \frac{\sum M_G^T}{4 \sum K_G^T} \right] \quad (17)$$

Finalmente, si desea incluir el efecto del cortante en la deformación la expresión a utilizar debe ser:

$$\Delta_i = \frac{V_i \cdot H_i^2}{12E} \left[\frac{1}{\sum K_c} + \frac{1}{2 \sum K_G^T} + \frac{1}{2 \sum K_G^B} \right] + \frac{1.2 \cdot V_i \cdot H_i}{G \cdot \sum A_i} \quad (18)$$

donde,

$\sum A_i$ = sumatoria de las áreas de todas las columnas del piso i

G = módulo cortante = $E/[2(1+\nu)]$.

DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO

Se analizaron pórticos regulares de hormigón en los cuales todos los vanos tienen la misma longitud y las vigas y columnas de un mismo nivel tienen secciones constantes. Es importante señalar que en cada caso de estudio, la intensidad del cortante lateral, calculado según el código UBC (1997), se mantuvo constante.

Las variables estudiadas en cada pórtico fueron las siguientes:

Caso-1: Pórticos con relación geométrica y líneas de columnas constantes

1. Aumento en la profundidad de las vigas: se hicieron incrementos de la altura desde 1 hasta 4 veces el ancho de la viga.
2. Aumento en la profundidad de las columnas: se hicieron incrementos de la profundidad de la columna desde 1 hasta 4 veces el ancho de la columna.

Caso-2: Pórticos con relación geométrica constante y líneas de columnas variables

1. Aumento en la profundidad de las vigas: se hicieron incrementos de la altura desde 1 hasta 4 veces el ancho de la viga. Se estudiaron pórticos con ejes de columnas desde 2 hasta 6.
2. Aumento en la profundidad de las columnas: se hicieron incrementos de la profundidad de la columna desde 1 hasta 4 veces el ancho de la columna. Se estudiaron pórticos con ejes de columnas desde 2 hasta 6.

Caso-3: Pórticos con líneas de columnas constantes y relación geométrica variable

1. Aumento en la profundidad de las vigas: se hicieron incrementos de la altura desde 1 hasta 4 veces el ancho de la viga. Se estudiaron pórticos con cuatro relaciones geométricas (L/H) de 1.67, 2.0, 2.5 y 3.0.
2. Aumento en la profundidad de las columnas: se hicieron incrementos de la profundidad de la columna desde 1 hasta 4 veces el ancho de la columna. Se estudiaron pórticos con cuatro relaciones geométricas (L/H) de 1.67, 2.0, 2.5 y 3.0.

ECUACIONES PARAMÉTRICAS

A partir de la ecuación (15), la cual arrojó buenos resultados, se hizo necesario transformar la expresión mediante los siguientes parámetros:

1. Asumir que $\sum K_G^T \approx \sum K_G^B$
2. Como todas las vigas y columnas mantienen inercias constantes se establece que:

$$\sum K_c = \frac{n \frac{b_c \cdot h_c^3}{12}}{H_c} = \frac{n \cdot b_c \cdot h_c^3}{12 \cdot H_c} \quad (19)$$

$$\sum K_G = \frac{(n-1) \frac{b_w \cdot h_G^3}{12}}{L_g} = \frac{(n-1) \cdot b_w \cdot h_G^3}{12 \cdot L_g} \quad (20)$$

3. La variación de las características geométricas de las columnas y vigas junto con la *relación geométrica* de los vanos de cada pórtico, se pueden definir mediante:

$$\gamma_c = h_c/b_c, \text{ (variando entre 1.0 hasta 4.0), siendo } h_c = \gamma_c \cdot b_c$$

$$\gamma_b = h_b/b_w, \text{ (variando entre 1.0 hasta 4.0), siendo } h_b = \gamma_b \cdot b_w$$

$$\gamma_f = L_g/H_c, \text{ (tomando valores de 1.67, 2.0, 2.5 y 3.0), } L = \gamma_f \cdot H$$

4. En cuanto al módulo de elasticidad del concreto se consideró una resistencia promedio $f'_c = 4,000 \text{ psi}$, lo que equivale a un valor de $E = 3,605 \text{ ksi}$ ($E = 57\sqrt{f'_c}$).

Si reemplazamos todos estos términos en la ecuación (15) y hacemos los ajustes respectivos al manejo de unidades, se llega a la siguiente expresión:

$$\Delta_i \approx \frac{V_i \cdot H_i^3}{2} \left[\frac{1}{n \cdot \gamma_c^3 \cdot b_c^4} + \frac{\gamma_f}{(n-1) \gamma_b^3 \cdot b_w^4} \right] \quad (21)$$

donde:

Δ_i = deriva del piso i ("drift") [pulgadas]

V_i = cortante acumulado del piso i ("story shear") [kips]

H_i = altura del piso i [pies]

n = cantidad de ejes de columnas del pórtico

b_w = ancho de las vigas [in]

b_c = ancho de las columnas [in]

$\gamma_c, \gamma_b, \gamma_f$ = factores de forma para columnas, vigas y los vanos del pórtico, respectivamente.

APLICACIONES

El siguiente ejemplo es un pórtico plano utilizado como parte de las aplicaciones de las expresiones anteriormente desarrolladas y que sirvió para calibrar los resultados obtenidos por métodos matriciales.

La Figura 4 muestra su geometría y las cargas laterales calculadas siguiendo los requisitos básicos del código UBC-1997.

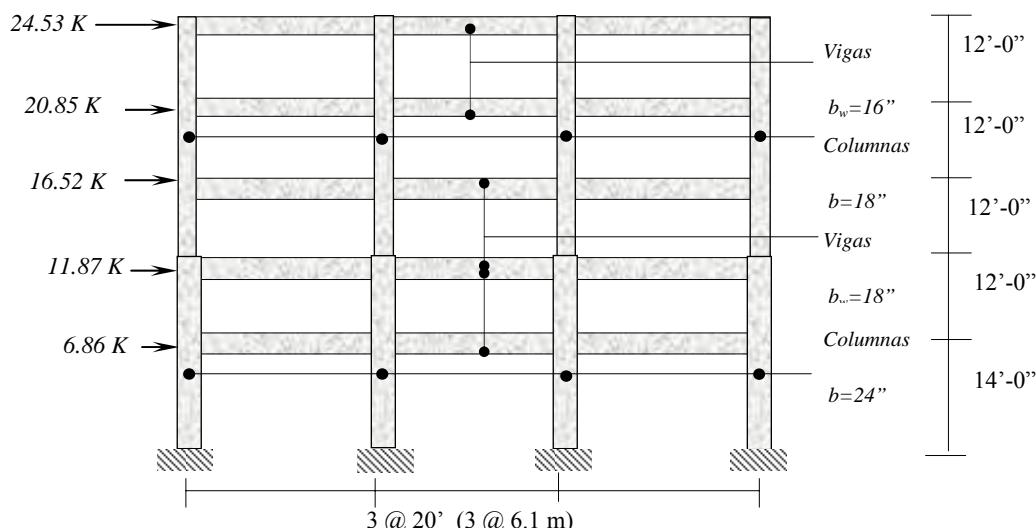


Figura 4: Pórtico de 5 niveles.

Al comparar los resultados mediante métodos computacionales (Computers and Structures, 2005) y mediante la expresión aproximada desarrollada en la ecuación (15), se pudo encontrar que las derivas obtenidas tenían una precisión aceptable. La Tabla 1 resume estos resultados.

Tabla 1: Comparación de resultados en un pórtico de 5 niveles.

Nivel	H_i [ft]	V_i [kip]	Cortante por piso [kip]	Deriva usando ETABS [in]	Deriva usando ecuación (15) [in]	Margen de error [%]
Techo	62 [18.9 m]	24.53	24.53	0.126 [0.32 cm]	0.117 [0.3 cm]	-7.1 %
4º	50 [15.2 m]	20.85	45.38	0.203 [0.52 cm]	0.197 [0.5 cm]	-3.0 %
3º	38 [11.6 m]	16.52	61.90	0.254 [0.65 cm]	0.242 [0.61 cm]	-4.72 %
2º	26 [7.92 m]	11.87	73.77	0.187 [0.47 cm]	0.186 [0.47 cm]	-0.5 %
1º	14 [4.27 m]	6.86	80.63	0.164 [0.42 cm]	0.186 [0.47 cm]	+13.4 %

RESULTADOS

Los resultados que se presentan corresponden a un piso típico particular (4^º nivel) del pórtico mostrado anteriormente en la Figura 4. Sólo se considera el efecto de cargas de terremoto y se acepta que los desplazamientos obtenidos mediante las ecuaciones (15) y (21) son muy cercanos a los valores obtenidos mediante métodos matriciales. De igual forma se aclara que la magnitud de las cargas de terremoto se ajustó para el caso cuando se estudia el efecto de aumentar la cantidad de líneas de columnas.

El ancho de vigas y columnas se mantuvo constante en todos los casos (16 y 18 pulgadas, respectivamente); a partir de estos valores se incrementaron sus profundidades de vigas con factores de forma variando entre 1.0 hasta 4.0.

Es importante notar que los resultados están en función de la razón de deriva entre pisos (“*interstory drift ratio*”) en lugar de presentar derivas absolutas. Esto permite visualizar la manera cómo se afectan las variables del estudio, tales como la modificación de rigidez de los elementos, la cantidad de ejes de columnas y la relación geométrica del pórtico, y su relación con la eficiencia en la reducción de desplazamientos laterales.

Efecto de la variación de la rigidez de las vigas:

Manteniendo el ancho de las vigas constante, se modificó el valor de la altura de las vigas en todos los pisos, variando γ_b desde 1.0 hasta 4.0. En este caso se mantuvo constante el tamaño de las columnas y se estudió el efecto del aumento en la rigidez de las vigas cuando aumenta la *relación geométrica* de los pórticos (para valores de γ_b de 1.67, 2.0, 2.5 y 3.0). Puede verse que en cada análisis también se consideró el efecto de aumentar la cantidad de líneas de columnas, asumiendo que todas ellas tienen la misma rigidez para un mismo piso.

Independientemente de la cantidad de ejes de columnas, la eficiencia en la disminución de las derivas se logra con factores de aumento en la profundidad de las vigas entre 1.0 hasta 2.5 veces el ancho de las vigas. Incrementos mayores de 2.5 no aportan disminución significativa de los desplazamientos entre niveles.

De igual forma se aprecia que los niveles de desplazamiento son mayores a medida que se aumenta la relación geométrica de los pórticos (“*aspect ratio*”). Sin embargo, cuando se aumenta significativamente la rigidez de las vigas los niveles de desplazamiento tienden a estabilizarse (en este caso entre 0.05% hasta 0.08 %, para todas las relaciones geométricas estudiadas), denotando que a pesar del aumento en rigidez adicional de las vigas ya no tienen efecto significativo en el control de los desplazamientos del piso.

Efecto de la variación de la rigidez de las columnas:

Al igual que en el caso anterior, se mantuvo un ancho constante de columnas y se aumentó la profundidad de las columnas con factores de forma γ_c variando desde 1.0 hasta 4.0. También se estudiaron los efectos de la *relación geométrica* de los pórticos para valores de γ_c de 1.67, 2.0, 2.5 y 3.0. Los resultados que se observan en las Figuras 9 hasta la Figura 12, indican los niveles de desplazamiento lateral son mucho menores cuando se aumenta la rigidez de las columnas que cuando se hace lo propio con la rigidez de las vigas.

En este caso particular la reducción significativa de los desplazamientos laterales de un nivel se logra con factores de incremento en el tamaño de las columnas hasta 2.0. Incrementos mayores en rigidez permiten disminuir los

desplazamientos pero no al ritmo que ocurre para factores de forma entre 1.0 y 2.0. El efecto de la cantidad de ejes de columnas no parece ser significativo para factores de aumento en rigidez de columnas mayores de 3.0. Se aprecia una convergencia en el nivel de desplazamientos en todos los casos: 0.07%, 0.08%, 0.10% y 0.12%, para relaciones geométricas γ_f de 1.67, 2.0, 2.5 y 3.0, respectivamente.

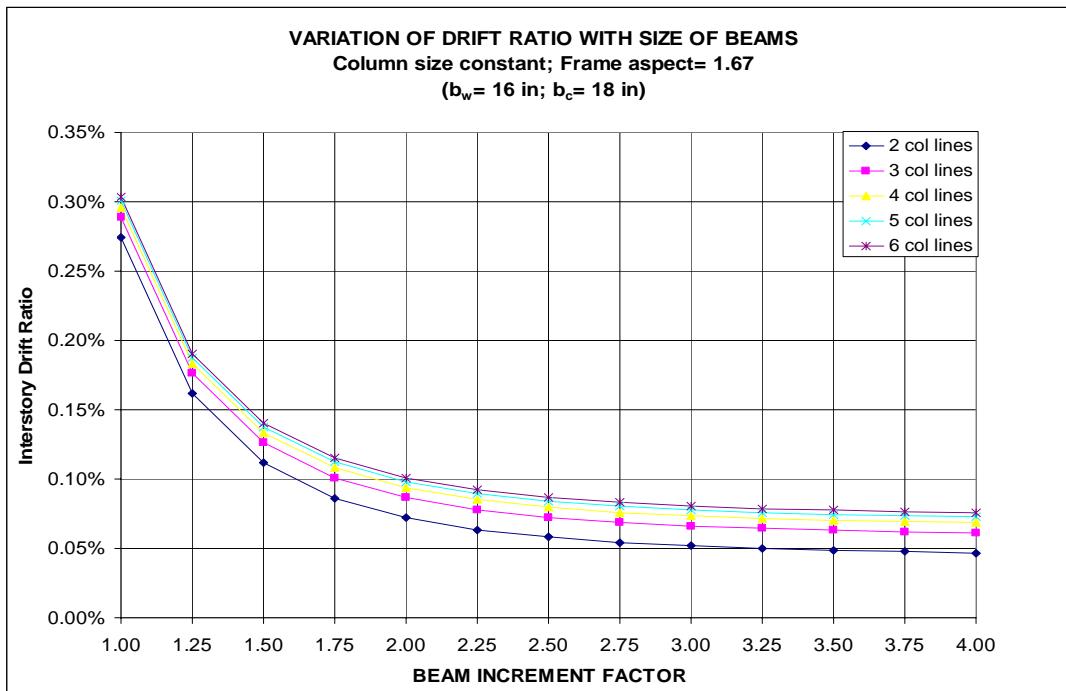


Figura 5: Aumento en la rigidez de las vigas vs. Derivas (“drift ratio”) ($\gamma_f = 1.67$).

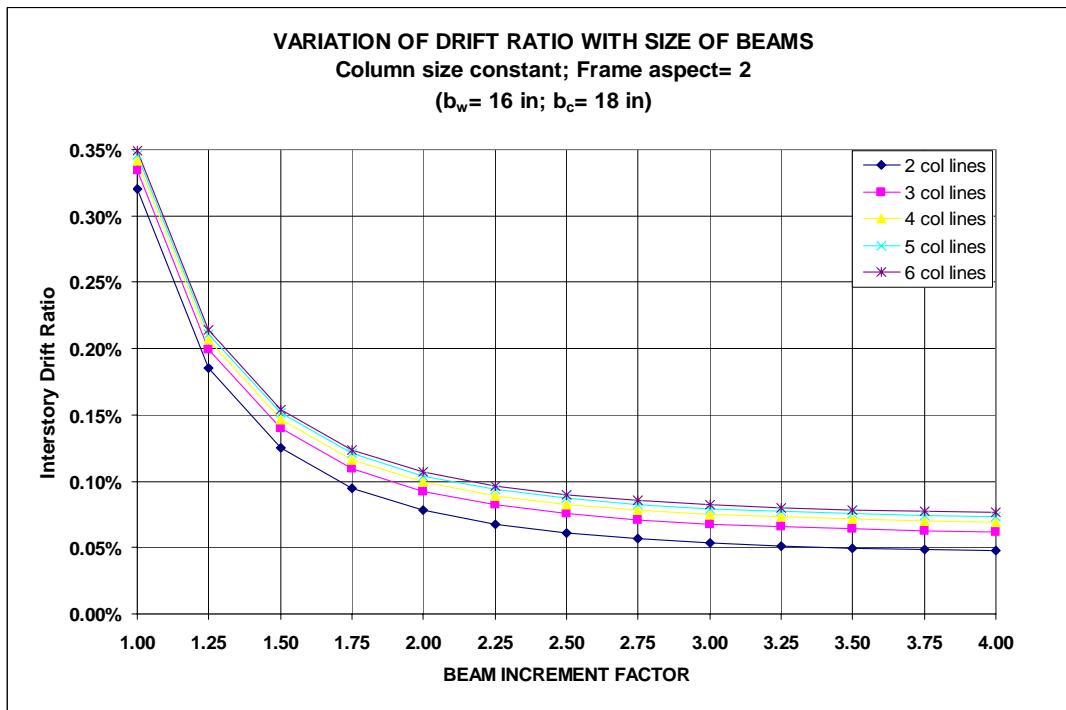


Figura 6: Aumento en la rigidez de las vigas vs. Derivas (“drift ratio”) ($\gamma_f = 2.0$).

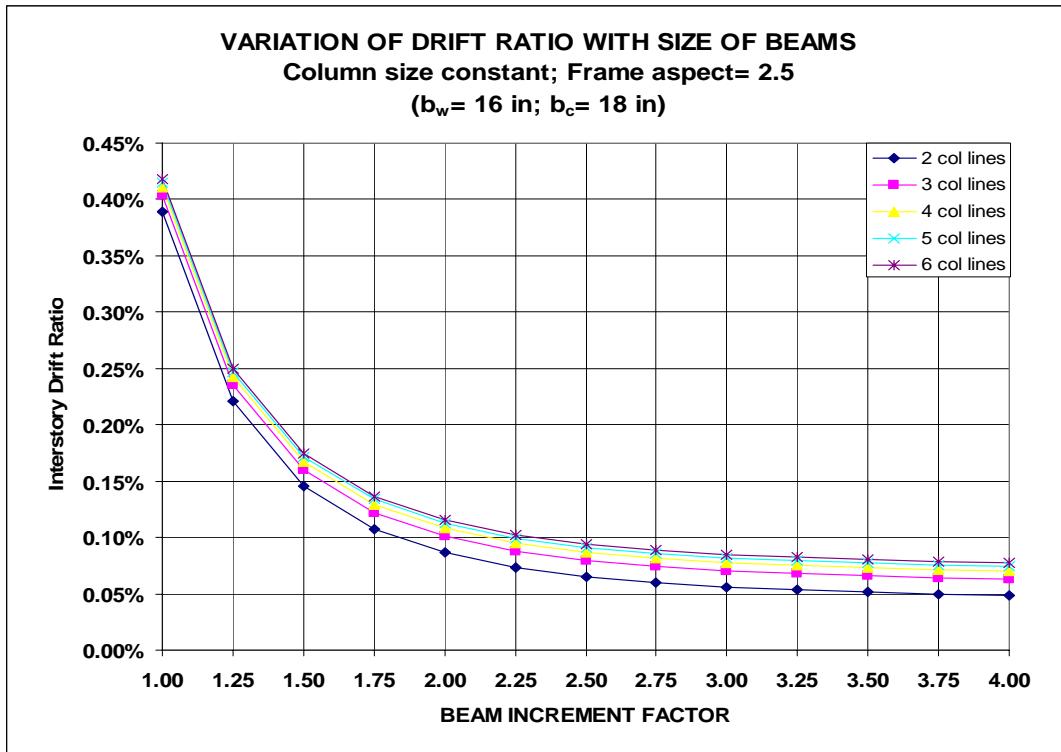


Figura 7: Aumento en la rigidez de las vigas vs. Derivas (“drift ratio”) ($\gamma_f = 2.5$).

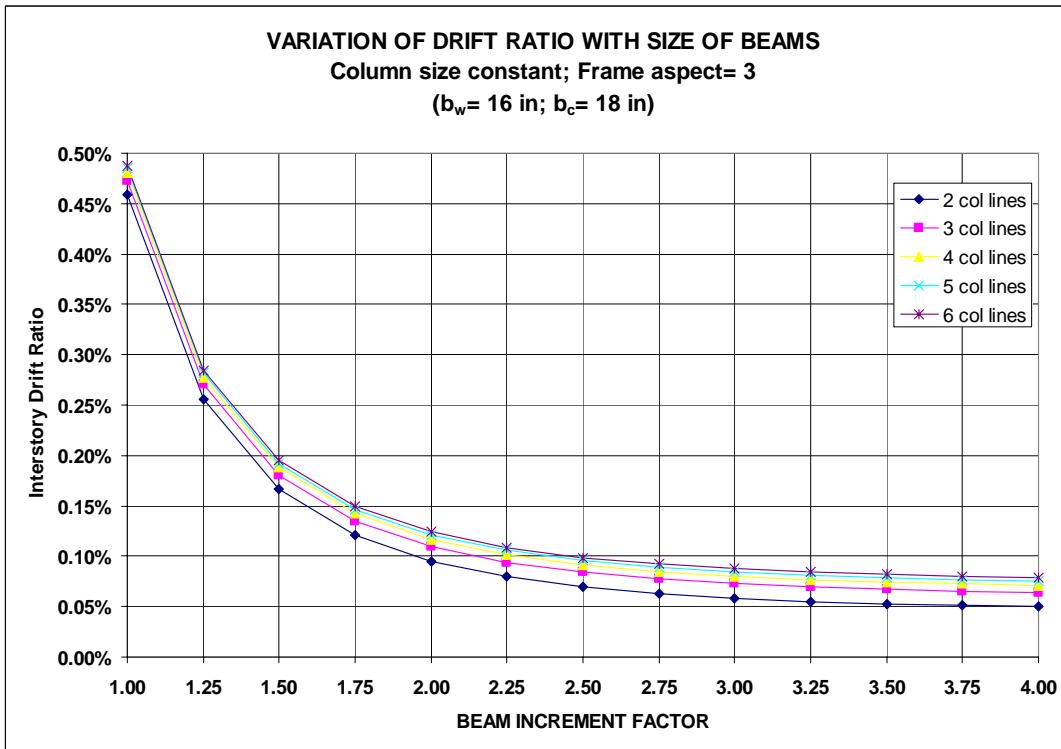


Figura 8: Aumento en la rigidez de las vigas vs. Derivas (“drift ratio”) ($\gamma_f = 3.0$).

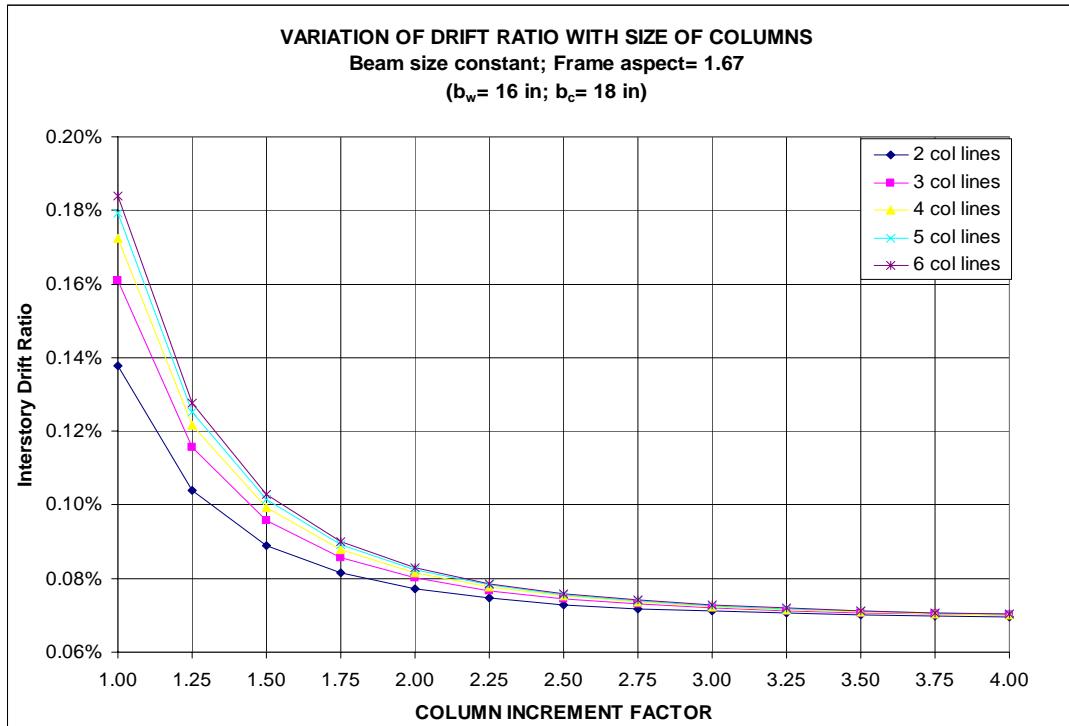


Figura 9: Aumento en la rigidez de las columnas vs. Derivas (“drift ratio”) ($\gamma_f = 1.67$).

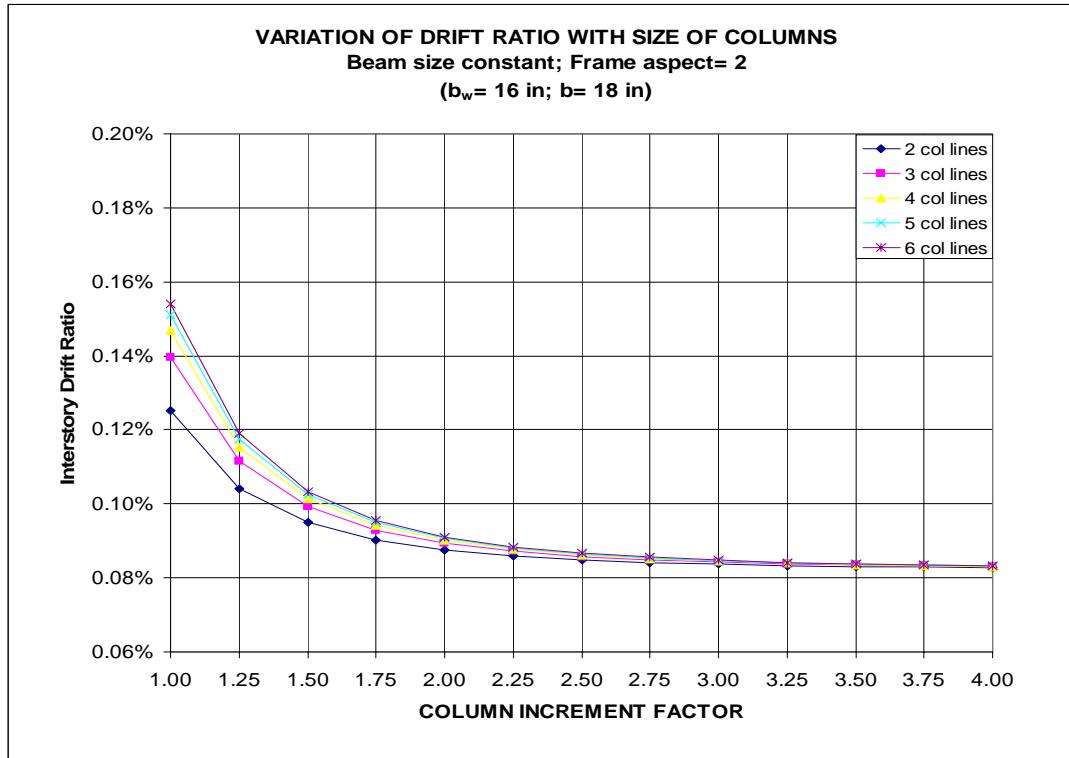


Figura 10: Aumento en la rigidez de las columnas vs. Derivas (“drift ratio”) ($\gamma_f = 2.0$).

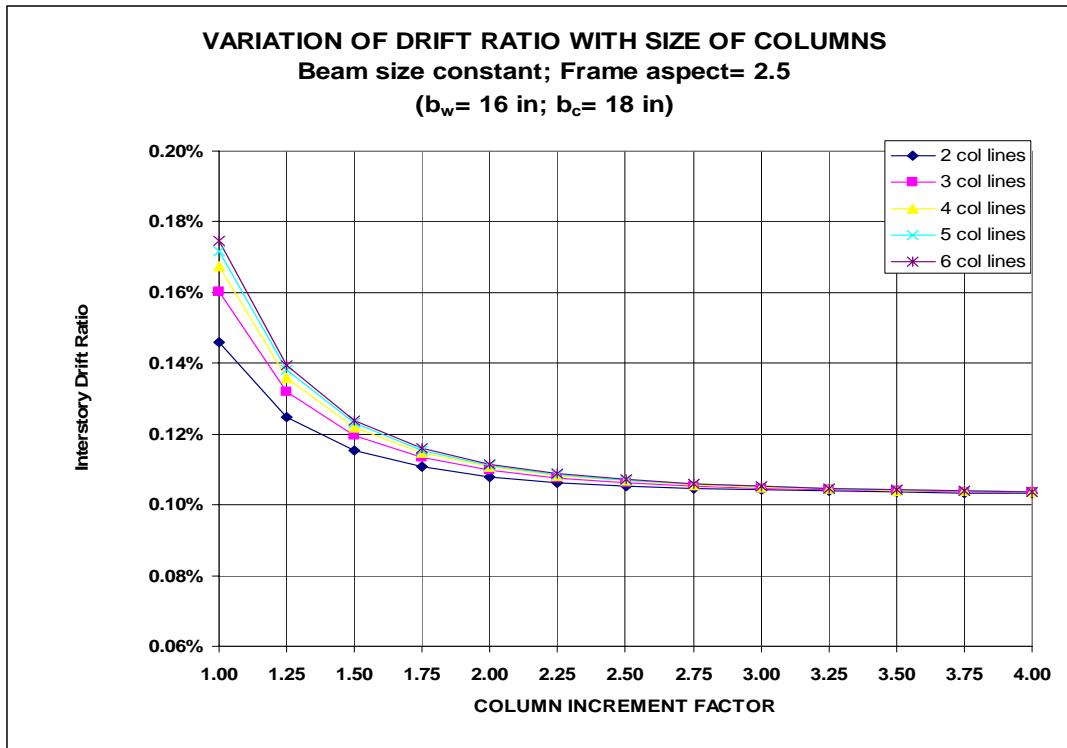


Figura 11: Aumento en la rigidez de las columnas vs. Derivas (“drift ratio”) ($\gamma_f = 2.5$).

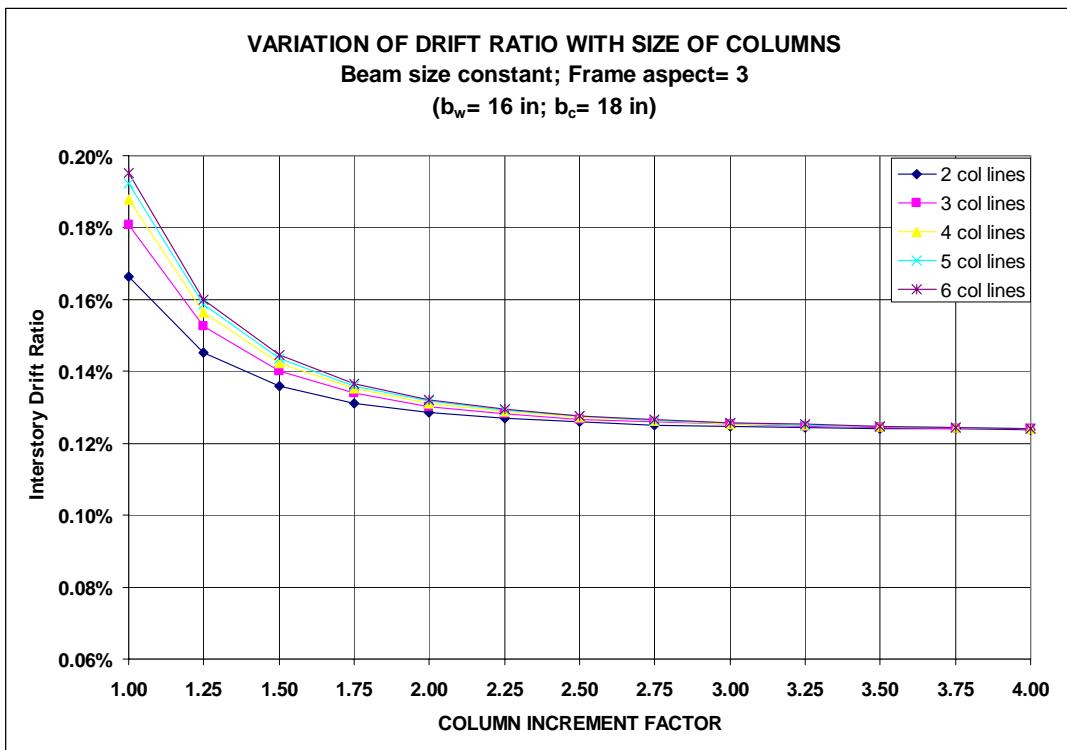


Figura 12: Aumento en la Rigidez de las Columnas vs. Derivas (“Drift ratio”) ($\gamma_f = 3.0$).

Eficiencia del aumento en la rigidez de las vigas vs. número de ejes de columnas:

La eficiencia en el control de desplazamientos se define como la disminución porcentual de la deriva de un nivel dado, calculada para el menor factor de forma versus la deriva calculada cuando dicho factor es máximo. Numéricamente se puede expresar este concepto mediante el siguiente ejemplo: Para el piso 4^{to} del pórtico descrito en la Figura 4, con los siguientes parámetros constantes: $n = 4$; $\gamma_f = 1.67$ y $\gamma_c = 1.0$, se pueden obtener las siguientes derivas: $\Delta^4_1 = 0.426$ pulgadas (para $\gamma_b = 1$) y $\Delta^4_4 = 0.099$ pulgadas (para $\gamma_b = 4$), por lo tanto la eficiencia calculada es:

$$E^n = \frac{(\Delta_{\max}^n - \Delta_{\min}^n)}{\Delta_{\max}^n} \cdot 100 \quad E^4 = \frac{(0.426" - 0.099")}{0.426"} \cdot 100 = 76.7\% \quad (22)$$

La Figura 13 señala que para pórticos con una misma relación geométrica, la eficiencia del efecto de aumentar la rigidez de las vigas ($1.0 \leq \gamma_f \leq 4.0$) disminuye a medida que aumenta la cantidad de ejes de columnas. La pérdida de eficiencia es mayor en pórticos con relaciones geométricas bajas. En otras palabras, la eficiencia de las vigas para disminuir los desplazamientos laterales se nota más en pórticos con relaciones geométricas mayores. Puede notarse que en todos los casos la eficiencia en la reducción de desplazamientos laterales es al menos del 75 % para una relación geométrica de 1.67 y puede alcanzar valores máximos de hasta un 88% para relación geométrica de 3.0.

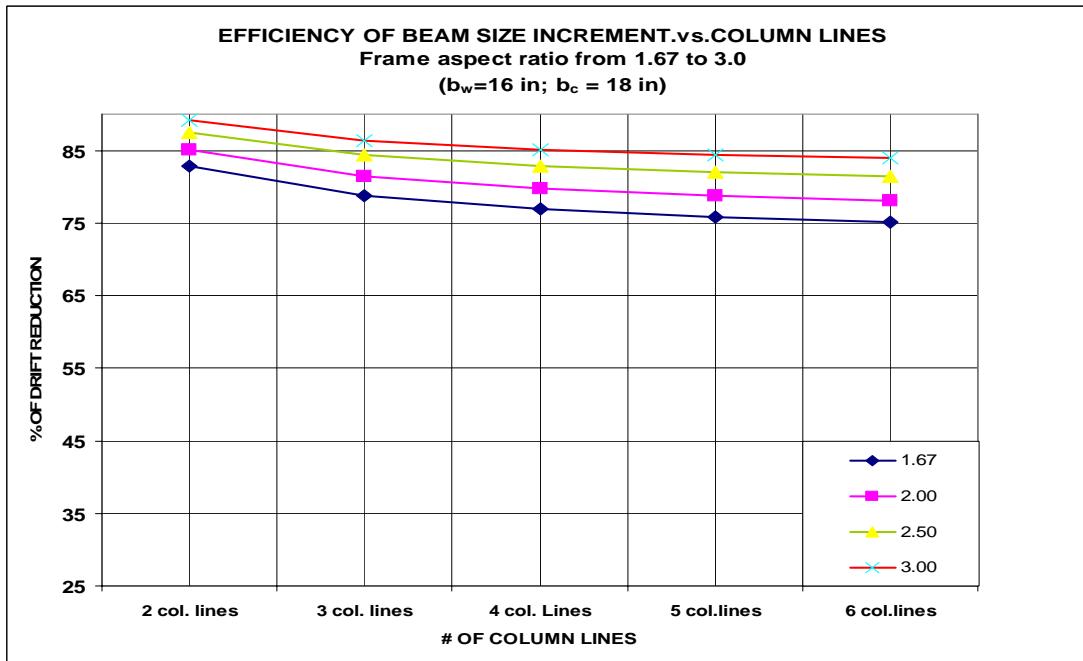


Figura 13: Aumento en la rigidez de las vigas vs. cantidad de columnas.

Eficiencia del aumento en la rigidez de las columnas vs. número de ejes de columnas:

La Figura 14 muestra que cuando se decide aumentar la rigidez de las columnas y simultáneamente se aumenta la cantidad de ejes de columnas, la eficiencia de esta estrategia en el control de los desplazamientos aumenta consistentemente en todos los casos, independientemente del valor de la relación geométrica. Las eficiencias mayores en el control de desplazamientos se logran en pórticos con bajas relaciones geométricas.

Cuando se aumenta la rigidez de las columnas la eficiencia en la reducción de desplazamientos fluctúa entre un 26% hasta un 50%; valores que resultan inferiores a las eficiencias alcanzadas cuando se aumenta la rigidez de las vigas. Estas eficiencias pueden cambiar dependiendo de los anchos de vigas y columnas asumidos originalmente. Para este estudio $b_w = 16$ pulgadas y $b_c = 18$ pulgadas.

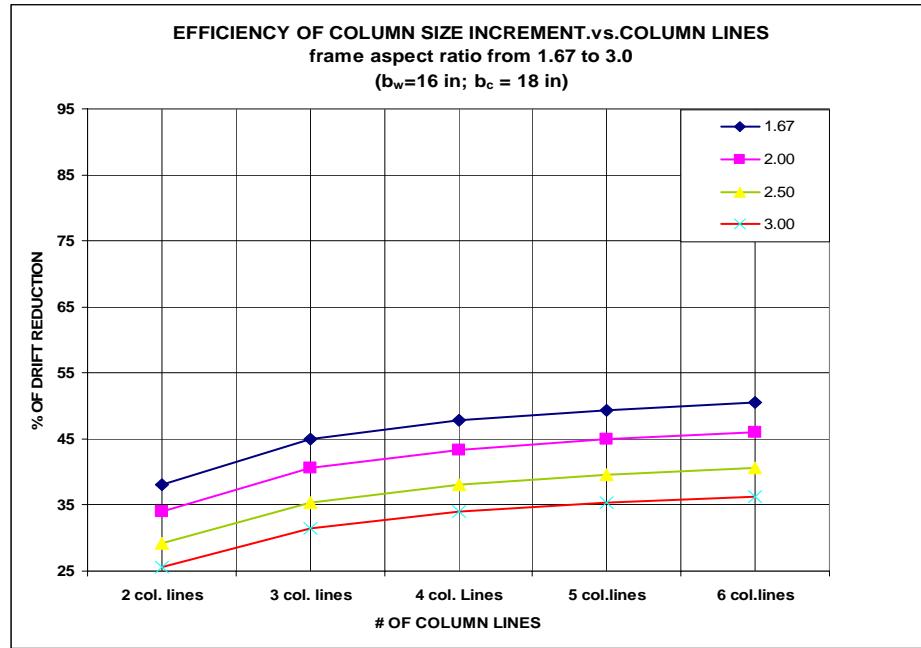


Figura 14: Aumento en la rigidez de las columnas vs. cantidad de columnas.

Eficiencia del aumento en la rigidez de las vigas vs. relación geométrica:

Cuando se incrementa la relación geométrica de los pórticos la eficiencia que se logra al incrementar la rigidez de las vigas es mayor. La magnitud de tales eficiencias es más notoria cuando la cantidad de ejes de columnas es baja. La Figura 15 muestra este comportamiento y es posible observar que para una misma relación geométrica, a medida que aumenta la cantidad de ejes de columnas, la diferencia relativa entre cada curva se va reduciendo.

Para el nivel analizado (4^{to} nivel) se puede apreciar que por cada 0.5 de aumento en la relación geométrica se logra un aumento de un 2.5% en la eficiencia de la rigidez de las vigas para controlar los desplazamientos laterales del piso.

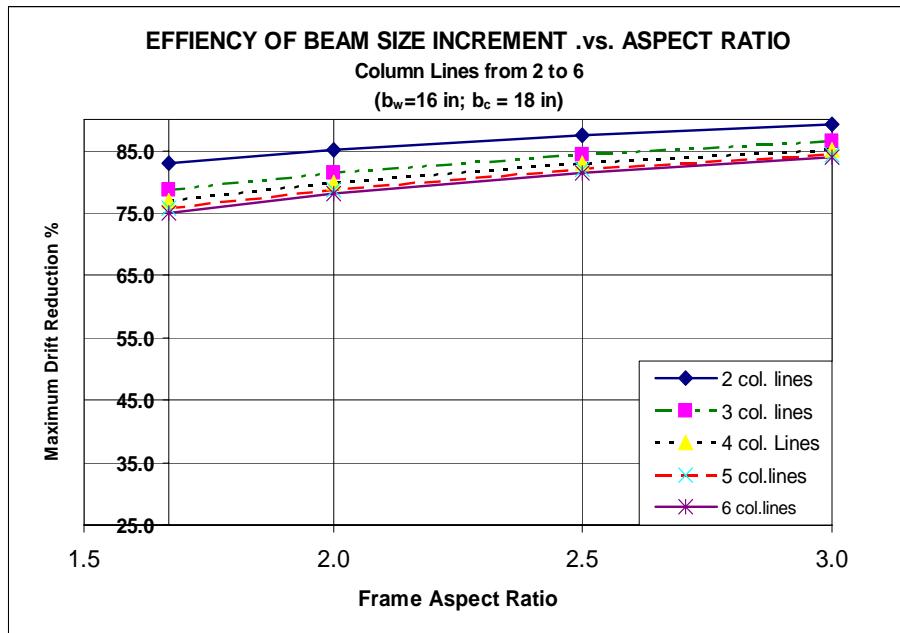


Figura 15: Eficiencia del aumento en rigidez de las vigas para diferentes relaciones geométricas.

Eficiencia del aumento en la rigidez de las columnas vs. relación geométrica:

El comportamiento que se registra en la Figura 16 indica que el aumento en la rigidez de las columnas al aumentar la relación geométrica de los pórticos (manteniendo constante la cantidad de ejes de columnas), representa un efecto de pérdida de eficiencia en el control de los desplazamientos laterales y por ende en el control las derivas (“*interstory drift ratios*”).

De las curvas obtenidas para el pórtico y nivel analizados, se puede apreciar que por cada $\frac{1}{2}$ punto en el aumento de la relación geométrica, cuando se aumenta la rigidez de las columnas hay aproximadamente una disminución de un 5% en la efectividad para controlar los desplazamientos laterales.

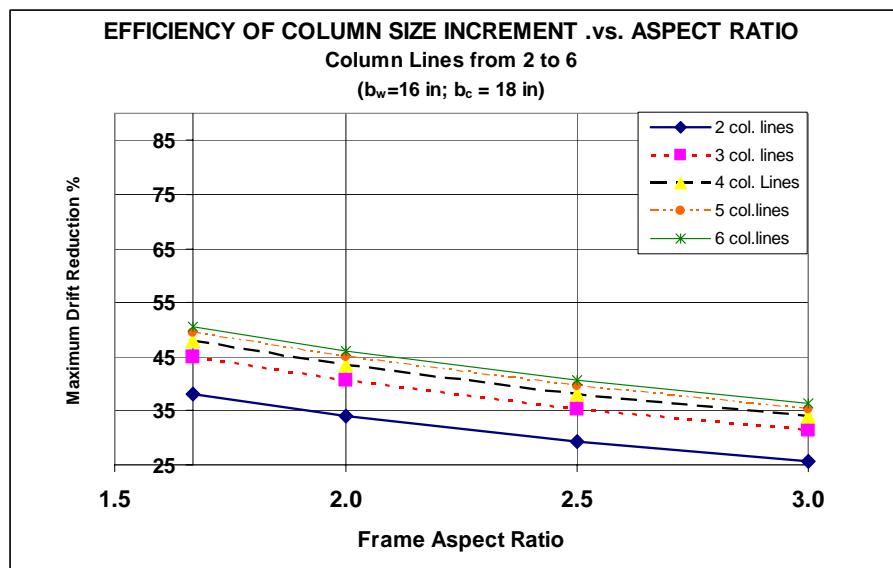


Figura 16: Eficiencia del aumento en rigidez de las columnas para diferentes relaciones geométricas.

CONCLUSIONES

En los cálculos de los desplazamientos no se consideró el comportamiento inelástico de los elementos de los pórticos, ni la degradación de rigidez de los mismos. Las cargas aplicadas siguen el patrón unidireccional resultante de la aplicación del método cuasi-estático del código UBC 1997. De los resultados obtenidos podemos destacar las siguientes observaciones cuando se modifica la rigidez de los elementos estructurales:

- Los porcentajes de eficiencia de las vigas en cuanto al control de las deformaciones, resultan ser mayores que los de las columnas cuando sus factores de forma fluctúan entre 1.0 y 2.5 veces el ancho de la sección. Factores de forma mayores de 2.5 no aportan reducciones significativas en los desplazamientos.
- A pesar de que los porcentajes de eficiencia en el control las deformaciones por parte de las columnas es menor que el de las vigas, la magnitud de los desplazamientos calculados resultan ser mucho menores cuando se decide aumentar la rigidez de las columnas. Factores de incremento en la sección de las columnas entre 1.0 y 2.0 permiten obtener resultados óptimos para controlar desplazamientos; no obstante factores de incrementos mayores permiten seguir reduciendo los desplazamientos hasta niveles que tienden a converger independientemente de la cantidad de líneas de columnas.
- A medida que se aumenta la relación geométrica de los pórticos y se incrementa la rigidez de las vigas, la eficiencia en el control de los desplazamientos es consistentemente creciente.
- A medida que se aumenta la relación geométrica de los pórticos y se incrementa la rigidez de las columnas, la eficiencia en el control de los desplazamientos es decreciente, sobre todo cuando se tiene menos cantidad de ejes de columnas.

- e) El efecto de aumentar la cantidad de ejes de columnas cuando se mantiene constante el factor de aumento de rigidez de las vigas (γ_f =constante) indica que para todas las relaciones geométricas de los pórticos, se registra una leve disminución entre un 5 a un 7% en la eficiencia para controlar las derivas de un nivel particular. Sin embargo, el efecto es contrario en el caso de las columnas: si se aumenta la cantidad de ejes de columnas (para un factor γ_c constante) hay un aumento en la eficiencia de por lo menos un 10% en el control de desplazamientos.

REFERENCIAS

- Computers and Structures (2005). “*Extended Three Dimensional Analysis of Building Systems: ETABS*”, Versión 8.4.8, Berkeley, California.
- International Conference of Building Officials (1997). “*Uniform Building Code, Vol. 2*”, Whittier, California.
- Martínez, M. (1994). “*Un método Aproximado Para el Cálculo de Deflexiones de Armazones*”, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, Notas de clase del curso de Diseño de Edificios Multipisos.
- Uribe, J. (2002). “*Análisis de Estructuras*”, 2da Edición, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá, Colombia, pág. 142.
- Schultz, A. (1986). “An experimental and analytical study of the earthquake response of R/C frames with yielding columns”, Ph.D. dissertation, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Schultz, A. (1993). “Approximating lateral stiffness of stories in elastic frames”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 118, No. 1, pp. 243-263.