

Estimación de la localización del sistema estructural Outrigger basado en el cambio de rigidez en edificios altos

Estimation of the location of the Outrigger structural system based on the change in stiffness in tall buildings

E. Pérez-Isidro ^a, J.E. Ceron-Carballo ^a, H. I. Navarro-Gómez ^a, C. Rodríguez-Álvarez ^a, G. Ramos-Torres ^b

^a Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^b Departamento de Ingeniería Civil y Minas, Universidad del Estado de Sonora, Hermosillo, Sonora, C.P. 83000.

Resumen

Un edificio de gran altura, está asociado a la construcción de un considerable número de niveles y relacionándolo a grandes desplazamientos laterales debido a cargas dinámicas como sismo y viento. En estos edificios el sistema Outrigger permite atenuar estos desplazamientos, sin embargo, encontrar la mejor localización ha sido una variante que se ha dejado en la experimentación y experiencia del calculista. En este trabajo se propone encontrar la mejor localización, analizando los cambios de los centros de torsión entre niveles en dos edificios tridimensionales de concreto reforzado. Se analizaron dos edificios 20 y 30 niveles, con una relación de esbeltez de 0.375 y 0.225, 0.25 y 0.15, respectivamente; se colocaron en dos, tres y cuatro sistemas Outrigger variando su localización a lo largo de la altura. El mejor comportamiento estructural se localizó en los edificios con mayor esbeltez (0.225 y 0.15), es decir, edificios con mayor altura y menor base, y con el menor número de sistemas Outrigger.

Palabras Clave: Edificios altos, Outrigger, excentricidad torsional.

Abstract

A high-rise building is associated with the construction of a considerable number of levels and is related to large lateral displacements due to dynamic loads such as earthquakes and wind. In these buildings the Outrigger system allows these displacements to be mitigated, however, finding the best location has been a variant that has been left to the experimentation and experience of the calculator. In this work, it is proposed to find the best location, analyzing the changes of the torsion centers between levels in two three-dimensional reinforced concrete buildings. Two buildings 20 and 30 levels were analyzed, with a slenderness ratio of 0.375 and 0.225, 0.25 and 0.15, respectively; they were placed in two, three and four Outrigger systems varying their location along the height. The best structural behavior was found in the buildings with the greatest slenderness (0.225 and 0.15), that is, buildings with the highest height and the lowest base, and with the least number of Outrigger systems.

Keywords: Tall buildings, Outrigger, torsional eccentricity.

1. Introducción

Los sistemas estructurales para edificios de gran altura han experimentado una espectacular evolución a lo largo de las últimas dos décadas. Históricamente la evolución de la forma estructural de edificios de gran altura se ha reestructurado como respuesta a las nuevas tendencias arquitectónicas en el diseño de la construcción, (Gilmore & Galaz, 2014). En la década de los 80s, se caracterizaba por geometrías prismáticas repetitivas y azoteas planas, para los cuales se desarrollaron sistemas de perfil constante o con variaciones graduales

utilizando un sistema de forma global, como innovadores sistemas estructurales correspondientes a macro marcos, marcos con diagonal arriostradas interiormente, de acero híbrido, sistemas de corazón de concreto de alta resistencia, estructuras con amortiguamiento y muros estructurales son algunos de los sistemas estructurales utilizados para edificios de gran altura, (Fu, 2018).

El sistema estructural elegido para un proyecto en particular, a menudo puede tener gran impacto en el diseño arquitectónico, por lo que exigen nuevos sistemas estructurales, que resultan ser sistemas más sofisticados y complejos. Dentro de esta

*Autor para la correspondencia: eber_perez@uaeh.edu.mx

Correio electrónico: eber_perez@uaeh.edu.mx (Eber Pérez-Isidro), jesus_ceronc@uaeh.edu.mx (Jesús Emmanuel Cerón-Carballo), humberto_navarro@uaeh.edu.mx (Humberto Iván Navarro-Gómez), profe_7479@uaeh.edu.mx (Cutberto Rodríguez-Álvarez), calculista@prodigy.net.mx (Gilberto Ramos Torres).

variedad de sistemas estructurales están los sistemas de marcos rígidos utilizados para edificios de 15 a 25 niveles, sistemas con interacción de marcos arriostrados y rígidos para 40 a 50 niveles y sistemas de marco de tubos para 50 y 60 niveles. Como lo muestran en los estudios publicados por Chung et al., 2015; Halis Gunel & Emre Ilgin, 2007 y Ali & Moon, 2007, donde clasifica a los sistemas estructurales en dependencia de la altura que pueden alcanzar y sistema estructural exterior e interior, Figura 1.

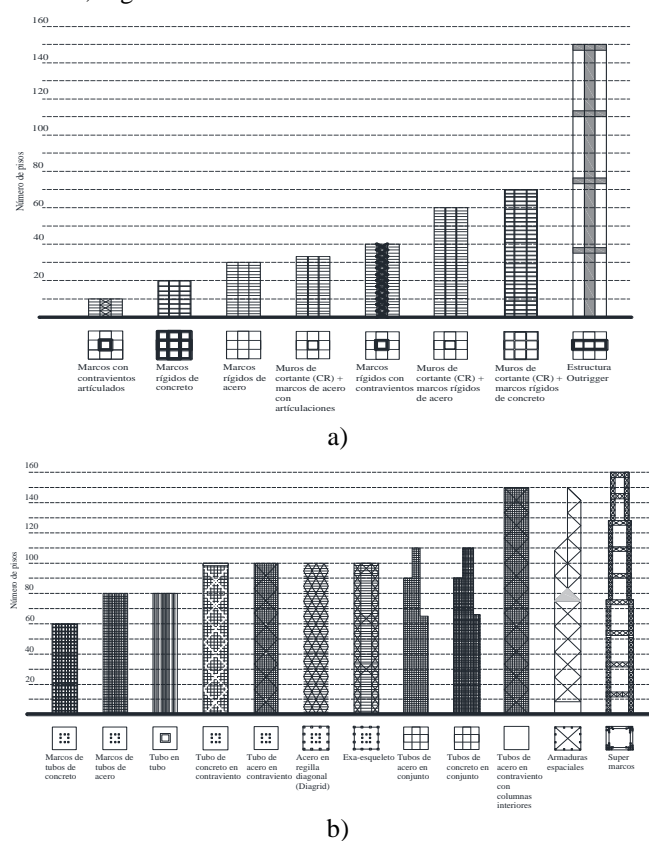


Figura 1. Estructura interior a) y exterior b)

Actualmente la fachada exterior ha sido sustituida en muchos casos por módulos verticales articulados que envuelven el edificio. Esta discontinuidad y el cambio de la fachada exterior han llevado a una nueva generación de sistemas estructurales que responden a requisitos más flexibles, en los cuales, los sistemas estructurales conocidos no proporcionan un eficiente comportamiento estructural, ya sea por la altura y/o diferentes sistemas de cargas, además, del incremento de costos de construcción pueden volverse económicamente poco razonable.

2. Sistema estructural Outrigger

En la ingeniería civil existe el sistema estructural Outrigger, el cual es una configuración de elementos armadura colocados en ciertos niveles del edificio que permite reducir los efectos de desplazamiento lateral producido por cargas sísmicas y viento, reduciendo significativamente las dimensiones de los elementos estructurales exteriores. Lee & Tovar, (2014) enuncian que el sistema Outrigger proporciona la suficiente elegancia, eficiencia y sustentabilidad para resguardar las demandas de las nuevas tendencias arquitectónicas,

estructurales y económicas para edificios de gran altura, (Figura 2).

El sistema Outrigger permite incrementar la resistencia ante cargas laterales, en el cual las columnas externas están ligadas a un corazón de muros de gran rigidez y armaduras en algunos de sus niveles, así, cuando las cargas laterales actúan sobre el edificio, la flexión del corazón rota las armaduras estabilizadoras, induciendo tensión y compresión a las columnas exteriores, disminuyendo el momento flector, permitiendo reducir su sección así como de la cimentación (Seng Kian & Torang Siahaan, 2001). El funcionamiento de las armaduras como cinturón, moviliza las columnas exteriores tomando parte de la rotación por lo que mejora la rigidez del edificio de 25 a 30%, beneficiando la igualación de deformaciones axiales entre columnas interiores y exteriores debido a efectos de temperatura, y acortamiento axial desigual debido al desequilibrio de la carga de gravedad, (BS Taranath, 2012).

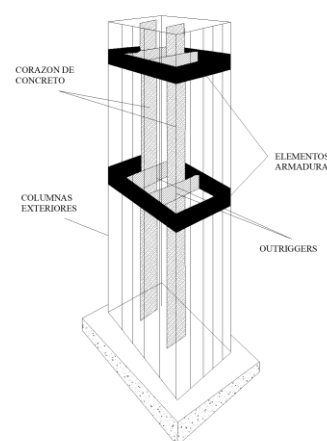


Figura 2. Edificio con dos sistemas de rigidez outrigger

3. Comportamiento estructural

El comportamiento del sistema Outrigger se idealizó como una armadura horizontal rígida conectada a un marco arriostrado que actúa como un resorte equivalente de restricción evitando la rotación del marco. La estructura se convierte en un voladizo con un sólo grado de redundancia, y su rigidez puede calcularse asumiendo que la armadura en forma de tapa es infinitamente rígida, la compresión axial y la tensión es igual al producto de la rotación del núcleo y su distancia del centro del núcleo. Si las columnas son localizadas a una distancia $d/2$ desde el centro del corazón, la deformación axial de las columnas es igual a $\theta d/2$, donde θ es la rotación del corazón y d es la distancia entre la columna exterior. Para ángulos muy pequeños, $\theta = 1$, por lo que la deformación axial es igual a $d/2$ unidades y asumiendo las siguientes condiciones:

1. El comportamiento es elástico lineal
2. Solo las fuerzas axiales son introducidas en las columnas
3. Los Outrigger están unidos rigidamente a la base y conectados con las columnas
4. Las propiedades de la sección del núcleo, columnas y las armaduras estabilizadoras son uniformes en toda la altura del edificio
5. Sólo la deformación a flexión se considera en el núcleo y las armaduras estabilizadoras; la deformación por cortante es despreciada.

Los edificios sometidos a sismos intensos deben ser capaces de resistir deformaciones inelásticas significativas conservando su capacidad de carga. Uno de los efectos que ocasionan daños severos y hasta el colapso es el fenómeno de la torsión. Es decir, los edificios que presentan diferentes niveles de asimetría en masas, rigidez y/o resistencias, originan un desfase entre la fuerza de cortante sísmica y la fuerza resistente de sus entrepisos, el acoplamiento entre los desplazamientos traslacionales y rotacionales de los sistemas de piso y, por consiguiente, un incremento en la fuerza cortante de los elementos estructurales que sobrepase su capacidad.

En el caso de edificios asimétricos estas deformaciones inelásticas provienen de la traslación y rotación de sus entrepisos. Por lo tanto, su comportamiento debe ser tal que, además de soportar los desplazamientos laterales, tienen que resistir los desplazamientos adicionales debido a torsión (Escobar Sánchez et al., 2002).

Una respuesta torsional excesiva provoca importantes daños o colapso de estructuras cuando se presenta un sismo de gran intensidad; como en los edificios los pisos experimentan torsión y traslación simultáneamente debido al acoplamiento de ambos movimientos en este trabajo se propone encontrar la mejor localización del sistema Outrigger, analizado los cambios de los desplazamientos traslacionales y angulares que se producen principalmente por la asimetría de las masas, rigideces y/o resistencia, traducidas en los valores de la localización de las excentricidades entre la línea de acción de la fuerza sísmica y la resistencia. Desde este punto de vista del diseño estructural, a mayor excentricidad se traduce en una mayor concentración de fuerza y exigen mayor sollicitación de resistencia en los elementos estructurales.

4. Modelación del sistema estructural

4.1 Datos del modelado y configuración de los edificios

Se analizaron dos modelos de edificios de concreto reforzado de 20 niveles y 30 niveles, Figura 3a) y Figura 3b) respectivamente, con un solo tipo de armadura estabilizadora y una base de 18 y 30 metros. Las alturas en todos los niveles son de 400 cm y las columnas, vigas y muros de cortante tienen secciones transversales que se indican en la Tabla 1 y Tabla 2.

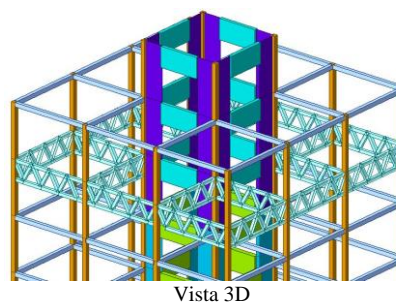
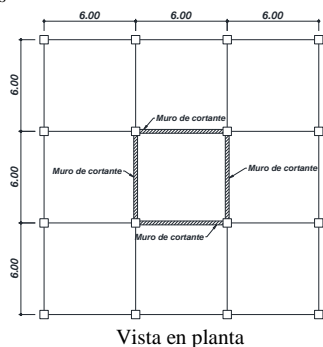
Tabla 1. Secciones transversales edificio 20 niveles

Elemento	No. Nivel	Sección transversal, base x altura, (cm)
Columna	1N - 10N	40 x 40
	11N - 20N	30 x 30
Viga	1N - 10N	25 x 40
	11N - 20N	25 x 30
Muro de cortante	1N - 6N	45 x 2800
	7N - 13N	35 x 2800
	14N - 20N	25 x 2800

Tabla 2. Secciones transversales edificio 30 niveles

Elemento	No. Nivel	Sección transversal, base x altura, (cm)
Columna	1N - 10N	50 x 50
	11N - 20N	40 x 40
	21N - 30N	30 x 30
Viga	1N - 10N	25 x 50
	11N - 20N	25 x 40
	21N - 30N	25 x 30
Muro de cortante	1N - 8N	55 x 3200
	9N - 16N	35 x 3200
	17N - 24N	25 x 3200
	25N - 30N	25 x 2400

a) modelo 20 niveles



b) modelo 30 niveles

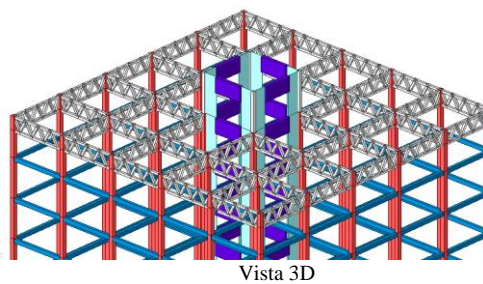
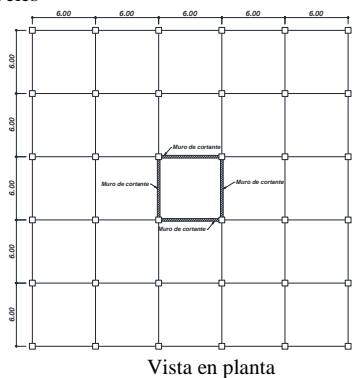
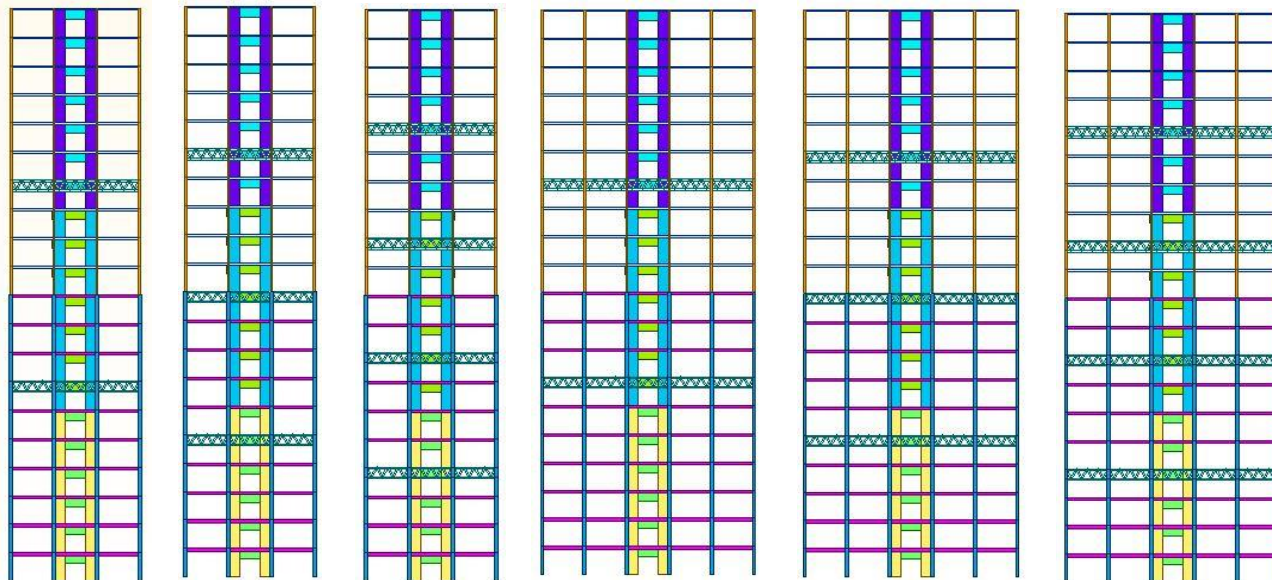


Figura 3. Modelo analítico

El sistema estructural Outrigger está conformado por un conjunto de miembros tipo armadura, compuesta por elementos de acero A36 y un perfil estructural W8x67. Se utilizó un concreto grado C4500, módulo de elasticidad $2'717,500.00 \text{ ton/m}^2$, módulo de Poisson de 0.2, densidad de 2.403 ton/m^3 y todos los modelos se elaboraron en el software MIDAS Civil 2016®.

Se cuidó que en la estructuración no existiese un cambio de rigidez debido al cambio de las secciones transversales en un solo nivel, por lo que se procuró que el cambio de secciones fuese paulatino, como se puede analizar en las tablas antes mencionadas.

a) Modelo de edificio de 20 niveles con 2, 3 y 4 armaduras estabilizadoras



b) Modelo de edificio de 30 niveles con 2, 3 y 4 armaduras estabilizadoras

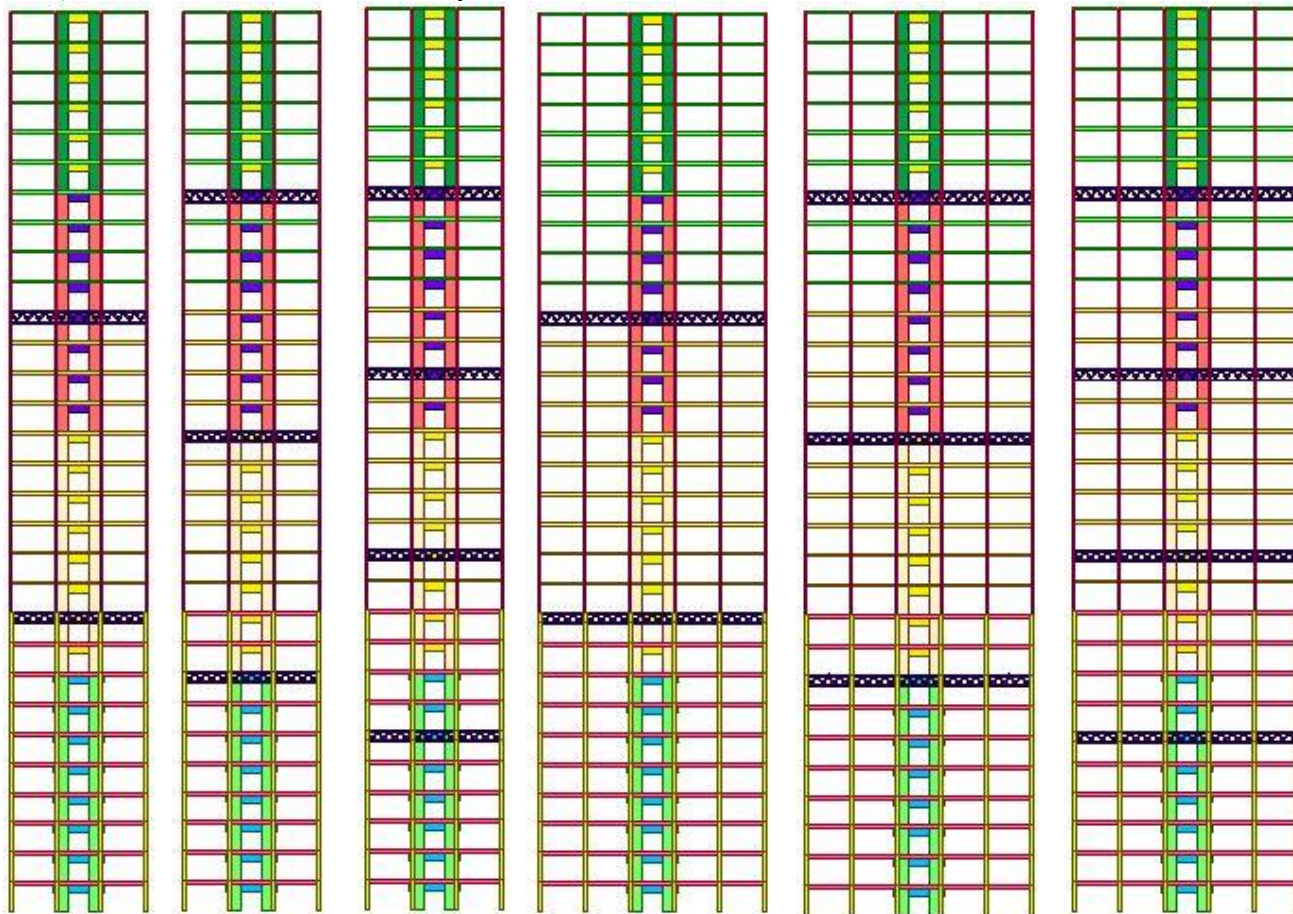


Figura 4. Distribución del sistema de rigidez outrigger

El número y localización del sistema estructural Outrigger se hizo variar a lo largo de la altura de los edificios como se muestra en la Figura 4^a) y Figura 4b). De acuerdo a la formulación propuesta por Wilbur (Meli Piralla, 2011) se estimó la rigidez de entrepiso y se aproximó el centro de torsión de cada entrepiso. Debido a que el peso en cada nivel es uniformemente distribuido en toda la planta del edificio, el centro de masa coincide con el centro geométrico de los edificios.

Al realizar las variaciones de la localización del sistema estructural Outrigger a lo largo de la altura de los edificios, (Figura 5) muestra el mejor comportamiento obtenido de los edificios en cuanto a su excentricidad torsional, ya que, es la combinación en la cual se obtuvo la menor distorsión en la variación de los resultados. Se observa que el sistema con cuatro armaduras estabilizadoras sólo mejora su comportamiento en el edificio de 30 niveles y 18 metros de base, Figura 5 b). Los resultados muestran que el sistema mejorar en edificios con una configuración esbelta.

Los casos de la Figura 5 c) y d), muestran un pico muy significativo entre niveles, el cual proporciona indicios de ocasionar el fenómeno de piso suave, afectando severamente al edificio en caso de un sismo.

La combinación del sistema de tres armaduras estabilizadoras muestra un comportamiento más estable en todas las combinaciones, sin embargo, se aprecia un incremento en la

excentricidad torsional en algunos de sus niveles, sobre todo en los niveles intermedios. Su mejor desempeño es evidenciado en el edificio con 20 niveles y 30 metros de base, Figura 5 c). La combinación de dos sistemas estructurales Outrigger fue la que mejor desempeño mostró, ya que, la diferencia entre sus excentricidades fue menor, demostrando la menor distorsión entre sus niveles, como lo indica también los estudios reportados por (Kim, 2017).

Por lo tanto, la significativa variación de excentricidad torsional en el edificio de 20 niveles y 18 metros de base, Figura 5 a), sugiere que el sistema muestra el menor desempeño para edificios de menor altura y mayor esbeltez. El edificio de 20 niveles y 30 metros de base, logra mejorar sustancialmente su comportamiento.

5. Conclusiones

En este trabajo se demuestra las ventajas del sistema estructural Outrigger para contrarrestar cargas dinámicas. Se evidencia el proceso de análisis estructural a partir de estudiar el comportamiento de la excentricidad torsional, el cual permite obtener suficiente evidencia que permite al ingeniero estructurista resolver el problema por la falta de evidencia y dependencia de experiencia para elegir el número y localización del sistema Outrigger.

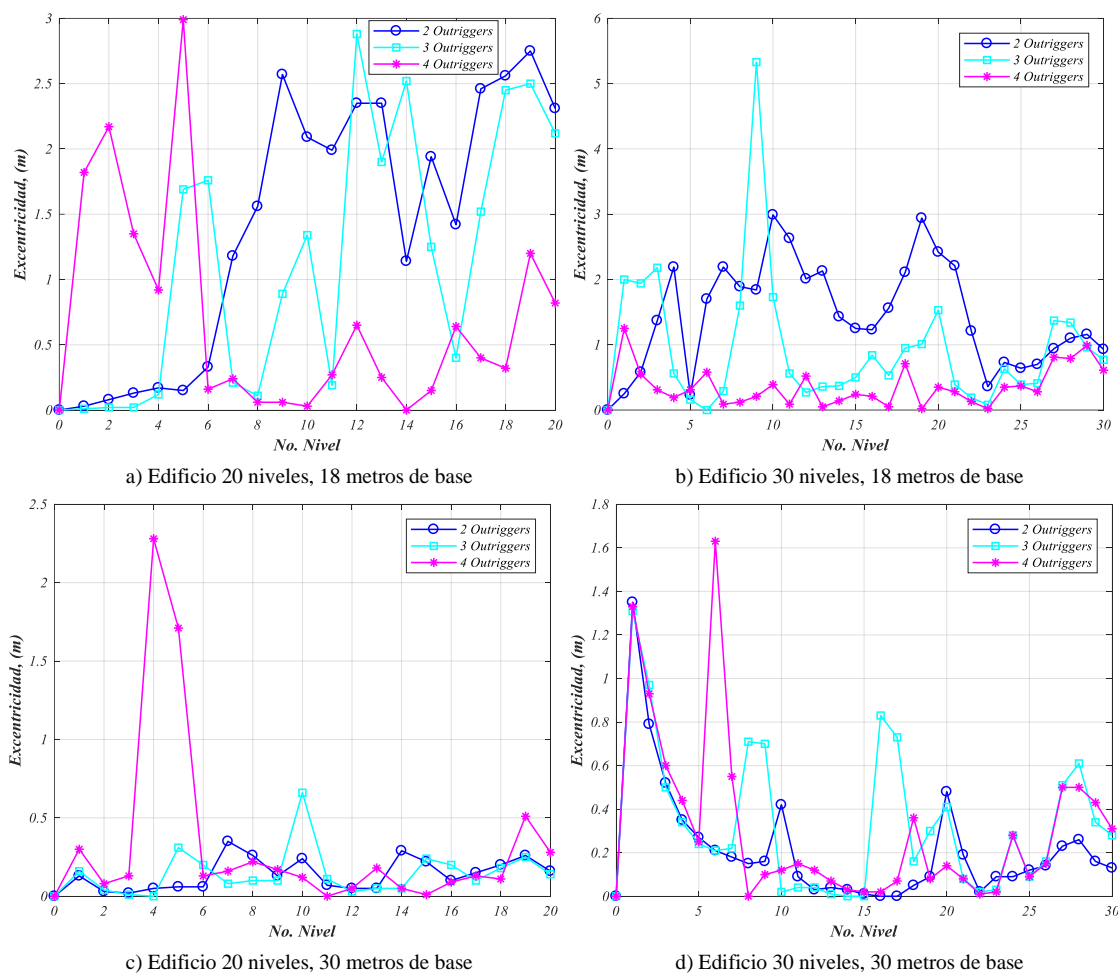


Figura 5. Excentricidad del centro de torsión

Se observó que la ubicación del sistema Outrigger juega un papel importante en el desempeño global de la estructura, ya que, el número y ubicación expone como la estructura sufre cambios en la excentricidad torsional, traduciéndose en daños que pueden resultar en fallas o hasta el colapso parcial o total de la estructura.

Se puede concluir que edificios con mayor esbeltez muestran un mejor comportamiento cuando se utiliza el sistema estructural Outrigger, ya que, a pesar de tener los mayores valores de excentricidad torsional, la diferencia entre niveles es menor entre nivel y nivel. A diferencia de los edificios con la menor esbeltez, donde las diferencias entre excentricidades torsionales se vuelven mayores indicando que existen mayores desplazamientos entre niveles.

Finalmente, la desventaja que en el lugar donde se disponen los elementos armaduras llamadas también armaduras estabilizadoras, el espacio es desaprovechado, sin embargo, se puede mitigar haciendo coincidir con los niveles tecnológicos o niveles de almacenamiento.

Agradecimientos

Los autores reiteran un cordial agradecimiento a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por su indudable apoyo al desarrollo del profesional docente del Área Académica de Ingeniería y Arquitectura.

Referencias

- Ali, M. M., & Moon, K. S. (2007). Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects. *Architectural Science Review*, 50(3), 205–223. <https://doi.org/10.3763/asre.2007.5027>
- BS Taranath. (2012). *Analysis and Design of Tall Buildings*.
- Chung, K. R., Yang, D., Engineers, S., Chung, K., & Sunu, W. (2015). *Outrigger Systems for Tall Buildings in Korea*.
- Escobar Sánchez, J. A., Mendoza Silva, J. A., & Gómez Martínez, R. (2002). Procedimiento simplificado para el diseño por torsión sísmica estática. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*, 191–203.
- Foster, N. (2002). *Foster and Partners* (P. Asensio (ed.); 1st ed.). Loft Publications.
- Fu, F. (2018). Chapter One - Introduction. In F. Fu (Ed.), *Design and Analysis of Tall and Complex Structures* (pp. 1–4). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101018-1.00001-0>
- Gilmore, A. T., & Galaz, G. C. (2014). Dimensionado preliminar basado en rigidez de edificios altos con estructura de acero rigidizados con diagonales concéntricas. 54(90), 34–54.
- Halis Gunel, M., & Emre Ilgin, H. (2007). A proposal for the classification of structural systems of tall buildings. *Building and Environment*, 42(7), 2667–2675. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.007>
- Kim, H.-S. (2017). Optimum design of outriggers in a tall building by alternating nonlinear programming. *Engineering Structures*, 150, 91–97. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2017.07.043>
- Lee, S., & Tovar, A. (2014). Outrigger placement in tall buildings using topology optimization. *Engineering Structures*, 74, 122–129. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2014.05.019>
- Meli Piralla, R. (2011). *Diseño estructural* (2a. ed., p. 596). Grupo Noriega Editores.
- Seng Kian, P., & Torang Siahaan, F. (2001). The Use of Outrigger and Belt Truss System for High-Rise Concrete Buildings. *Civil Engineering Dimension*, 3(1), 36–41. <http://puslit2.petra.ac.id/ejournal/index.php/civ/article/view/15536>