



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERÍA

# **UBICACIÓN ÓPTIMA DE *OUTRIGGERS* EN EDIFICIOS PRISMÁTICOS DE GRAN ALTURA**

**PAÚL ANDRÉS VILLAVICENCIO FERNÁNDEZ**

Informe de Actividad de Graduación para optar al Grado de  
Magíster en Ingeniería Estructural y Geotécnica

Profesor Supervisor:  
TÓMAS ZEGARD

Santiago de Chile, Diciembre, 2020

© MMXV, PAÚL VILLAVICENCIO FERNÁNDEZ

*Con amor para mi abuelita Julia  
Victoria Avilés Espinoza (†); a mis  
hijos Juan Manuel y Emiliano  
Nicolas; a mi esposa Greta; a mis  
padres Alba y Manuel.*

## AGRADECIMIENTOS

Primero me gustaría agradecer a mi profesor supervisor, Tomas Zegard, por la dirección, ayuda constante y motivación durante la realización de este trabajo. Ha sido un privilegio contar con su tiempo, sus conocimientos transmitidos, y sobre todo su buena disposición en todo momento.

A mis compañeros de postgrado. Especialmente a Liliana Barros, Michael Clemente, Tatiana Ortiz, Marcos Paniagua, Johanna Peñafiel y Karina Ruiz. Su apoyo, ayuda, y amistad convirtieron el tiempo de estudios en Chile una experiencia única en la vida.

Me gustaría expresar mi gratitud con Gonzalo Sacoto, Fanny Urgilez, David Sacoto, Estuardo Sacoto y Adriana Sacoto por el amor hacia mis hijos, su apoyo y ayuda incondicional para poder cumplir este objetivo.

Mi profundo agradecimiento a mis padres Alba y Manuel, y mis hermanos Sebastian y Manuel Alejandro, por darme la tranquilidad para estudiar y ser los pilares que me han sostenido en cada paso que he dado. Gracias mamá por ser siempre mi inspiración, por el apoyo a seguir estudiando, por tu ejemplo. Gracias papá por enseñarme a dar lo mejor de mí en todo lo que hago.

Un agradecimiento especial a mi esposa Greta Sacoto, gracias por cuidarnos siempre, por las palabras de ánimo y por nunca rendirte; sin ti este sueño no habría sido posible, eres una guerrera.

Finalmente un profundo agradecimiento a mis hijos Juan Manuel y Emiliano Nicolas, por la espera, por los abrazos y juegos aplazados; este tiempo estudiando lejos de casa fue eterno, gracias por llenarme de vida con sus travesuras.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	X
ABSTRACT	XI
RESUMEN	XII
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación . . . . .	3
1.2. Estado del arte . . . . .	4
1.2.1. Historia de los sistemas con <i>outriggers</i> . . . . .	4
1.2.2. Diseño de <i>outriggers</i> . . . . .	5
1.2.3. Optimización en la ubicación de <i>outriggers</i> . . . . .	5
1.3. Objetivo . . . . .	7
1.4. Organización del documento . . . . .	8
Capítulo 2. METODOLOGÍA	9
2.1. Procedimiento de análisis . . . . .	9
2.2. Definición de geometría . . . . .	11
2.3. Materiales . . . . .	13
2.4. Cargas . . . . .	14
2.4.1. Cargas de gravedad . . . . .	14
2.4.2. Carga Muerta . . . . .	14
2.4.3. Carga Lateral . . . . .	15
2.5. Combinaciones de carga . . . . .	21
2.6. Predimensionamiento de <i>outriggers</i> , columnas y muros . . . . .	21
2.6.1. Predimensionamiento sin <i>outrigger</i> . . . . .	23

2.6.2.	Predimensionamiento con <i>outriggers</i> . . . . .	26
2.7.	Parámetros de estudio . . . . .	27
2.7.1.	Energía de deformación . . . . .	27
2.7.2.	Período fundamental de la estructura . . . . .	28
2.7.3.	Desplazamiento del techo . . . . .	28
2.8.	Casos analizados . . . . .	29
Capítulo 3.	EJEMPLOS Y APLICACIONES	30
3.1.	Posición óptima de un <i>outrigger</i> sin variación en la sección de los elementos	30
3.2.	Posición óptima de un <i>outrigger</i> en función de su rigidez . . . . .	33
3.2.1.	Trabajo externo mínimo con un <i>outrigger</i> variando su rigidez . . . . .	36
3.2.2.	Período mínimo con un <i>outrigger</i> variando su rigidez . . . . .	39
3.2.3.	Desplazamiento mínimo del techo con un <i>outrigger</i> variando su rigidez	42
3.2.4.	Comparación de resultados para edificio con un <i>outrigger</i> . . . . .	45
3.3.	Edificio con dos <i>outrigger</i> sin considerar variaciones en las secciones . . .	45
Capítulo 4.	CONCLUSIONES	54
4.1.	Conclusiones . . . . .	54
4.2.	Futura investigación . . . . .	56
REFERENCIAS		57

## ÍNDICE DE FIGURAS

1.1.	Cuadro de sistemas estructurales. . . . .	1
1.2.	Edificio con <i>outriggers</i> . . . . .	2
1.3.	Tour de la Bourse . . . . .	4
2.1.	Diagrama de flujo para análisis de edificios con <i>outriggers</i> . . . . .	10
2.2.	Geometría típica de edificio analizado. . . . .	11
2.3.	Edificio con <i>outriggers</i> . . . . .	12
2.4.	Distribución de presiones por velocidad de viento. . . . .	16
2.5.	Aplicación de carga del viento en caras del edificio . . . . .	19
2.6.	Cargas aplicadas por acción del viento. . . . .	19
2.7.	Carga distribuida equivalente de viento. . . . .	20
2.8.	Proceso de predimensionamiento. . . . .	22
2.9.	Nomenclatura utilizada en muros del núcleo. . . . .	22
2.10.	Fuerzas axiales obtenidas en los muros para los casos de carga utilizados. . . . .	23
2.11.	Fuerzas obtenidas en los muros para las combinaciones de carga.(a) Carga axial en <i>Pier1</i> . (b) Carga axial en <i>Pier2</i> . (c) Carga axial en <i>Pier3</i> . (d) Carga axial en <i>Pier4</i> . . . . .	24
2.12.	Carga axial última normalizada respecto a la capacidad de los muros; grupos uniformes de muro de 20 pisos.(a)Utilización en <i>Pier1</i> . (b) Utilización en <i>Pier2</i> . (c) Utilización en <i>Pier3</i> . (d) Utilización en <i>Pier4</i> . . . . .	25

3.1.	Resultados obtenidos variando posición del <i>outrigger</i> sin cambio en el tamaño de las secciones. . . . .	31
3.2.	Piso típico con <i>outrigger</i> . . . . .	33
3.3.	Esquema utilizado para el calculo de la rigidez del piso con <i>outriggers</i> . . . . .	34
3.4.	Variación en la relación de rigidez del piso en función del área del <i>outrigger</i> . . . . .	35
3.5.	Variación del trabajo externo en función de la rigidez del <i>outrigger</i> ; sin variación en núcleo y columnas perimetrales. . . . .	36
3.6.	Variación del trabajo externo en función de la rigidez del <i>outrigger</i> . . . . .	37
3.7.	Variación del trabajo externo en función de la rigidez del <i>outrigger</i> . . . . .	38
3.8.	Variación del período fundamental del edificio en función de la rigidez y ubicación del <i>outrigger</i> . Sin predimensionamiento. . . . .	39
3.9.	Variación del período fundamental del edificio en función de la rigidez y ubicación del <i>outrigger</i> . Con predimensionamiento en grupos de 10 pisos. . . . .	40
3.10.	Variación del período fundamental del edificio en función de la rigidez y ubicación del <i>outrigger</i> . Con predimensionamiento en grupos de 20 pisos. . . . .	41
3.11.	Variación del desplazamiento del techo en función de la rigidez del <i>outrigger</i> , sin predimensionamiento. . . . .	42
3.12.	Variación del desplazamiento del techo en función de la rigidez del <i>outrigger</i> , con predimensionamiento en grupos de 10 pisos. . . . .	43
3.13.	Variación del desplazamiento del techo en función de la rigidez del <i>outrigger</i> , con predimensionamiento en grupos de 20 pisos. . . . .	44
3.14.	Comparación de resultados obtenidos para edificio con un <i>outrigger</i> . . . . .	45
3.15.	Resultados para edificio con un <i>outrigger</i> . Predimensionamiento por gravedad, sin <i>outrigger</i> . . . . .	46

3.16. Trabajo externo en edificio con dos <i>outriggers</i> . . . . .	48
3.17. Trabajo externo en edificio con dos <i>outriggers</i> . . . . .	49
3.18. Trabajo externo en edificio con dos <i>outriggers</i> . . . . .	50
3.19. Resultados obtenidos con dos <i>outriggers</i> contiguos. . . . .	51
3.20. Resultados obtenidos con dos <i>outriggers</i> manteniendo constante un <i>outrigger</i> en el techo. . . . .	52

## ÍNDICE DE TABLAS

2.1.	Propiedades de los materiales empleados . . . . .	13
2.2.	Peso específico de materiales . . . . .	14
3.1.	Secciones utilizadas para el análisis del edificio sin realizar predimensionamiento en función de las combinaciones de carga. . . . .	30
3.2.	Comparación de resultados para la posición óptima de un <i>outrigger</i> . . . . .	32
3.3.	Variación de la rigidez del piso en función de la sección del <i>outrigger</i> . . . . .	35
3.4.	Resultados obtenidos para edificio con uno y dos <i>outriggers</i> . . . . .	47
3.5.	Reducciones obtenidas en edificio con dos <i>outriggers</i> con respecto al edificio con un <i>outrigger</i> . . . . .	53

## ABSTRACT

The objective of this work is to investigate the optimum location of outriggers in high-rise buildings subjected to lateral wind loadings. Structural building models of reinforced concrete are generated, and the following objectives are evaluated as a mean to benchmark their performance: (a) Compliance, (b) fundamental period; (c) top-floor displacements. The buildings are optimized for the cases with one and two outriggers. The optimal location of the outriggers is evaluated on models where the core-walls and spandrel columns are properly sized. In addition, the influence on the results of the outrigger relative stiffness is analyzed. The optimal position of outrigger systems was found through a brute-force global search, where all the possible locations of outriggers were analyzed.

A key part in the success of this work is the information and analysis exchange between a commercial structural analysis software and an open-source multi-purpose programming language. The structural models were defined in the programming language environment, which interacted with the structural analysis software to generate the models, analyze, and finally post back the results of each model. This information exchange allowed for the various parametric studies required to address the main objective of this works, and to provide a global answer to the optimal placement of outriggers.

## RESUMEN

El objetivo de este trabajo es investigar la posición óptima de *outriggers* en edificios de gran altura sometidos a la acción de cargas laterales de viento. Se generan modelos estructurales de edificios de hormigón armado, y los siguientes objetivos se evalúan como un medio para evaluar su desempeño: (a) Trabajo externo; (b) Período fundamental de la estructura; y (c) Desplazamiento de techo. Los edificios son optimizados para los casos con uno y dos *outriggers*. La posición óptima de los *outriggers* es evaluada en modelos donde los muros del núcleo y las columnas de borde son dimensionadas apropiadamente. Además, es analizada la influencia en los resultados de la rigidez relativa de los *outriggers*. La posición óptima del sistema de *outriggers* fue obtenida mediante un proceso de búsqueda por fuerza bruta global, donde fueron analizadas todas las posibles ubicaciones de los *outriggers*.

Una parte clave en el éxito de este trabajo es el intercambio de información y análisis entre un software comercial de análisis estructural y un lenguaje de programación multipropósito de código abierto. Los modelos estructurales se definieron en el entorno del lenguaje de programación, el cual interactuó con el software de análisis estructural para generar los modelos, analizar y finalmente presentar los resultados de cada modelo. Este intercambio de información permitió realizar los diversos estudios paramétricos necesarios para abordar el objetivo principal de este trabajo, y dar una respuesta global a la posición óptima de los *outriggers*.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La construcción de edificios cada vez mas altos y esbeltos se ha incrementado en los últimos años, siendo potenciada por las mejoras en las técnicas de análisis, materiales disponibles, restricciones de espacio y como un símbolo de poder económico. Al mismo tiempo que se proyectan edificios cada vez mas altos es necesario estudiar el comportamiento de nuevos y eficientes materiales, así como la optimización de los sistemas estructurales aplicables, buscando reducir el uso de materiales y maximizar el espacio utilizable. Este tipo de estructuras altas y esbeltas presentan problemas al momento de controlar los desplazamientos y aceleraciones bajo la acción de cargas dinámicas inducidas por viento o por sismo. El control del desplazamiento lateral en edificios de gran altura es un tópico extensamente estudiado lo cual ha resultado en muchas soluciones practicas e innovadoras.

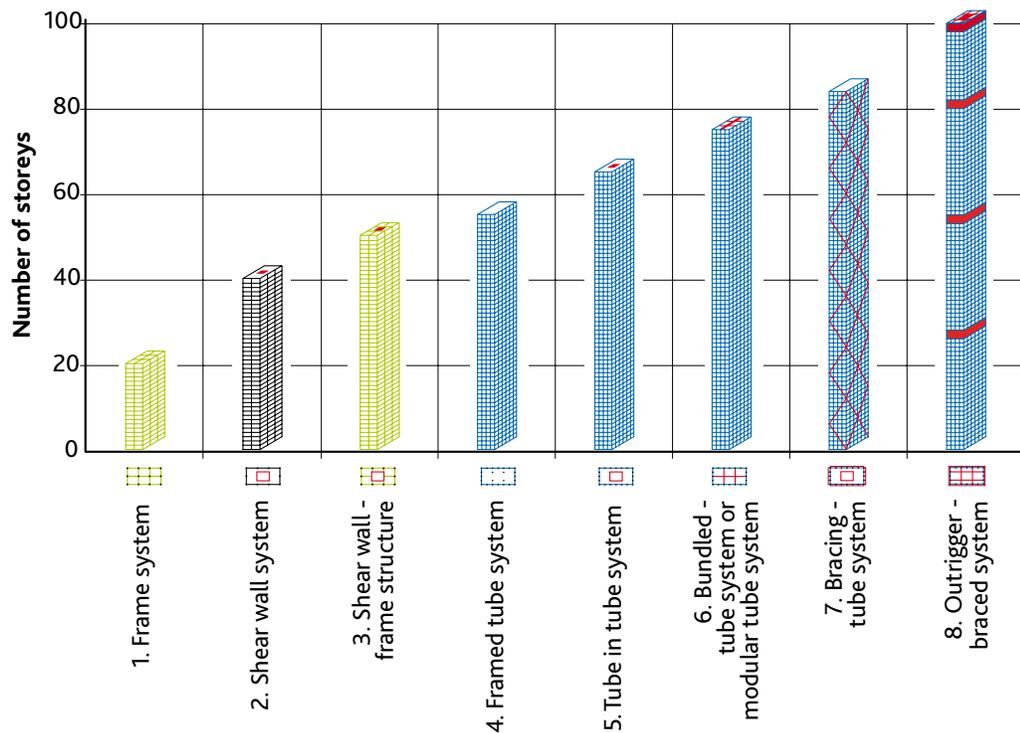


Figura 1.1. Cuadro de sistemas Estructurales. Algunos sistemas estructurales utilizados para edificios de gran altura originalmente presentado por Fazlur R. Khan(1929-1982). Imagen tomada de (Banks y cols., 2014).

En la Figura 1.1 se resumen algunos sistemas resistentes a fuerzas laterales utilizados en edificios de gran altura y sus límites de altura recomendados. Como se puede observar los sistemas de pórticos son eficientes hasta una altura aproximada de 20 pisos. Este sistema provee estabilidad lateral utilizando conexiones a momento (Ali y Moon, 2007). Para un mayor número de pisos un sistema compuesto únicamente por pórticos resulta ineficiente y se requieren otros sistemas que brinden mayor rigidez lateral (Atkinson, 2017).

El sistema estructural analizado en el presente trabajo está compuesto por un núcleo principal conectado a columnas exteriores por miembros horizontales relativamente rígidos comúnmente conocidos como *outriggers*. Cuando el edificio se encuentra sujeto a cargas laterales los *outriggers* trabajan conjuntamente con las columnas resistiendo la rotación del núcleo, reduciendo las deformaciones laterales y el momento del núcleo, en comparación de un edificio sin *outriggers*. Además de las columnas localizadas al final de los *outriggers* es usual conectar las otras columnas perimetrales para ayudar a restringir la rotación de los *outriggers*, esto se logra añadiendo un muro o armadura perimetral<sup>1</sup> (Taranath, 2009).



Figura 1.2. Trump Tower. Edificio con núcleo y *outriggers* de concreto (Skidmore, Owings & Merrill LLP, s.f.).

<sup>1</sup>Conocida en inglés como *belt-truss*

Un ejemplo de uso de *outriggers* en edificios de gran altura es la Trump Tower ubicada en Chicago, Estados Unidos. Este edificio de 415 metros de altura (Figura 1.2) es una de las estructuras de hormigón armado más altas de Estados Unidos. Esta formada por un sistema estructural compuesto por un núcleo principal y *outriggers*. En esta estructura los *outriggers* como el núcleo son de hormigón armado.

El propósito del presente trabajo es analizar el comportamiento de un edificio de gran altura de hormigón armado sujeto a la acción de cargas de viento, en el cual se busca la posición óptima de los *outriggers* en la altura del edificio.

## 1.1. Motivación

Los edificios de gran altura han visto un incremento en su demanda en la construcción moderna, siendo el sistema con núcleo y *outriggers* uno de los sistemas más eficientes utilizados para resistir las cargas laterales (Alhaddad, Halabi, Xu, y Lei, 2020). Buscar la posición óptima donde los *outriggers* minimicen el desplazamiento lateral o maximicen la rigidez del edificio es a menudo un problema netamente académico, en la práctica la ubicación de los *outriggers* se encuentra limitada a pisos mecánicos o plantas de refugio (Choi, Ho, Joseph, y Mathias, 2016).

El análisis estructural busca proveer rigidez y estabilidad en función de la ubicación de los diferentes componentes que forman parte de la estructura. Las soluciones cada vez más complejas en su implementación requieren de técnicas de optimización que buscan minimizar los limitados recursos disponibles para la ejecución de un proyecto.

La ubicación y número de *outriggers* es una pregunta cuya respuesta debe ser analizada puntualmente en cada caso, tomado en cuenta los requerimientos de funcionalidad, económicos, arquitectónicos y técnicos específicos de cada proyecto. Generalmente la ubicación óptima puede ser determinada mediante la aplicación de algoritmos de optimización o realizar una búsqueda global analizando cada una de las posibilidades.

En este trabajo se implementa una búsqueda global de la posición óptima analizando las posibilidades en un mismo edificio de hormigón armado con uno y dos *outriggers*, para lo cual se ha planteado un ejemplo académico en el cual se cambia posición de los *outriggers* en altura y se determina el efecto que tiene la ubicación de los elementos en el comportamiento global de la estructura.

## 1.2. Estado del arte

### 1.2.1. Historia de los sistemas con *outriggers*

Los sistemas de *outriggers* han sido utilizados históricamente por barcos para ayudar a resistir las fuerzas del viento a los mástiles esbeltos y largos haciéndolos más estables y resistentes (Ali y Moon, 2007). El concepto de *outriggers* aplicados a edificios de gran altura no es reciente, teniendo sus primeros usos aproximadamente cinco décadas atrás. Uno de los primeros ejemplos de utilización del sistema de *outriggers* en edificios de altura se encuentra en el edificio Tour de la Bourse en Montreal, Canada (Figura 1.3).



Figura 1.3. Tour de la Bourse. Foto del edificio (*Tour de la Bourse*, s.f.).

### **1.2.2. Diseño de *outriggers***

El uso de *outriggers* en edificios introduce un grado de complejidad adicional durante las etapas de diseño y construcción. Los edificios de gran altura por lo general buscan aprovechar las posibilidades de la vista siendo un valor intrínseco valioso, por lo cual el o los núcleo tienden a ser ubicados en la parte central de la planta del edificio. Un núcleo suficientemente grande con respecto a la planta puede ser suficiente para brindar rigidez lateral y resistencia al volcamiento del edificio. Sin embargo, el núcleo se vuelve cada vez mas ineficiente a medida de la relación entre la altura del edificio y el ancho del núcleo crece. Cuando la relación de aspecto crece a valores que exceden ocho o, es necesario controlar el desplazamiento lateral o el momento volcante del edificio se podría considerar la posibilidad de colocar *outriggers* (Choi y cols., 2016).

No existe diferencia en el diseño de los elementos de un *outriggers* comparado con vigas o columnas. Una de las principales consideraciones al momento de realizar el diseño de *outriggers* son los acortamientos diferenciales entre el núcleo y los marcos perimetrales. El acortamiento diferencial puede deberse a deformaciones elásticas, contracción de fraguado o agrietamiento. Ya que la rigidez de los *outriggers* es generalmente muy alta, una pequeña deflexión puede inducir fuerzas muy grandes en los elementos del *outrigger* (Ho, 2016).

El diseño de la estructura debe tener en cuenta las etapas de construcción y el efecto de los *outriggers* sobre el sistema de cargas de gravedad a fin de garantizar que no sea sobre-esforzado y los elementos puedan ser dimensionado eficientemente.

### **1.2.3. Optimización en la ubicación de *outriggers***

El análisis de edificios con *outriggers* y su posición óptima ha sido motivo de estudio generando abundante bibliografía al respecto, la mayoría de investigaciones se centran en la aplicación de métodos de optimización (búsqueda de forma, topología y tamaño), sin

embargo, se han realizado búsquedas de la posición óptima de *outriggers* variando su posición en la altura del edificio y obteniendo para cada caso los valores de las variables a optimizar. Para muchos análisis se consideran estructuras idealizadas o se parte de simplificaciones a fin de reducir los tiempos computacionales y buscar generalización de los resultados obtenidos.

Rutenberg (Rutenberg, 1979) estudia una estructura con sección transversal constante en el núcleo y las columnas exteriores, considerando la armadura perimetral infinitamente rígida, donde los efectos de deformación por corte y la inercia rotacional se desprecian, las vigas se encuentran simplemente apoyadas a las columnas y el núcleo, tal que la carga lateral en su totalidad es resistida por flexión del núcleo y por deformación axial y flexión de las columnas perimetrales actuando como voladizo; se obtiene la posición del *outrigger* que minimiza la deriva de piso en el primer modo de vibración.

Gerasimidis et al (Gerasimidis, Efthymiou, y Baniotopoulos, 2009) partiendo de una estructura bidimensional con elementos básicos como núcleo de concreto, columnas y *outriggers* de acero; con el núcleo de concreto en el centro del edificio y las columnas en los lados de la estructura, donde se realiza un análisis lineal elástico, manteniendo las secciones constantes a lo largo de la estructura, las columnas se encuentran libres de rotar en sus extremos y los *outriggers* se encuentran rígidamente conectados al núcleo, además se omite el efecto de las vigas fuera del *outrigger* y no se incluye en el modelo. Con estas condiciones definidas se analiza la estructura con dos *outriggers*; manteniendo uno de ellos siempre en el último piso de la estructura y variando de posición el segundo *outrigger* a lo largo de todo el edificio. Como variables a analizar se selecciona la deriva de piso, fuerzas axiales en la columna y momento en el núcleo. De este estudio se determina que el diseño de edificios altos y esbeltos está controlado por tres factores, resistencia, rigidez y serviciabilidad.

La búsqueda de la posición óptima de *outriggers* con estructuras bidimensionales idealizadas se extiende a métodos gráficos (Hoenderkamp y Bakker, 2003) y analíticos

(Hoenderkamp, 2008) con potenciales usos para prediseño tomando la carga de viento como una carga distribuida uniforme en altura. Estas aproximaciones consideran la rigidez del núcleo, columnas y *outriggers* como variables para determinar la posición óptima del sistema de *outriggers*.

Lee y Tovar (Lee y Tovar, 2014) analizan la posición óptima de *outriggers* en edificios de gran altura mediante optimización topológica, para lo cual se definen tres dominios, uno formado por el núcleo, otro dominio formado por la estructura exterior de columnas y el último dominio formado por vigas y *outriggers*. Para verificar los resultados obtenidos los autores realizan una búsqueda global en un edificio tridimensional de 80 pisos colocando uno y dos *outriggers*, variando su posición en altura. En este trabajo se considera el trabajo total externo realizado por la estructura bajo la acción de la carga de viento. Los autores obtienen que para la estructura con un *outrigger* cuando el sistema se encuentra ubicado en el piso 24 se minimiza el trabajo externo, mientras que el desplazamiento en la parte superior del edificio se minimiza cuando el sistema se encuentra colocado en el piso 33. En la estructura con dos *outriggers* se minimiza el trabajo externo cuando los sistemas han sido colocados en los pisos 16 y 29.

### 1.3. Objetivo

El objetivo de la presente actividad de graduación es encontrar la posición óptima del sistema de *outriggers* en edificios prismáticos de gran altura, realizando búsquedas globales tomando en cuenta las variaciones en las secciones como resultado de la interacción entre el sistema de *outriggers* y la estructura del edificio.

La obtención de los resultados se realiza a través de la interacción entre el software de análisis estructural ETABS (Computers and Structures, Inc., 2020) con su interfaz de programación de aplicaciones abierta (OAPI<sup>2</sup>) y el lenguaje de programación Python; con lo cual se busca validar la funcionalidad de las herramientas computacionales presentadas.

---

<sup>2</sup>Iniciales en inglés de *Open Application Programming Interface*

#### **1.4. Organización del documento**

Las restantes partes del presente documento se organizan en los siguientes capítulos:

En el Capítulo 2 se presenta la metodología empleada para la obtención de los resultados que se presentaran posteriormente. Se desarrolla el algoritmo empleado para el análisis, donde se incluye la definición de la estructura y sus componentes, cargas y casos de carga, y las condiciones bajo las cuales se analiza cada caso en particular.

En el Capítulo 3 se muestran los resultados obtenidos para los casos analizados, se estudia la influencia de las variables seleccionadas en la respuesta de la estructura. En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para estructuras con uno y dos outriggers mediante gráficas que exponen los casos analizados y el comportamiento de la estructura.

En el Capítulo 4 se presentan las conclusiones del presente proyecto, las recomendaciones y sugerencias para futura investigación.

## CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Procedimiento de análisis

Las condiciones bajo las cuales se analiza una estructura condiciona directamente los resultados obtenidos. Al ser este trabajo orientado a una primera aproximación en la asignación de un sistema de *outriggers* a un edificio de gran altura, es conveniente realizar algunas simplificaciones que reduzcan el tiempo de análisis, sin perder información importante y cuyos resultados puedan servir de base para un análisis mas exhaustivo. Es en este contexto que se toman inicialmente las siguientes consideraciones:

1. La estructura se encuentra trabajando en el rango elástico lineal.
2. Todos los elementos del sistema principal resistente a cargas laterales se encuentran rígidamente conectados.
3. La carga de viento aplicada se mantiene constante independientemente del periodo fundamental “real” del caso en análisis.
4. Se desprecian las deformaciones por corte en los elementos bi-dimensionales empleados para el modelamiento del núcleo.

Para el desarrollo del presente trabajo se utilizó el programa de elementos finitos orientado al análisis de estructuras de edificación ETABS con su interfaz OAPI mediante el lenguaje de programación Python. Se inicia el modelo definiendo nodos, incidencias de los elementos, secciones, cargas y combinaciones de carga desde Python con lo cual se puede parametrizar el estudio del edificio planteado. De esta manera es posible realizar análisis iterativos cuyo desarrollo “manual” tomaría un tiempo excesivamente alto y restrictivo.

En la Figura 2.1 se presenta el diagrama de flujo simplificado con los pasos realizados para llevar a cabo la presente actividad de graduación. Se pueden diferenciar dos etapas principales la primera inicia con la definición del modelo sin *outriggers* y la segunda etapa donde se analiza cada uno de los casos variando la posición de los *outriggers*. Para las

dos etapas mencionadas se puede pre-dimensionar los elementos de manera que cumplan con un criterio de resistencia definido con anterioridad, este resulta en un proceso iterativo hasta obtener secciones finales que convergen para un determinado caso de carga y sistema estructural.

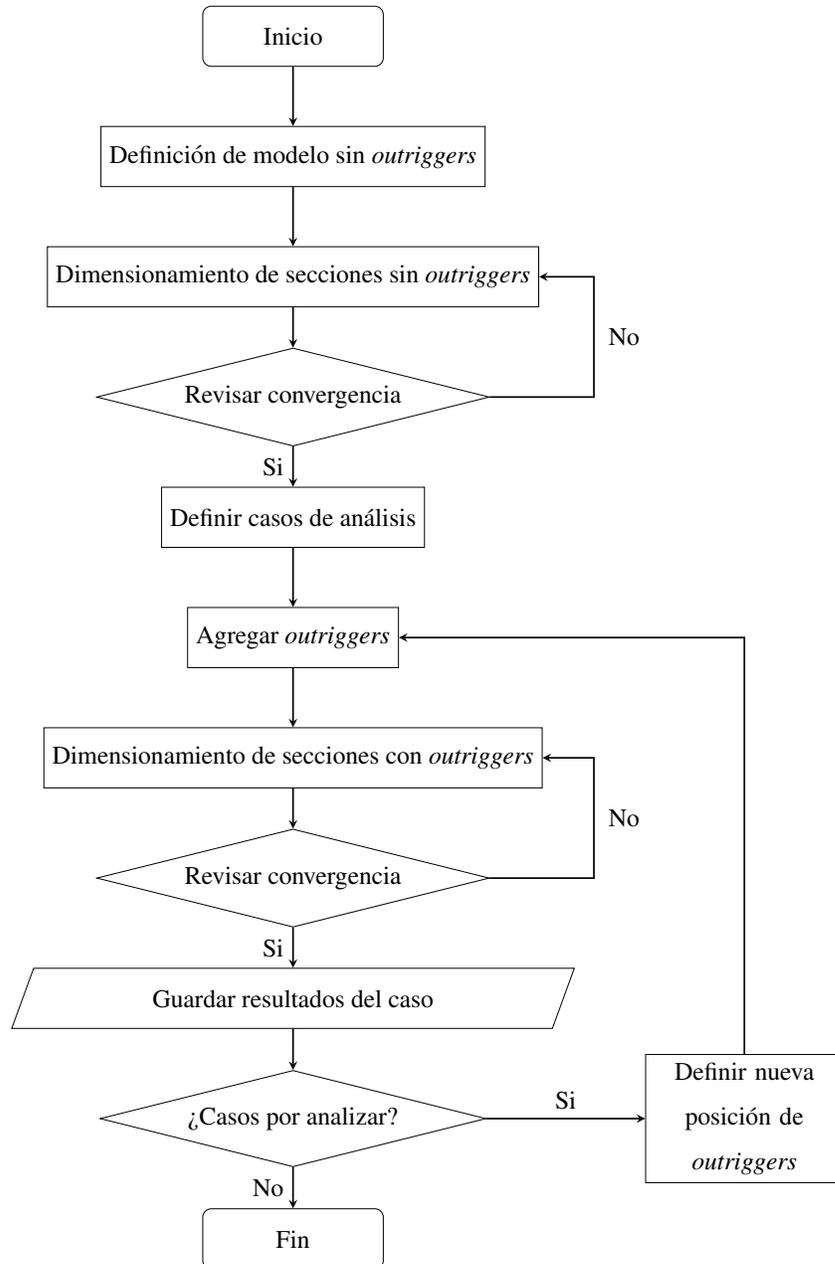


Figura 2.1. Diagrama de flujo para análisis de edificios con *outriggers*

La revisión de la convergencia en el tamaño de las secciones puede ser obviada como se mostrará en algunos de los análisis presentados en este documento, esto se presenta como una de las ventajas de utilizar conjuntamente el software de análisis estructural y un lenguaje de programación con herramientas de análisis numérico.

En las siguientes secciones del capítulo se detallan las etapas y parámetros que forman parte integral de este trabajo, buscando dar al lector información clara y detallada de la metodología empleada.

## 2.2. Definición de geometría

Para el presente estudio académico se considera un edificio de hormigón armado, con columnas perimetrales conectadas mediante vigas al núcleo formado por 4 muros. Los elementos se encuentran dispuestos de tal manera que el edificio es simétrico en las dos direcciones. En la Figura 2.2 se presenta las dimensiones de los vanos del edificio, así como la ubicación de los elementos que forman parte de la estructura.

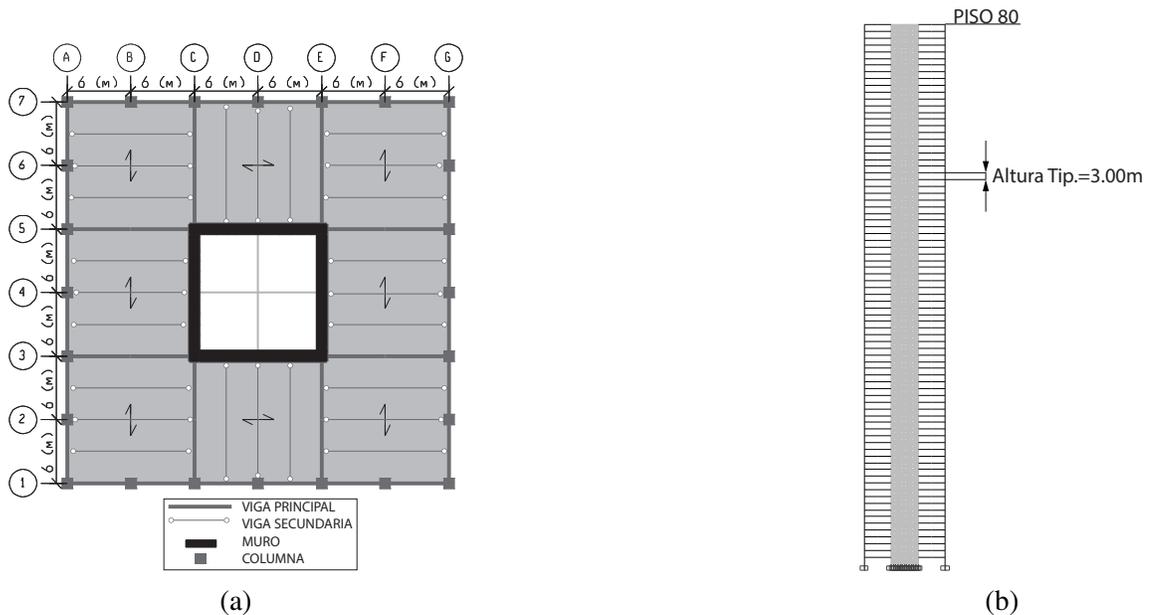


Figura 2.2. Geometría típica de edificio analizado. (a) Distribución de elementos en planta típica (b) Elevación del edificio sin *outriggers*.

El sistema principal que resiste tanto cargas laterales como las de gravedad esta formado por columnas perimetrales que se encuentran separadas 6 metros entre sí, mientras que la separación entre las columnas y el núcleo es de 12 metros; por lo tanto, las vigas perimetrales son de 6 metros de luz y las vigas que conectan las columnas con el núcleo tienen 12 metros de luz. Las distancias antes referidas se encuentran medidas entre ejes por lo tanto las luces libres serán menores considerando el espesor específico de cada componente.

Para el sistema secundario encargado de transmitir las cargas de gravedad al sistema principal, se utiliza una losa unidireccional con placa colaborante, la cual está asentada sobre vigas secundarias interiores de acero que tienen una conexión simple (no se transmite momento en los extremos) con el sistema principal de hormigón armado.

El edificio analizado mantiene una altura de entrepiso constante de 3 metros, lo cual con 80 pisos da una altura total del edificio de 240 metros. El sistema de *outrigger* considerado tiene un piso de altura. La razón de aspecto del edificio analizado (Sección 1.2.2) es de:

$$\text{Relación de aspecto} = \frac{\text{Altura del edificio}}{\text{Ancho del núcleo}} = \frac{240 \text{ m}}{12 \text{ m}} = 20, \quad (2.1)$$

lo que justifica la utilización de *outriggers* para dar rigidez al edificio y cumplir los requisitos de diseño.

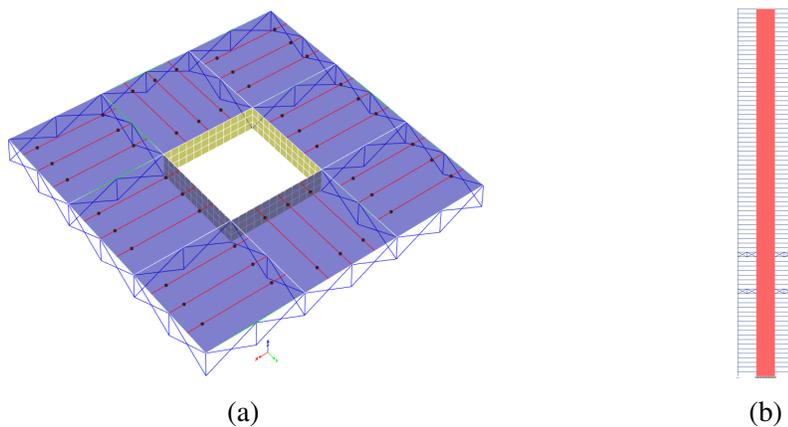


Figura 2.3. Edificio con *outriggers*. (a) Piso con *outriggers* (b) *Outriggers* en elevación.

En la Figura 2.3a se presenta un piso con el sistema de *outriggers* mostrando la distribución de elementos típica empleada; en la Figura 2.3b un ejemplo en elevación de la ubicación de dos *outriggers*.

### 2.3. Materiales

Los materiales a emplearse en la construcción de edificios de gran altura juegan un papel muy importante a la hora de definir un sistema estructural u otro. La tendencia actual a emplear materiales cada vez más resistentes que mejoran el desempeño de las estructuras ha permitido en el caso de los edificios alcanzar cada vez mayores alturas. En este contexto, para el sistema principal resistente a cargas laterales se ha seleccionado un hormigón de alta resistencia, mientras que para el sistema de gravedad se utilizan vigas secundarias de acero estructural y losa con placa colaborante, sobre la cual se coloca un concreto con la resistencia mínima exigida por la normativa.

Para modelar la estructura se emplean los siguientes materiales:

- **Acero A36.-** Acero ASTM A36 empleado en las vigas secundarias que sostienen la losa con placa colaborante.
- **Hormigón fc210.-** Este hormigón se emplea para las losas con placa colaborante.
- **Hormigón fc680.-** Este hormigón se emplea para vigas, columnas y muros que forman parte de la estructura.

Tabla 2.1. Propiedades de los materiales empleados

Parámetro	Acero A36	Hormigón fc210	Hormigón fc680
<b>Resistencia</b>	2530 $kg/cm^2$	210 $kg/cm^2$	680 $kg/cm^2$
<b>Densidad</b>	7850 $kg/m^3$	2400 $kg/m^3$	2400 $kg/m^3$
<b>Modulo de Young</b>	200 $GPa$	21 $GPa$	39 $GPa$
<b>Coficiente de Poisson</b>	0.3	0.2	0.2

En la Tabla 2.1 se resumen las propiedades de los materiales utilizados.

## 2.4. Cargas

### 2.4.1. Cargas de gravedad

#### 2.4.1.1. Carga Viva

La carga viva (**LL**) se asigna considerando que se analiza un edificio de oficinas, de acuerdo con lo especificado en la Tabla 4.3-1 de ASCE 7-16 (ASCE, 2017). Por lo tanto, la carga viva a utilizar es:

$$\mathbf{LL} = 2,40 \text{ kN/m}^2 \approx 250 \text{ kg/m}^2$$

La carga es asignada en los modelos como carga distribuida uniforme por metro cuadrado sobre las losas en cada piso. Es importante señalar que en los modelos analizados y para el predimensionamiento realizado en los elementos no se consideran factores de reducción de carga viva.

#### 2.4.2. Carga Muerta

La carga muerta (**DL**) corresponde al peso propio de los elementos que forman la estructura: muros, vigas, columnas y losas. No se considera carga muerta sobreimpuesta. Para el calculo de la carga muerta se emplean las densidades presentadas en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Peso especifico de materiales

<b>Material</b>	<b>Tipo</b>	<b>Densidad</b> [kg/m <sup>3</sup> ]
ASTM A36	Acero	7850
$f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$	Hormigón	2400
$f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$	Hormigón	2400

La carga muerta es calculada y asignada automáticamente por el software utilizado.

### 2.4.3. Carga Lateral

En las estructuras analizadas se considera la acción de la carga del viento como única carga lateral. Los factores utilizados son comunes para todos los edificios a fin de tener un parámetro de comparación similar.

#### 2.4.3.1. Carga de viento

Para el cálculo de la carga de viento se consideran las especificaciones de los capítulos 26 y 27 de ASCE 7-16 (ASCE, 2017).

Para el cálculo de la distribución de presiones en altura se consideran los siguientes factores con sus respectivos valores:

- **Factor de direccionalidad del viento.-** Para el sistema principal resistente a fuerzas de viento, de la Tabla 26.6-1 de ASCE 7-16 (ASCE, 2017) se obtiene el valor de  $K_d = 0,85$ .
- **Factor Topográfico.-** Se considera que no existe influencia de la topografía en el efecto de viento, por lo tanto,  $K_{zt} = 1$ .
- **Factor de elevación del terreno.-** Es permitido para todos los casos tomar un factor de elevación del terreno  $K_e = 1$ .
- **Velocidad básica del viento.-** Para el presente análisis se considera una velocidad básica del viento  $v = 44,7 \text{ m/s}$ .
- **Categoría de exposición.-** Se asume que el edificio se encuentra en un área urbana con numerosos y obstrucciones poco espaciadas, ubicándose en la categoría de exposición **B**.
- **Altura máxima.-** La altura máxima del edificio analizados es  $z_{max} = 240 \text{ m}$ .
- La dimensión horizontal del edificio medida normal a la dirección del viento es  $B = 36 \text{ m}$ .

- La dimensión horizontal del edificio medida paralela a la dirección del viento es  $L = 36 \text{ m}$ .
- **Factor de amortiguamiento.-** Considerando un edificio de concreto con una altura de  $240 \text{ m}$ , el porcentaje de amortiguamiento respecto al crítico  $\beta = 0,015$ , ha sido seleccionado en base a valores obtenidos de mediciones en campo para edificios de gran altura (Cruz y Miranda, 2017).

La presión por velocidad se calcula mediante la expresión

$$q_z = 0,613 K_z K_{zt} K_d K_e V^2 \quad (N/m^2); \quad V \text{ en } m/s \quad (2.2)$$

Para el calculo del coeficiente de exposición de presión por velocidad se utilizan las expresiones:

- Para  $4,6 \text{ m} \leq z \leq z_g$   $K_z = 2,01(z/z_g)^{2/\alpha}$
- Para  $z < 4,6 \text{ m}$   $K_z = 2,01(4,6/z_g)^{2/\alpha}$

donde  $\alpha$  y  $z_g$  se obtienen de la Tabla 26.11-1 de ASCE 7-16 (ASCE, 2017), en función de la categoría de exposición.

En la Figura 2.4 se muestra la gráfica de la distribución de presiones producidas por la velocidad del viento y como esta varia en la altura del edificio.

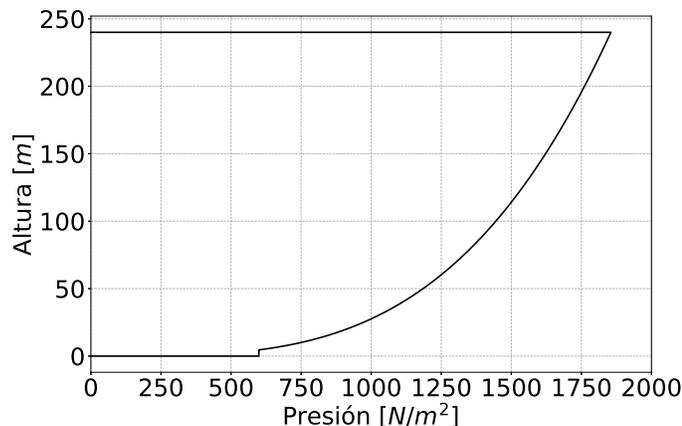


Figura 2.4. Distribución de presiones por velocidad de viento.

Una vez que se ha obtenido la presión por efecto de la velocidad del viento, se calcula el efecto de ráfaga, y se distribuye la presión en las distintas caras del edificio, según se especifica en el capítulo 27 de ASCE 7-16 (ASCE, 2017).

Para el cálculo del efecto de ráfaga es necesario conocer la frecuencia fundamental natural del edificio y clasificarlo de acuerdo a ésta. Considerando las dimensiones del edificio se aproxima el periodo fundamental obteniendo un periodo mínimo y un periodo máximo (Xu, Xiao, y Li, 2014), cuando la altura del edificio ( $H$ ) es  $150m \leq H < 250m$ :

$$T_1 \approx 0,25\sqrt{H} \approx 3,87 \text{ seg} \quad (2.3)$$

$$T_1 \approx 0,40\sqrt{H} \approx 6,20 \text{ seg} \quad (2.4)$$

La ecuación dada en ASCE 7-16 (ASCE, 2017) para la aproximación del periodo en estructuras de concreto con marcos resistentes a momento

$$T_a = C_t h_n^x \quad (2.5)$$

donde,  $C_t = 0,0466$  y  $x = 0,9$  para pórticos de concreto, con lo cual se obtiene un periodo fundamental  $T_a = 6,77 \text{ seg}$ , la frecuencia natural es  $n_1 = 0,15 \text{ Hz}$ . Con estas consideraciones la estructura se clasifica como flexible, con lo cual el factor de ráfaga dado en ASCE 7-16 (ASCE, 2017), se calcula como:

$$G_f = 0,925 \left( \frac{1 + 1,7I_{\bar{z}} \sqrt{g_Q^2 Q^2 + g_R^2 R^2}}{1 + 1,7g_v I_{\bar{z}}} \right) \quad (2.6)$$

donde,  $g_Q$  y  $g_V$  son tomados como 3.4 y  $g_R$  esta dado por

$$g_R = \sqrt{2 \ln(3,600n_1)} + \frac{0,577}{\sqrt{2 \ln(3,600n_1)}} \quad (2.7)$$

el factor de respuesta resonante  $R$  esta dado por

$$R = \sqrt{\frac{1}{\beta} R_n R_h R_B (0,53 + 0,47 R_L)} \quad (2.8)$$

$$R_n = \frac{7,47 N_1}{(1 + 10,3 N_1)^{5/3}} \quad (2.9)$$

$$N_1 = \frac{n_1 L_{\bar{z}}}{\bar{V}_{\bar{z}}} \quad (2.10)$$

$$R_{\ell} = \frac{1}{\eta} - \frac{1}{2\eta^2} (1 - e^{-2\eta}) \quad \text{para } \eta > 0 \quad (2.11)$$

$$R_{\ell} = 1 \quad \text{para } \eta = 0 \quad (2.12)$$

donde el subíndice  $\ell$  debe ser reemplazado por  $h$ ,  $B$ , y  $L$ , respectivamente, de acuerdo con las definiciones dadas en el artículo 26.3 de ASCE 7-16 (ASCE, 2017).

Dependiendo del parámetro se calcula  $\eta$ , siendo para  $h$

$$\eta = 4,6 n_1 h / \bar{V}_{\bar{z}}, \quad (2.13)$$

para  $B$

$$\eta = 4,6 n_1 B / \bar{V}_{\bar{z}}, \quad (2.14)$$

para  $L$

$$\eta = 15,4 n_1 L / \bar{V}_{\bar{z}}. \quad (2.15)$$

Donde la velocidad horaria media del viento ( $m/s$ ) a una altura  $\bar{z}$  se calcula mediante

$$\bar{V}_{\bar{z}} = \bar{b} \left( \frac{\bar{z}}{10} \right)^{\bar{\alpha}} V \quad (2.16)$$

Los valores de  $\bar{\alpha}$  y  $\bar{b}$  se obtienen de la Tabla 26.9-1; y  $V$  es la velocidad básica del viento en  $m/s$ .

El factor de ráfaga obtenido al reemplazar los datos en la Ec. 2.6 es

$$G_f = 1,18 \quad (2.17)$$

El coeficiente de presión en el muro  $C_p$  se obtiene de la Figura 27.3-1 de ASCE 7-16 (ASCE, 2017), el cual está en función de la cara donde se aplica la presión de viento.

Para asignar la presión que actuará en las distintas caras del edificio, se distribuye de acuerdo con lo especificado en la Figura 27.3-1 de ASCE 7-16 (ASCE, 2017), la cual se presenta en la Figura 2.5.

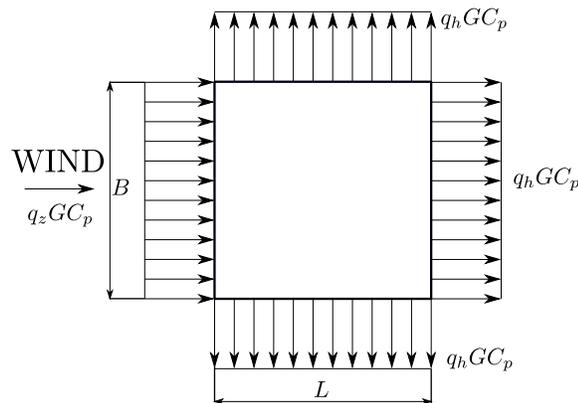


Figura 2.5. Aplicación de carga del viento en caras del edificio

Una vez que se aplican los coeficientes de distribución para cada cara en la que se asignará la presión del viento, se obtienen las cargas distribuidas correspondientes.

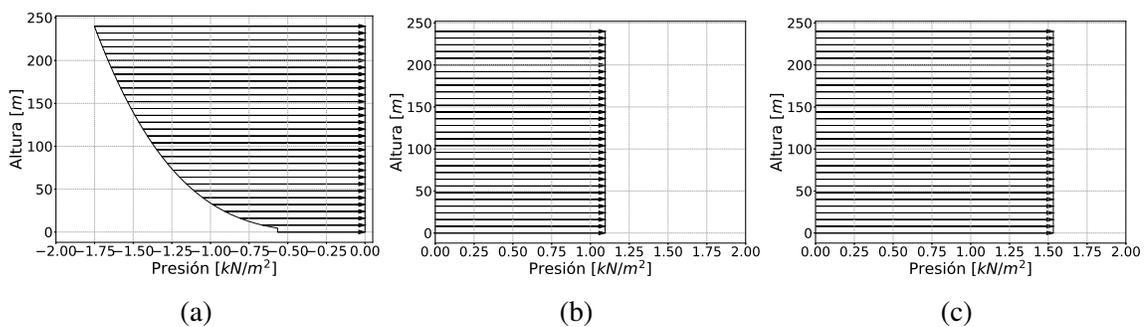


Figura 2.6. Cargas aplicadas por acción del viento. (a) Carga barlovento, (b) Carga sotavento, y (c) Carga en caras perpendiculares a la acción del viento.

En la Figura 2.6 se muestran las cargas que serán asignadas en cada cara del edificio, como se observa en barlovento la cara tiene una distribución parabólica desde la parte superior hasta la altura mínima de 4.6 metros, desde donde es rectangular hasta la base del edificio; mientras que las cargas a ser asignadas en las caras laterales del edificio son rectangulares en toda la altura y su magnitud depende del coeficiente de distribución respectivo.

En los edificios analizados en el presente trabajo se asigna la carga como una carga distribuida sobre las vigas, por lo cual se calcula el valor correspondiente en cada altura de piso mediante integración numérica.

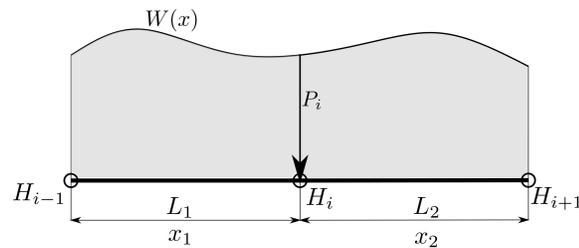


Figura 2.7. Carga distribuida equivalente de viento a ser asignada en cada altura de piso.

En la Figura 2.7 se muestran dos tramos de viga sujetos a la acción de la carga  $W(x)$ , para reemplazar la carga distribuida por una carga puntual equivalente  $P_i$  se realiza la integración

$$P_i = \frac{\int_{H_{i-1}}^{H_i} (x - H_{i-1}) W(x) dx}{H_i - H_{i-1}} + \frac{\int_{H_i}^{H_{i+1}} (H_{i+1} - x) W(x) dx}{H_{i+1} - H_i} \quad (2.18)$$

La integral es evaluada mediante integración numérica utilizando la regla del trapecio pues se considera que la carga ha sido suficientemente discretizada para tener una buena aproximación.

## 2.5. Combinaciones de carga

Dentro del procedimiento empleado se encuentra el dimensionamiento de las secciones para los casos de edificios con y sin *outriggers*. Las secciones se dimensionan para la combinación de cargas de gravedad y cargas laterales con sus respectivos factores de mayoración.

Las combinaciones de carga utilizadas cumplen con lo especificado en ASCE 7-16 (ASCE, 2017), las cuales son:

$$\begin{aligned}U &= 1,4DL \\U &= 1,2DL + 1,6LL \\U &= 1,2DL + 1,0WL + LL \\U &= 0,9DL + 1,0WL\end{aligned}\tag{2.19}$$

donde  $U$  es la carga última;  $DL$  es la carga muerta;  $LL$  es la carga viva y  $WL$  es la carga de viento.

No se considera carga muerta sobreimpuesta ( $SDL$ ), ni se considera la reducción de carga viva en el predimensionamiento de los elementos.

## 2.6. Predimensionamiento de *outriggers*, columnas y muros

En el predimensionamiento de *outriggers*, columnas y muros se considera únicamente la influencia de la carga axial en los elementos. El criterio empleado para su dimensionamiento ha sido tomado en base al Art. 21.9.5.3 del Decreto DS-60 (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2011) donde se limita la carga axial en elementos de hormigón armado a

$$P_u \leq 0,35 f'_c A_g.\tag{2.20}$$

En el esquema mostrado en la Figura 2.8 se muestra el procedimiento empleado para el predimensionamiento, partiendo del modelo inicial, tras cierto número de iteraciones

se obtiene la estructura denominada *Predimensionamiento 1*, donde se divide en grupos de acuerdo a las secciones asignadas, el superíndice (1) indica que en este grupo no se considera la influencia de los *outriggers*. Al agregar los *outriggers* y realizar nuevamente un dimensionamiento considerando su influencia, los grupos obtenidos se identifican con el superíndice (2).

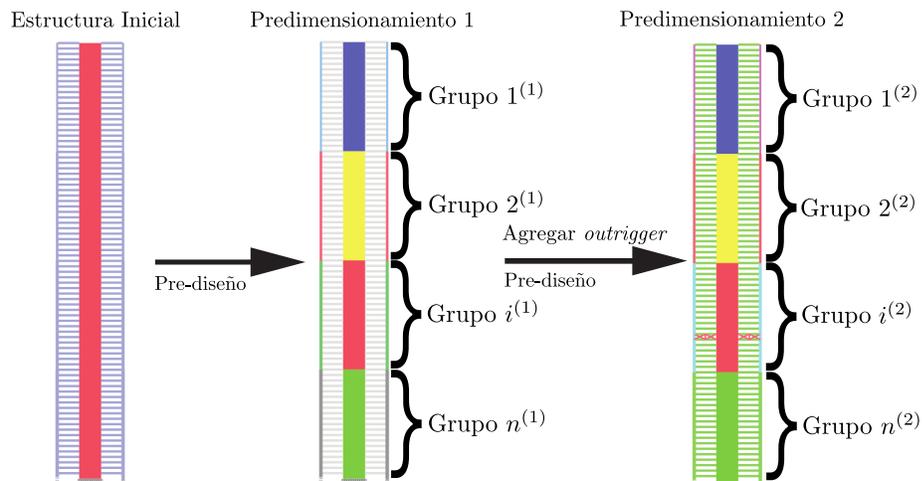


Figura 2.8. Esquema de etapas llevadas a cabo para el predimensionamiento, con la separación en grupos de elementos.

Para realizar el análisis de los muros que forman parte del núcleo se utiliza la herramienta *Pier* de ETABS, donde se agrupan varios elementos *shell*, los cuales, por razones de diseño, se busca que se comporten como un elemento uniforme, de los que se obtiene la fuerza axial, el momento y cortante en cada piso, en cada uno de los muros que forman parte del núcleo.

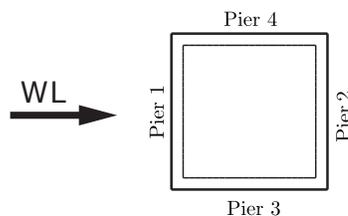


Figura 2.9. Nomenclatura utilizada en muros del núcleo. La nomenclatura se referencia con respecto a la dirección de la carga de viento *WL* aplicada en la cara de barlovento.

En la Figura 2.9 se presentan la asignación de los elementos *Pier* en el núcleo del edificio, en todos los edificios estudiados y en los resultados presentados se utiliza la misma nomenclatura.

### 2.6.1. Predimensionamiento sin *outrigger*

Las cargas axiales obtenidas para cada caso de carga en los elementos *Pier*, de acuerdo con la numeración presentada en la sección 2.6 son presentadas en la Figura 2.10.

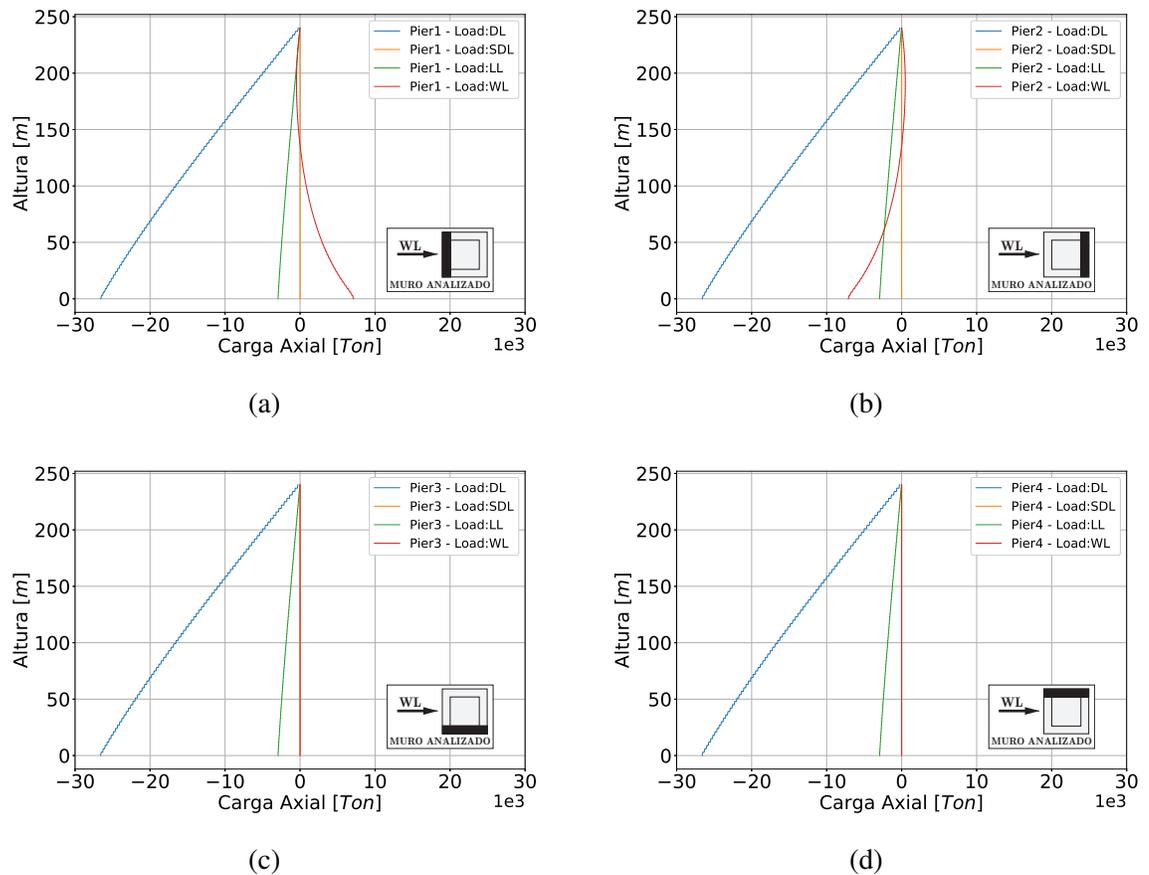


Figura 2.10. Fuerzas axiales obtenidas en los muros para los casos de carga utilizados. Positivo indica tracción y negativo indica compresión. (a) Carga axial en *Pier1*. (b) Carga axial en *Pier2*. (c) Carga axial en *Pier3*. (d) Carga axial en *Pier4*.

Como se observa en la Figura 2.10, el efecto de las cargas de gravedad es similar en los cuatro muros que forman el núcleo; mientras que el efecto de la carga de viento es diferente en el muro *Pier1* y *Pier2*, encontrándose en tracción y compresión respectivamente; mientras que los muros *Pier3* y *Pier4* (paralelos a la dirección del viento) no se ven afectados por la carga de viento en cuanto a carga axial.

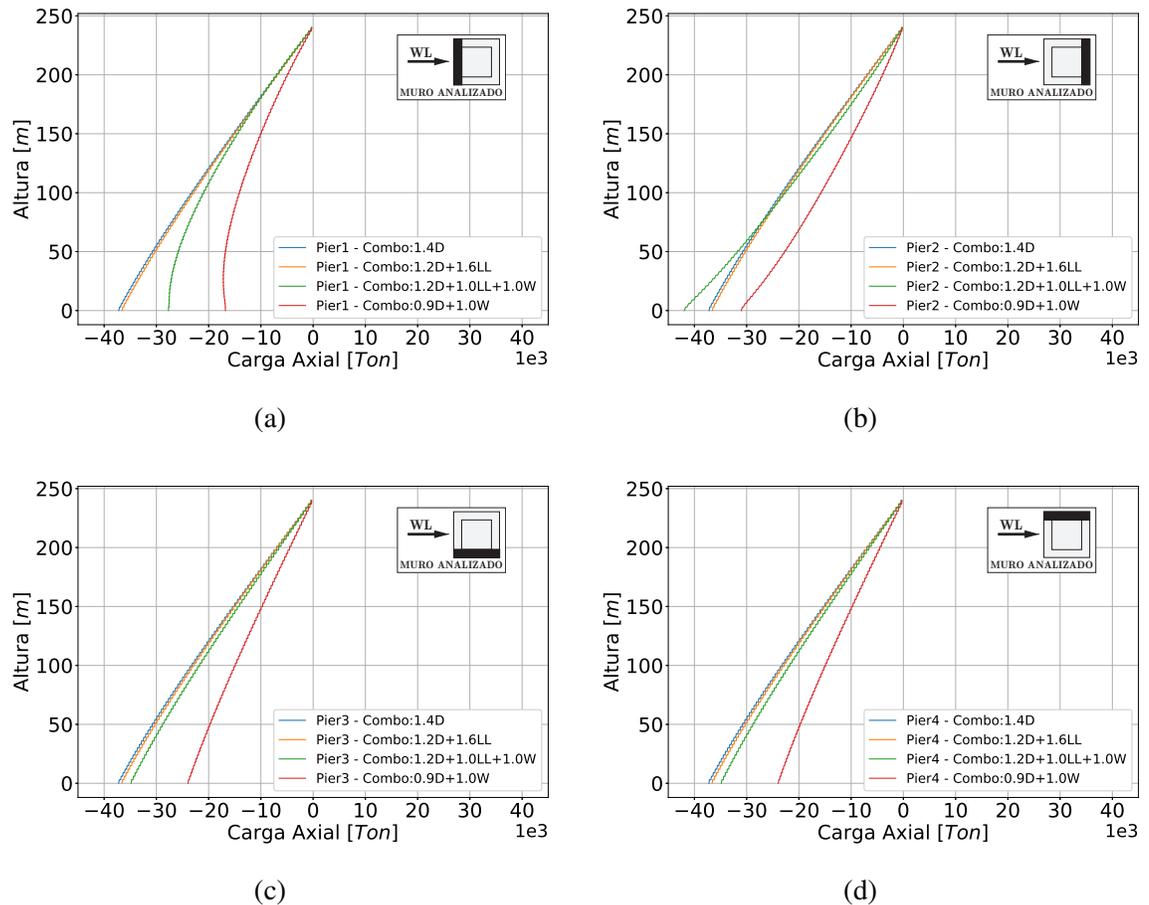
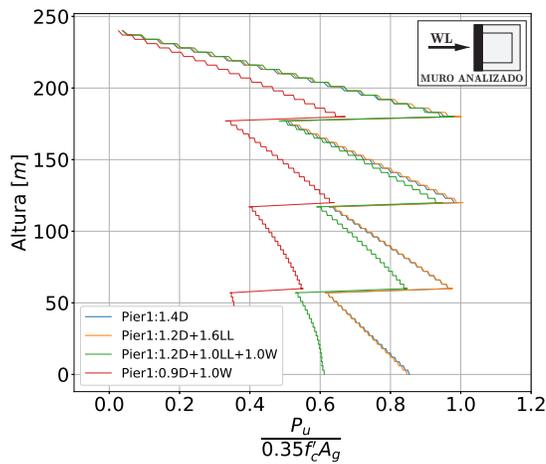
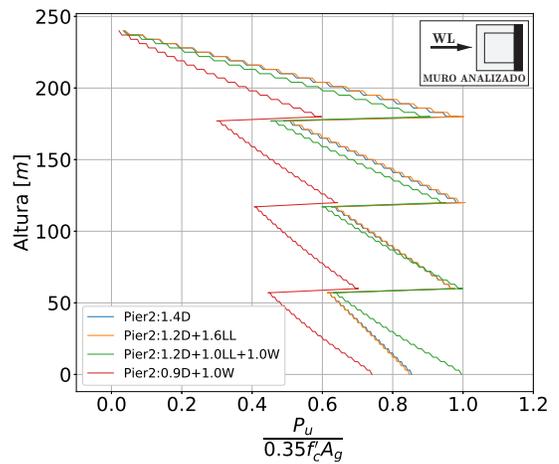


Figura 2.11. Fuerzas obtenidas en los muros para las combinaciones de carga. (a) Carga axial en *Pier1*. (b) Carga axial en *Pier2*. (c) Carga axial en *Pier3*. (d) Carga axial en *Pier4*.

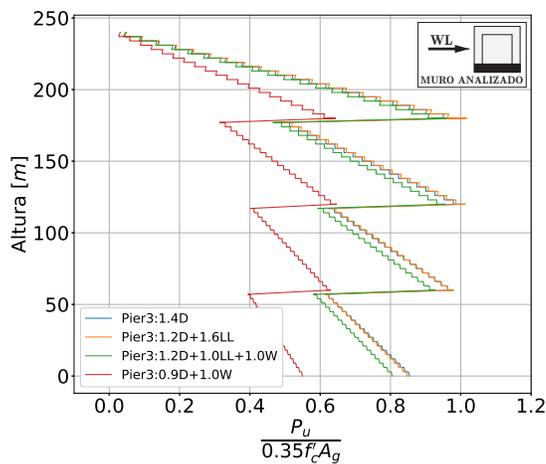
Las cargas axiales últimas en los muros, producidas por las combinaciones de carga definidas en la Sección 2.5 se presentan en la Figura 2.11. La mayor carga axial en la base del núcleo se produce en el muro *Pier2* por el efecto de compresión de la carga de viento.



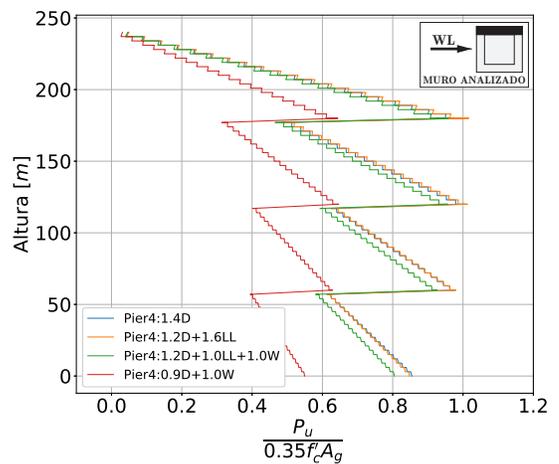
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.12. Carga axial última normalizada respecto a la capacidad de los muros; grupos uniformes de muro de 20 pisos.(a)Utilización en *Pier1*. (b) Utilización en *Pier2*. (c) Utilización en *Pier3*. (d) Utilización en *Pier4*.

En todos los casos para el predimensionamiento se selecciona el elemento más cargado de los 4 muros del núcleo y se dimensiona para estas condiciones de carga. Una vez obtenida la sección se asigna la misma a todos los elementos del núcleo que forman parte del grupo en función del número de pisos que tendrán sección similar. En la Figura 2.12 se presenta la carga axial última normalizada con respecto al límite de carga axial de los

muros; en el caso presentado se han considerado grupos uniformes de 20 pisos en muros y columnas.

Al tratarse de un edificio simétrico en las dos direcciones principales, se puede considerar que, al cambiar la dirección de la carga de viento, se obtiene el mismo efecto en los demás muros con lo cual se justifica mantener la misma sección en las 4 caras del núcleo.

El proceso de predimensionamiento de las columnas es similar al realizado para los muros, con la diferencia que la carga axial se obtiene directamente para cada uno de los elementos. Las secciones se agrupan en el mismo número de pisos que los muros.

### **2.6.2. Predimensionamiento con *outriggers***

En los casos de los edificios con *outriggers* donde se dimensionan las secciones, el procedimiento de cálculo núcleo y columnas perimetrales es similar a lo presentado en la Sección 2.6.1. El dimensionamiento de los *outriggers* se lo realiza considerando que los elementos añadidos a la estructura son diagonales que trabajaran mayormente bajo carga axial, por lo cual el criterio de predimensionamiento esta dado por la Ecuación 2.20 del Decreto Supremo DS-60.

Una vez que han sido predimensionadas todas las diagonales que forman parte del *outrigger* y las diagonales de la armadura de borde, se asigna la sección mas desfavorable obtenida a todos los elementos del *outrigger* analizado y su correspondiente armadura de borde.

Cuando el *outrigger* cambia de piso, para el dimensionamiento de las secciones en el nuevo caso de análisis se parte de las secciones dimensionadas en el caso anterior, con esto se logra acelerar la convergencia en el predimensionamiento.

## 2.7. Parámetros de estudio

### 2.7.1. Energía de deformación

El sistema estructural del edificio debe ser lo suficientemente rígido para controlar los desplazamientos y aceleraciones cuando se encuentra bajo la acción de cargas de viento. Al rigidizar un edificio se busca reducir al mínimo los desplazamientos para un cierto número de condiciones. Una medida global del desplazamiento es la energía de deformación o trabajo externo<sup>1</sup>, obteniéndose el mínimo trabajo externo para la máxima rigidez.

Para el proceso de búsqueda de la posición óptima del *outrigger* se considera el problema

$$\text{minimizar} \quad \Psi(X) = \mathbf{f}^T \mathbf{u}(X) \quad (2.21)$$

$$\text{Sujeto a} \quad \mathbf{K}(X)\mathbf{u}(X) = \mathbf{f} \quad (2.22)$$

donde,  $\mathbf{f}$  es el vector correspondiente a la fuerza de viento encontrada en la Sección 2.4.3.1, distribuida en los nodos de la estructura;  $\mathbf{u}$  corresponde al vector de desplazamiento nodal bajo la acción de la fuerza de viento;  $\mathbf{K}$  corresponde a la matriz de rigidez global de la estructura;  $X$  corresponde a la posición del sistema de *outriggers* en la altura del edificio.

Al evaluar la matriz de rigidez global  $\mathbf{K}$  de la estructura, en función de la posición del sistema de *outriggers* se tiene un problema altamente no lineal, adicionalmente, se debe considerar la restricción en la carga axial máxima permitida en los elementos, la cual se definió en la Sección 2.6; esta restricción no se incluye directamente dentro del problema de optimización, sino más bien ha sido incluida de manera implícita dentro de la evaluación de la matriz de rigidez global de la estructura.

---

<sup>1</sup>Llamada *compliance* en inglés.

### 2.7.2. Período fundamental de la estructura

El período fundamental ( $T$ ) del edificio y la frecuencia natural asociada a la vibración libre, son un concepto clave para entender la relación entre la rigidez y la masa del edificio (Sarkisian, 2012). Considerando un sistema equivalente con un solo grado de libertad, la relación

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} \quad (2.23)$$

donde  $M$  es la masa de la estructura y  $K$  es la rigidez de la estructura. Estudiar el efecto de esta ecuación resulta útil conceptualmente pues, para la misma masa, una reducción de la rigidez incrementa el período de la estructura. Para un sistema de varios grados de libertad se deberá resolver el correspondiente problema de valores propios, sin embargo, la relación entre la masa, la rigidez y el período fundamental presentara un comportamiento similar al indicado para un grado de libertad.

La influencia del sistema de *outriggers* en la rigidez global de la estructura será evaluada para cada uno de los casos a presentar, el objetivo es determinar en que punto se logra una rigidez global mas alta para el edificio con sistema de *outriggers* al minimizar el período de la estructura en su modo fundamental.

### 2.7.3. Desplazamiento del techo

Al realizar un análisis elástico lineal, los desplazamientos en cualquier nodo de la estructura se obtienen directamente de la relación

$$\mathbf{K}(X)\mathbf{u}(X) = \mathbf{f} \quad (2.24)$$

Al analizar el comportamiento de edificios es común verificar el desplazamiento de techo que es donde se producen los mayores desplazamientos. Con un mayor desplazamiento del techo se tiene una estructura menos rígida, es por lo tanto factible estudiar la posición del sistema de *outriggers* que minimiza el desplazamiento del techo y su relación con los demás parámetros indicados.

## 2.8. Casos analizados

Como se indico en la sección anterior de definen las funciones objetivo con las cuales se revisa el comportamiento global del edificio. Las tres funciones objetivo a analizar en el presente trabajo son:

- Energía de deformación producida por la fuerza de viento
- Período fundamental de la estructura
- Desplazamiento de techo

Los valores mínimos en el presente estudio son obtenidos realizando una búsqueda global discreta de acuerdo a las condiciones dadas en cada caso. Los casos a analizar son:

- Posición óptima de un *outrigger*, sin variación en la sección de los elementos.
- Posición óptima de un *outrigger*, en función su rigidez.
  - Con secciones de muros y columnas constantes en toda la altura del edificio.
  - Con predimensionamiento de secciones de muros y columnas en grupos de 10 pisos.
  - Con predimensionamiento de secciones de muros y columnas en grupos de 20 pisos.
- Posición óptima de dos *outriggers*, sin variación en la sección de los elementos.

## CAPÍTULO 3. EJEMPLOS Y APLICACIONES

### 3.1. Posición óptima de un *outrigger* sin variación en la sección de los elementos

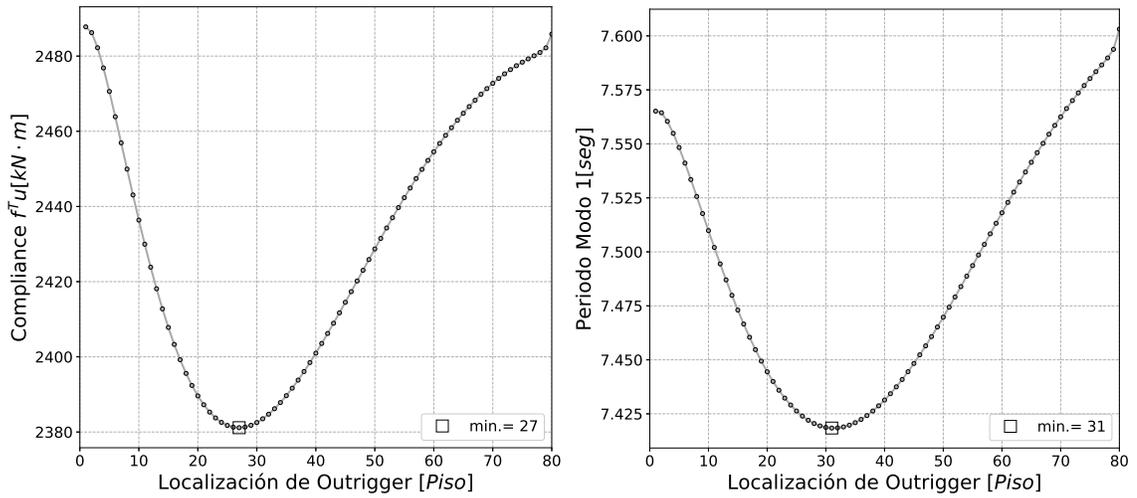
Debido a la cantidad de variables que influyen en el diseño de un edificio y definen su comportamiento ante la acción de cargas laterales, se inicia evaluando la posición óptima de un solo *outrigger* en una estructura que mantiene constantes las secciones de los elementos del núcleo, columnas, vigas y *outrigger*.

Las secciones de los elementos que conforman la estructura se muestran en la Tabla 3.1, los cuales coinciden con los valores tomados por Lee y Tovar (Lee y Tovar, 2014). Las secciones se mantienen constantes en toda la altura del edificio para todos los análisis, donde se varía únicamente la posición de los *outriggers*.

Tabla 3.1. Secciones utilizadas para el análisis del edificio sin realizar pre-dimensionamiento en función de las combinaciones de carga.

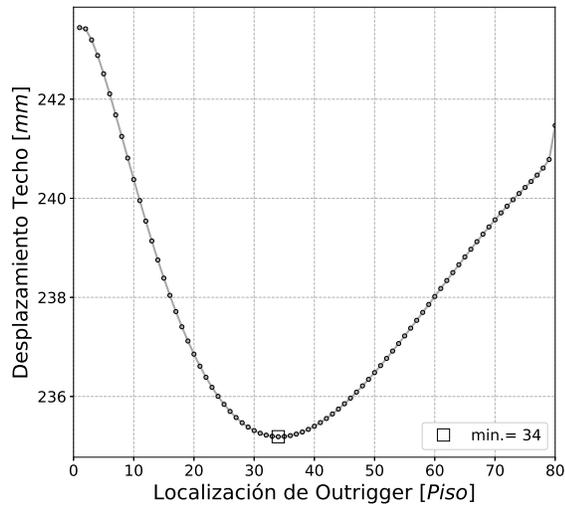
Grupo	Elemento	Sección		
		B	H	Área
		[m]	[m]	[m <sup>2</sup> ]
1	Viga	0.60	1.00	0.60
1	Columna	1.00	1.00	1.00
1	Muro	1.00	-	1.00
1	<i>Outrigger</i>	0.60	1.00	0.60

Para obtener los valores mínimos buscados se realizan 80 modelos diferentes variando la ubicación del *outrigger*, los resultados se presentan en la Figura 3.1. El trabajo externo es mínimo cuando el *outrigger* se ubica en el piso 27; el período es mínimo cuando el *outrigger* se ubica en el piso 31; el desplazamiento de techo mínimo se obtiene cuando el *outrigger* se ubica en el piso 34.



(a)

(b)



(c)

Figura 3.1. Resultados obtenidos variando posición del *outrigger* sin cambio en el tamaño de las secciones. (a) Trabajo externo realizado por la carga de viento. El mínimo trabajo externo es obtenido cuando el *outrigger* se ubica en el piso 27. (b) Período obtenido para el primer modo de vibración. El mínimo período es obtenido cuando el *outrigger* se ubica en el piso 31. (c) Desplazamiento del techo bajo la acción de la carga de viento. El mínimo desplazamiento de techo es obtenido cuando el *outrigger* se encuentra en el piso 34.

Tabla 3.2. Comparación de resultados para la posición óptima de un *outrigger*

Parámetro	Obtenido		Variación	Referencia		
	Piso	$x/H$		Piso	$x/H$	Autor
Trabajo Externo	27	0.338	11 %	24	0.300	(Lee y Tovar, 2014)
Período	31	0.388	29 %	40	0.500	(Rutenberg, 1979)
Desplazamiento techo	34	0.425	3 %	33	0.413	(Lee y Tovar, 2014)

En la Tabla 3.2 se comparan los resultados mínimos de la Figura 3.1 con los obtenidos por otros autores. La relación entre la altura total del edificio ( $H$ ) y la altura a la cual se ubica el *outrigger* ( $x$ ) se utiliza como parámetro de comparación para el cálculo de la variación presentada.

Se observa que dependiendo del parámetro de comparación se presenta una mayor o menor variación. En el caso del trabajo externo se obtiene una variación de 11 % con respecto a la referencia; mientras que en el desplazamiento del techo se obtiene un 3 % de variación. Al ser valores obtenidos con respecto a la misma referencia, se podría analizar la variación en los resultados considerando los parámetros que difieren entre los dos estudios, los principales identificados son:

- La carga lateral de viento considerada en los dos estudios.
- El sistema de entrepiso y su rigidez.
- Módulo de Young de los materiales empleados
- No se consideran efectos de segundo orden, ni deformaciones por corte.

Al comparar el piso óptimo obtenido que minimiza el periodo fundamental de la estructura con la referencia (Rutenberg, 1979) se verifica una diferencia considerable del 29 %, sin embargo, se debe tomar en cuenta que el estudio de referencia ha sido realizado de manera analítica con importantes simplificaciones que no se toman en cuenta en los modelos de elementos finitos realizados en el presente estudio.

Para contrastar la información obtenida se podrían realizar una mayor cantidad de modelos donde se varíen la geometría del edificio y la rigidez de los elementos.

### 3.2. Posición óptima de un *outrigger* en función de su rigidez

En esta sección se evalúa la influencia de la rigidez del *outrigger* en su posición óptima dentro del edificio. Partiendo del edificio analizado en la sección anterior se evalúa la influencia de la rigidez del *outrigger* sin variar las secciones del núcleo, ni las columnas perimetrales; luego se evalúa la influencia de la rigidez del *outrigger* variando las secciones de muros y columnas en función de los requerimientos de carga axial.

Cuando el *outrigger* ha sido colocado en el piso correspondiente (Figura 3.2a), su influencia en el comportamiento global del edificio se evalúa variando la sección transversal de las diagonales que lo conforman, las cuales se muestran en la Figura 3.2b.

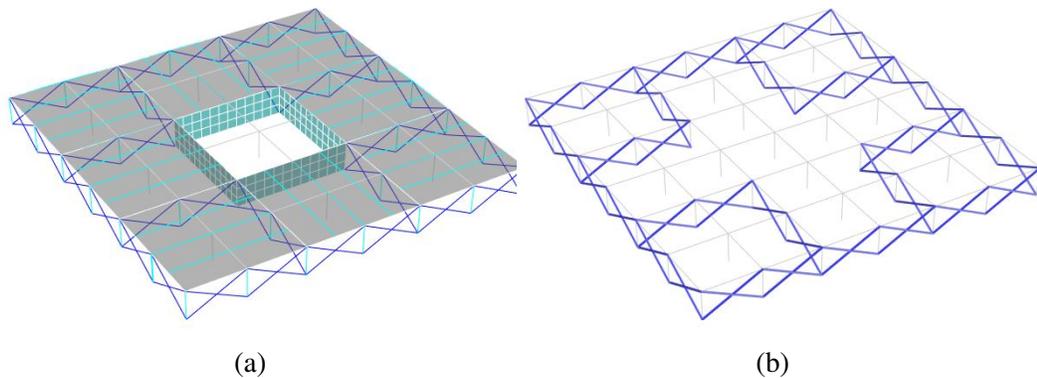


Figura 3.2. Piso con *outrigger*. (a) Elementos del piso con *outrigger* (b) Elementos variables del *outrigger*.

En un edificio simplificado de dos dimensiones, el *outrigger* puede ser considerado como una viga en voladizo a fin de evaluar su rigidez (Taranath, 2009). En el presente trabajo para la evaluación de la rigidez del *outrigger*, se considera la influencia de las diagonales ubicadas entre los pisos donde se ubicará el sistema, en la rigidez presentada no se toma en cuenta la rigidez de la losa de piso, ni la armadura de borde.

En la Figura 3.3a se presenta el esquema de un piso típico del edificio analizado; para evaluar la rigidez a flexión del piso, no se considera la rotación del núcleo y se idealizan los apoyos como rígidos. En la Figura 3.3b se muestra la geometría del *outrigger*, se asume que los elementos que lo conforman tienen la misma sección al igual que las armaduras perimetrales. Para determinar la rigidez  $K_0$  del piso sin *outrigger* y la rigidez  $K_{out}$  del piso con *outrigger* considera la relación entre la carga aplicada  $P = 100 \text{ kN}$  y las deformaciones obtenidas:  $\delta_0$  para el piso sin *outrigger* y  $\delta_{out}$  para el piso con *outrigger*.

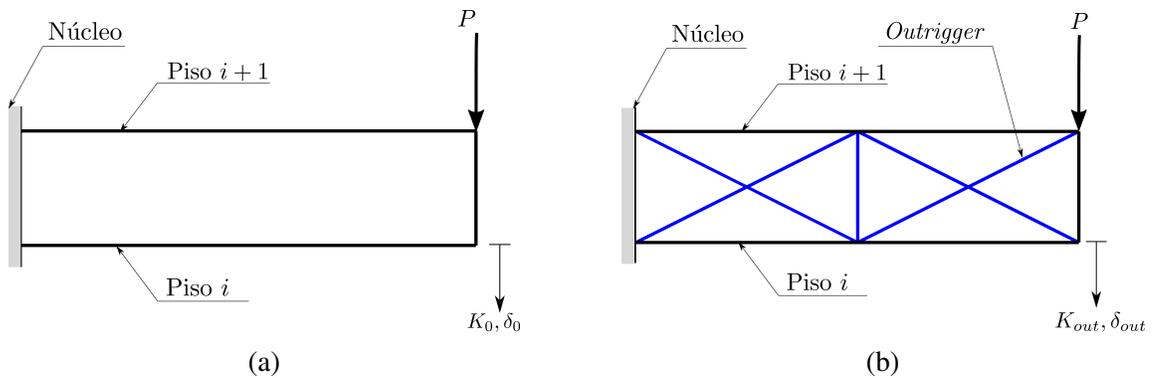


Figura 3.3. Esquema utilizado para el cálculo de la rigidez del piso con *outriggers*. (a) Piso sin *outrigger* con deformación  $\delta_0$  y rigidez  $K_0$ . (b) Piso con *outrigger* con deformación  $\delta_{out}$  y rigidez  $K_{out}$ .

Al modelar el *outrigger* se mantiene constante la sección en los cordones superior e inferior con un área correspondiente a la viga definida en la Tabla 3.1. Las diagonales inicialmente son modeladas con una sección de  $0,15 \text{ m} \times 0,15 \text{ m}$  con un área  $A_0 = 0,0225 \text{ m}^2$ , esta área se utiliza como referencia para los demás casos analizados. Las rigideces obtenidas se muestran en la Tabla 3.3, la relación entre las rigideces  $K_i/K_0$  se utiliza para normalizar las rigideces de los pisos con *outrigger* con respecto a la del piso sin *outrigger*.

En la Figura 3.4 se muestra el comportamiento obtenido para el piso con *outriggers* al incrementar la sección de las diagonales; a medida que se incrementa el área del elemento que formará el *outrigger* y la armadura de borde para el edificio analizado, la rigidez del piso tiende a un valor cercano 9 veces la rigidez del mismo piso sin *outrigger*.

Tabla 3.3. Variación de la rigidez del piso en función de la sección del *outrigger*. Los valores tabulados se obtienen para una carga puntual  $P = 100 \text{ kN}$  de acuerdo al esquema de la Figura 3.3; los resultados se presentan en la Figura 3.4.

$\frac{A_i}{A_0}$	Área <i>outrigger</i> [ $m^2$ ]	Deformación $\delta$ [ $mm$ ]	Rigidez [ $kN/mm$ ]	$\frac{K_i}{K_0}$
0	0.0000	4.534	22.1	1.0
1	0.0225	2.409	41.5	1.9
2	0.0450	1.750	57.1	2.6
5	0.1125	1.114	89.8	4.1
10	0.2250	0.832	120.2	5.4
15	0.3375	0.727	137.6	6.2
20	0.4500	0.672	148.8	6.7
30	0.6750	0.615	162.6	7.4
50	1.1250	0.568	176.1	8.0
100	2.2500	0.531	188.3	8.5
150	3.3750	0.517	193.4	8.8
200	4.5000	0.510	196.1	8.9
250	5.6250	0.506	197.6	9.0

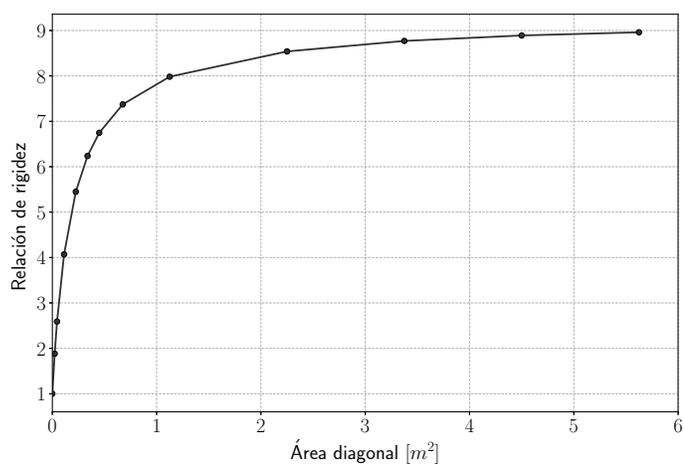


Figura 3.4. Variación en la relación de rigidez del piso en función del área del *outrigger*. Los valores en las ordenadas se encuentran normalizados con respecto a la rigidez del marco sin *outrigger*.

Aunque el gráfico presentado no incluye los efectos de la rotación del núcleo y deformación en las columnas, se observa que el incrementar la rigidez de las diagonales llevará

a un valor máximo de rigidez del piso. Como se observa en la Tabla 3.3 con los materiales utilizados se requieren áreas de las diagonales que físicamente serían imposibles de asignar con el material empleado, lo cual indicaría la necesidad de un cambio de material para alcanzar la máxima rigidez producida por las diagonales en el *outrigger*.

### 3.2.1. Trabajo externo mínimo con un *outrigger* variando su rigidez

En la Figura 3.5 se presentan los resultados obtenidos cuando se varía la rigidez en las diagonales que forman el *outrigger* y se mantiene constante la sección en muros y columnas perimetrales. Se observa un comportamiento uniforme de las curvas siendo suaves sin mayores variaciones cuando el *outrigger* se encuentra ubicado a partir del segundo piso. En los casos donde el *outrigger* tiene menor rigidez el trabajo externo mínimo se produce en el piso 30; a medida que se incrementa la rigidez del *outrigger* la posición óptima se encuentra al ser ubicado en el piso 29.

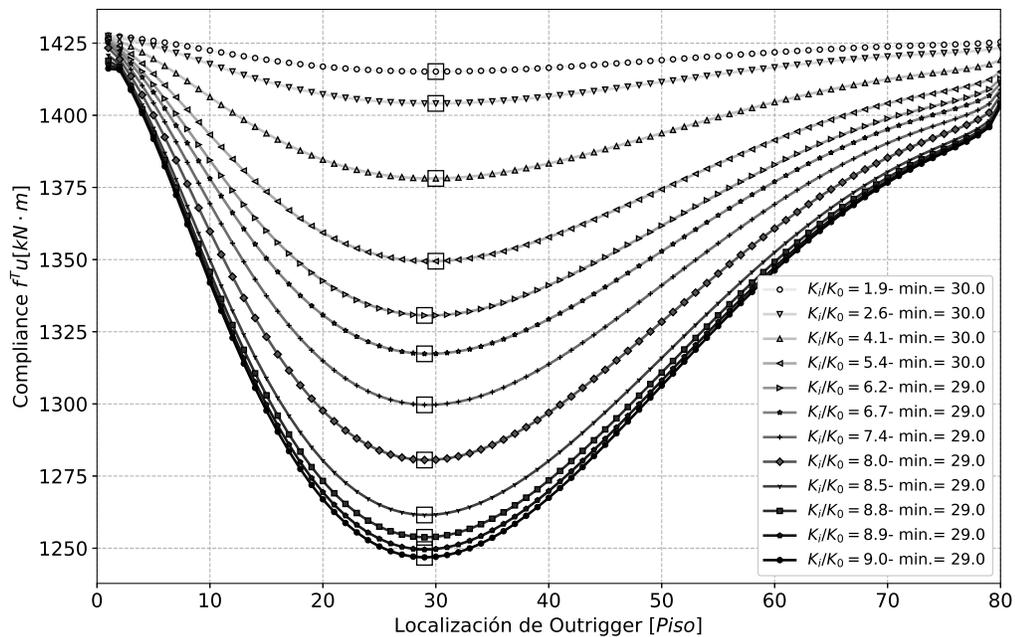


Figura 3.5. Variación del trabajo externo realizado por la carga de viento, en función de la rigidez del *outrigger*; sin variación en la sección del núcleo y columnas perimetrales.

En la Figura 3.6 se muestran los resultados obtenidos considerando predimensionamiento de muros del núcleo y columnas en grupos de 10 pisos. Con respecto a la Figura 3.5 las curvas obtenidas en la Figura 3.6 dejan de ser suaves y a medida que se incrementa la rigidez del *outrigger* se empieza a notar la aparición de valores mínimos locales.

Las curvas presentan irregularidad especialmente cuando el *outrigger* se encuentra ubicado en el piso 20. Los valores de trabajo externo mínimos en su mayoría se obtienen cuando el *outrigger* se encuentra ubicado en el piso 29, siendo este el valor promedio de colocación del *outrigger* para obtener el menor trabajo externo.

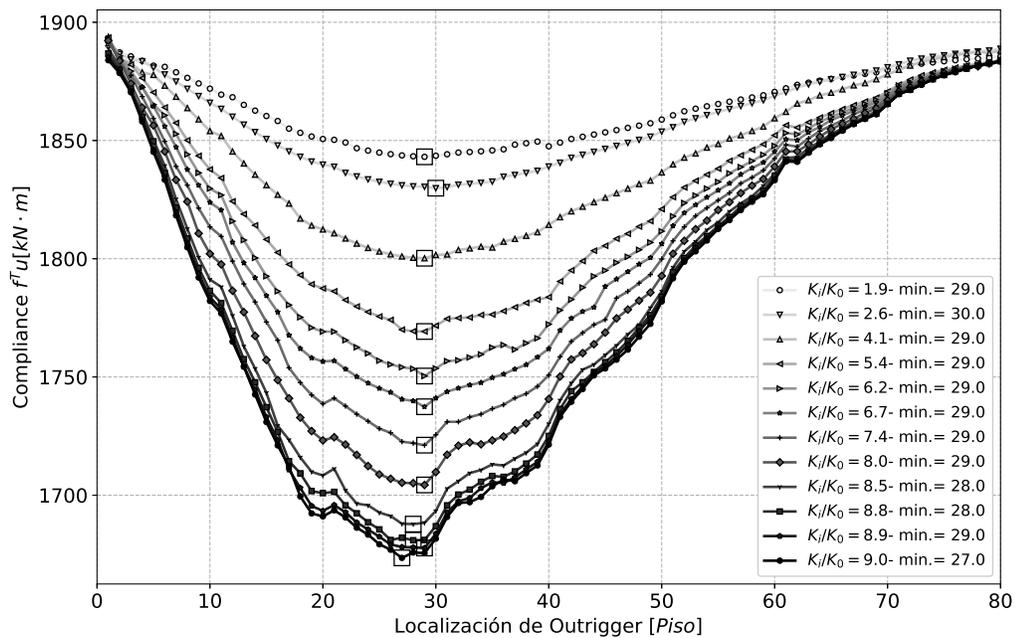


Figura 3.6. Variación del trabajo externo realizado por la carga de viento, en función de la rigidez del *outrigger*; con variación en la sección de muros y columnas en grupos de 10 pisos.

Al agrupar las secciones predimensionadas en grupos de 20 pisos, se obtienen los resultados presentados en la Figura 3.7, se observa que a medida que se incrementa la rigidez del *outrigger* y éste se encuentra cerca del piso 20 se produce un mínimo local. Al incrementar la rigidez del *outrigger* existe una tendencia donde el trabajo externo mínimo

se obtiene cuando el *outrigger* se encuentra en el piso 30. El valor promedio del piso óptimo se obtiene en el piso 31.

A diferencia de las curvas en las Figura 3.5 y 3.6 donde se presentan los resultados sin predimensionamiento y con predimensionamiento en grupos de 10 pisos, respectivamente, en la Figura 3.7 los resultados presentan puntos fuera de la tendencia los cuales tienen una mayor variación respecto al promedio. Esta variación se puede deber a dos factores principales como son el cambio de rigidez en los puntos de cambio de sección en muros y columnas, y la tolerancia que se ha dado de  $1\text{cm}$  para el redondeo en el tamaño de las secciones.

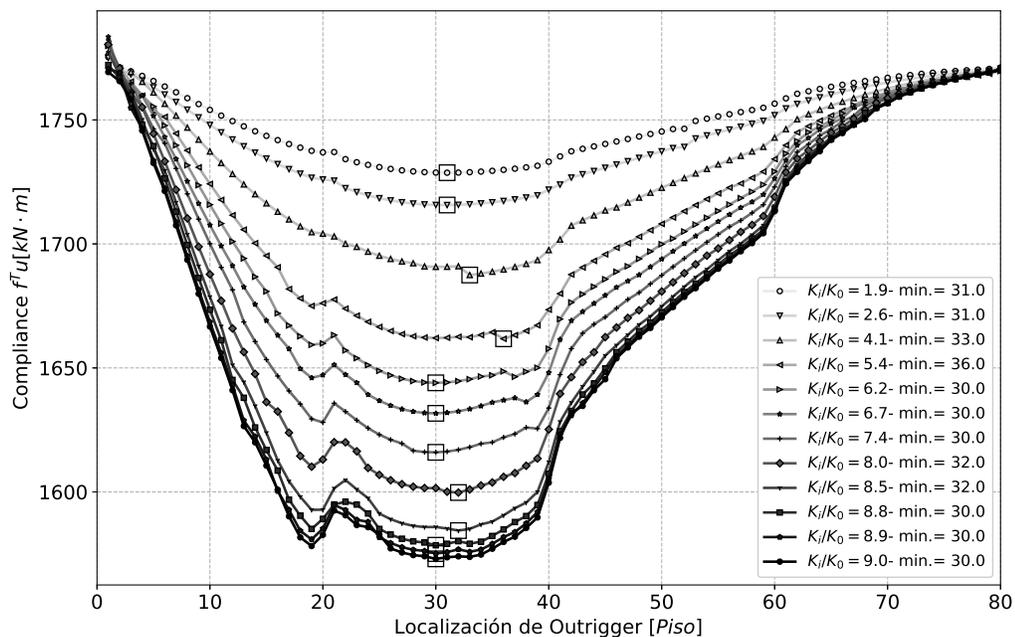


Figura 3.7. Variación del trabajo externo realizado por la carga de viento, en función de la rigidez del *outrigger*; con variación en la sección de muros y columnas en grupos de 20 pisos.

Como se observa en esta sección, salvo casos puntuales, la energía de deformación presenta un comportamiento muy estable en los casos estudiados. Cuando la rigidez del *outrigger* es alta el piso en el que se produce el trabajo externo mínimo tiende a estabilizarse.

### 3.2.2. Período mínimo con un *outrigger* variando su rigidez

El período fundamental mínimo al considerar únicamente la posición y rigidez del *outrigger* varía en los casos analizados, en la Figura 3.8 se obtienen dos grupos muy marcados; cuando el *outrigger* tiene baja rigidez el período óptimo se encuentra al colocarlo en el piso 35; a medida que se incrementa la rigidez del *outrigger* se encuentra que su posición óptima para minimizar el periodo de la estructura se encuentra en el piso 34.

Al igual que al analizar el trabajo externo en el caso sin predimensionamiento de secciones de columnas y muros, las curvas obtenidas son continuas y suaves en todo su dominio cuando el *outrigger* se coloca a partir del piso 2.

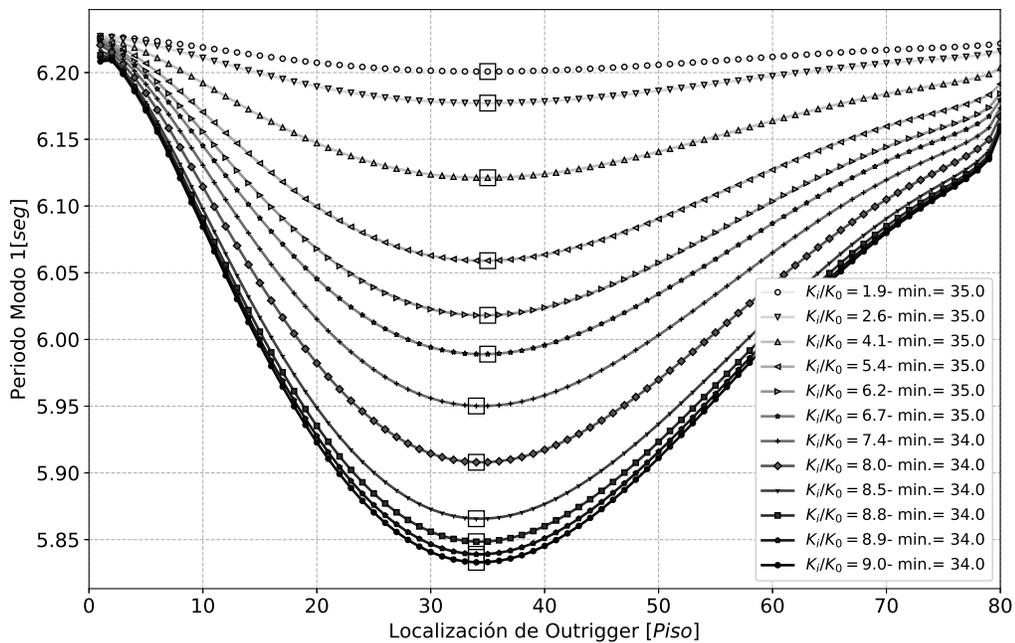


Figura 3.8. Variación del período fundamental del edificio en función de la rigidez y ubicación del *outrigger*. No se considera predimensionamiento de las secciones de columnas y muros del núcleo.

En la Figura 3.9 se presentan los periodos obtenidos al variar la posición del *outrigger* cuando se considera predimensionamiento de muros del núcleo y columnas de borde en grupos de 10 pisos. Se observan dos tendencias marcadas en función de la rigidez del

*outrigger*, para rigideces bajas el valor mínimo se obtiene en promedio en el piso 35; para rigideces mas altas se obtiene el valor mínimo en el piso 29. Las curvas no son suaves, existe la presencia de puntos de inflexión cuando el *outrigger* se encuentra ubicado alrededor de los pisos 20, 30 y 40. Si se considera el valor promedio la ubicación óptima del *outrigger* que minimiza el periodo con predimensionamiento de secciones de muros del núcleo y columnas perimetrales se encuentra en el piso 32.

En la Figura 3.9 a medida que se incrementa la rigidez del *outrigger* el punto mínimo producido alrededor del piso 29 se hace cada vez mas definido; así también se observa un mínimo local cuando el *outrigger* se coloca alrededor del piso 37.

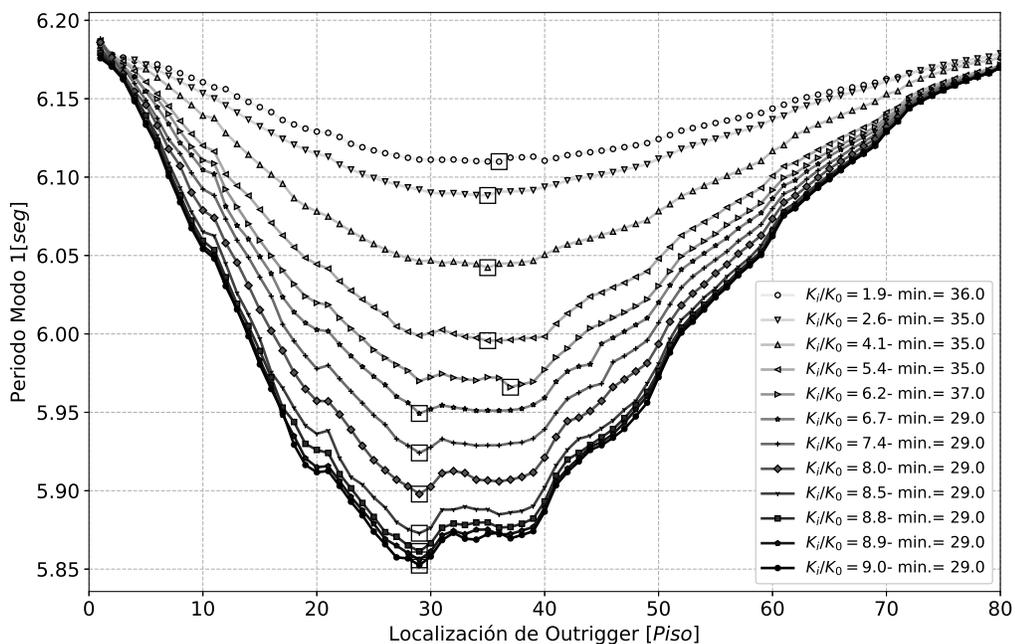


Figura 3.9. Variación del período fundamental del edificio en función de la rigidez y ubicación del *outrigger*. Se considera predimensionamiento de columnas y muros del núcleo en grupos de 10 pisos.

En la Figura 3.10 se observan los períodos obtenidos al variar la posición del *outrigger* cuando se considera predimensionamiento de muros del núcleo y columnas de borde en grupos de 20 pisos. Se observa una tendencia para en la posición óptima del *outrigger* que minimiza el período fundamental; en promedio al colocar el *outrigger* en el piso 35

se obtiene el período mínimo. Las curvas generadas presentan la formación de un valor mínimo local cuando el *outrigger* se ubica alrededor del piso 20. Se obtiene cambios significativos en el comportamiento de las curvas cuando el *outrigger* se ubica cerca de las zonas de cambio de sección en muros y columnas.

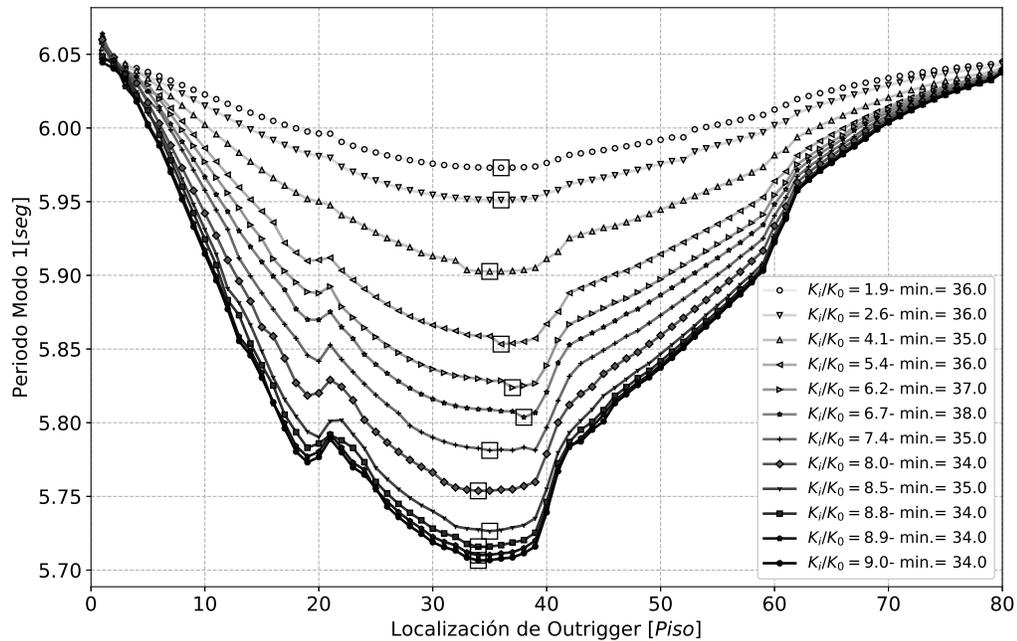


Figura 3.10. Variación del período fundamental del edificio en función de la rigidez y ubicación del *outrigger*. Se considera predimensionamiento de columnas y muros del núcleo en grupos de 20 pisos.

El comportamiento del periodo mínimo de la estructura resulta muy estable en los casos sin predimensionamiento y con predimensionamiento en grupos de 20 pisos, para los casos con predimensionamiento en grupos de 10 pisos se presentan dos grupos muy marcados. Al igual que con la energía de deformación al incrementar la rigidez del *outrigger* la posición del *outrigger* que minimiza el período se estabiliza.

### 3.2.3. Desplazamiento mínimo del techo con un *outrigger* variando su rigidez

En la Figura 3.11 se presentan los resultados obtenidos para el desplazamiento del techo en función de la posición del *outrigger* sin considerar predimensionamiento de las secciones de muros y columnas.

Como se puede observar las curvas son suaves y presentan uniformidad en los resultados obteniendo un único valor mínimo absoluto en cada curva, sin la presencia de valores mínimos locales en el dominio analizado. El piso óptimo de colocación del *outrigger* es el 38 cuando éste tiene baja rigidez mientras que para las rigideces mas alta el piso óptimo de colocación del *outrigger* es el piso 37.

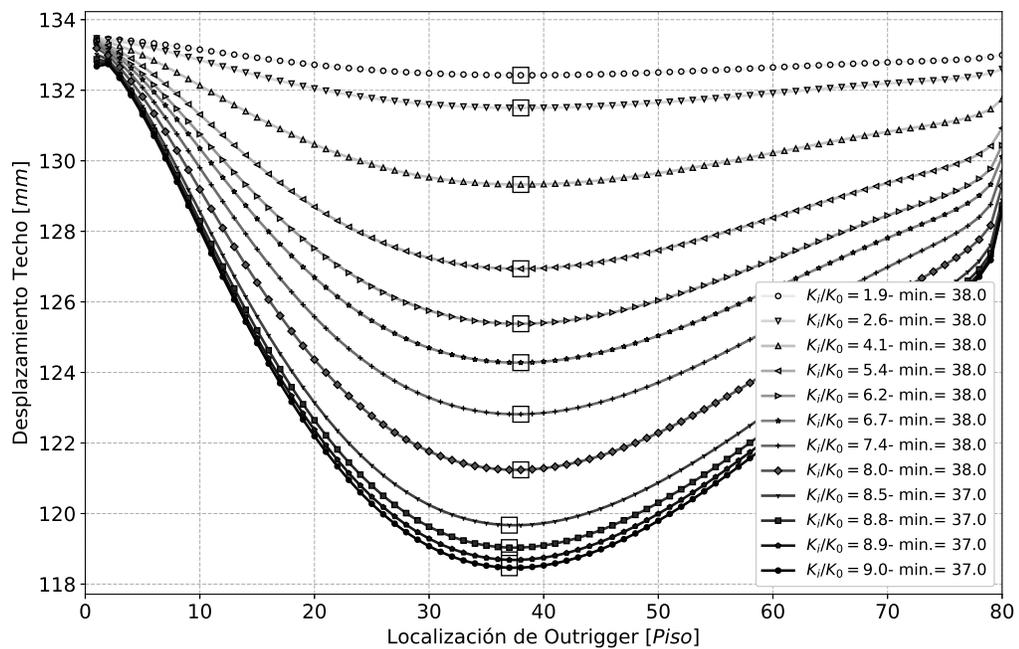


Figura 3.11. Variación del desplazamiento del techo en función de la rigidez del *outrigger*, sin predimensionamiento.

Al analizar el desplazamiento del techo producido en cada posición del *outrigger* considerando predimensionamiento de los muros del núcleo y columnas perimetrales en grupos de 10 pisos, cuyos resultados se presentan en la Figura 3.12; se puede observar cierta irregularidad en la posición del *outrigger* que produce el desplazamiento mínimo en la

estructura. Para valores altos de rigidez del *outrigger*, su posición óptima se estabiliza y se encuentra cuando esta ubicado en el piso 29.

Al analizar las curvas de la Figura 3.12 se determina que cuando el *outrigger* coincide con el cambio en la sección del muro se produce una irregularidad en las curvas. Esta irregularidad mas el efecto del redondeo a 1 cm en el tamaño de secciones produce cierto ruido en las curvas haciendo que no sean suaves y presenten valores oscilatorios en ciertos tramos.

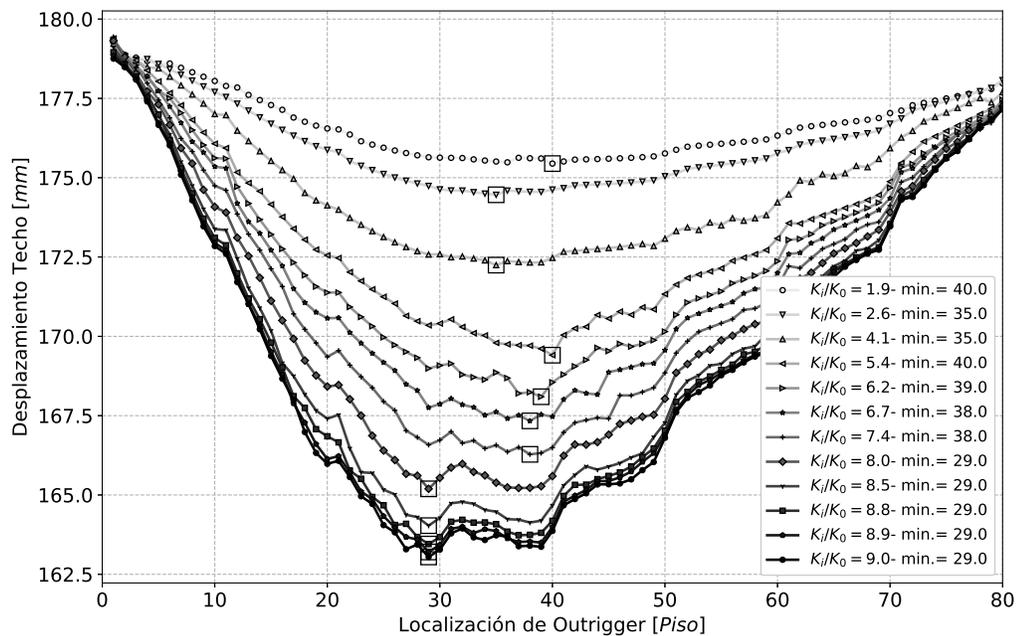


Figura 3.12. Variación del desplazamiento del techo en función de la rigidez del *outrigger*, con predimensionamiento de muros y columnas en grupos de 10 pisos.

Los resultados de desplazamiento del techo producido en cada posición del *outrigger* considerando predimensionamiento de los muros del núcleo y columnas perimetrales en grupos de 20 pisos se muestran en la Figura 3.13. En promedio la posición del *outrigger* que minimiza el desplazamiento del techo se encuentra alrededor del piso 38. Las curvas generadas presentan la formación de un valor mínimo local cuando el *outrigger* se ubica alrededor del piso 20.

Al igual que el caso anterior cuando se predimensionó en grupos de 10 pisos se puede observar que en este caso se producen cambios en el comportamiento de las curvas cuando el *outrigger* se ubica en los pisos con cambio de sección en columnas y muros.

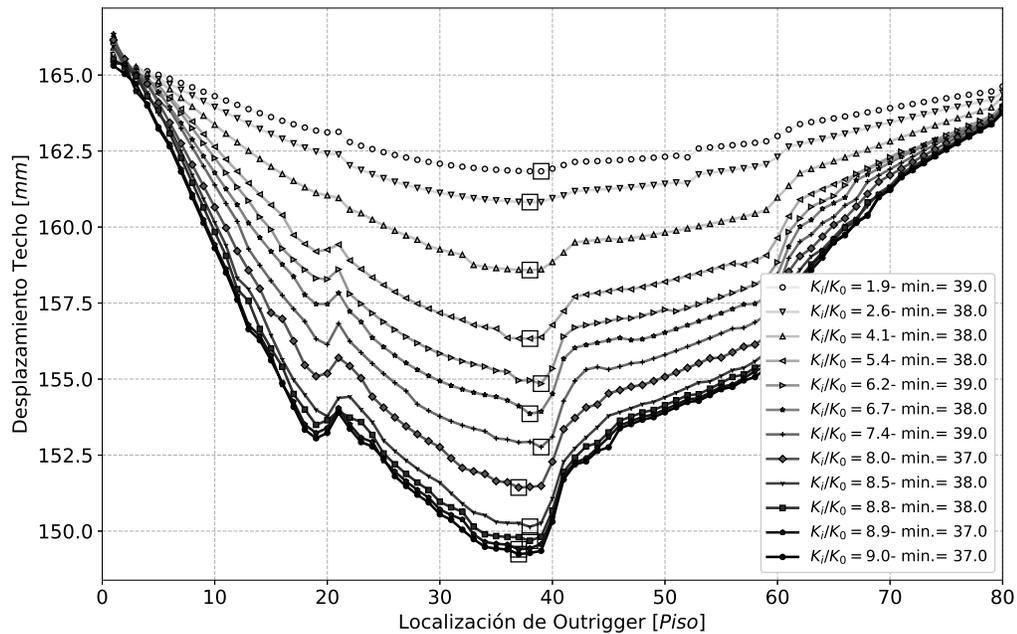


Figura 3.13. Variación del desplazamiento del techo en función de la rigidez del *outrigger*, con predimensionamiento de muros y columnas en grupos de 20 pisos.

Del los resultados obtenidos se puede desprender que la variable desplazamiento del techo resulta muy sensible a los cambios que experimenta la estructura, sin embargo, al igual que en los casos anteriores, cuando el *outrigger* es muy rígido la ubicación óptima tiende a estabilizarse.

Comparando las curvas obtenidas para los tres casos definidos en función del tamaño de grupo para el predimensionamiento, se puede concluir que mientras se aumenta el número de pisos del grupo para el prediseño los valores óptimos tienden a estabilizarse, mostrando un efecto similar al de las demás variables.

### 3.2.4. Comparación de resultados para edificio con un *outrigger*

En la Figura 3.14 se presenta un resumen de los pisos óptimos obtenidos para cada uno de los casos analizados en el edificio con un *outrigger*. Las líneas presentadas corresponden al piso óptimo obtenido al promediar los casos con una relación de rigidez  $K_i/K_0$  mayor a 8. Este valor en la relación de rigidez relativa ha sido seleccionado considerando que a partir de éste, la posición del piso óptimo tiende a estabilizarse.

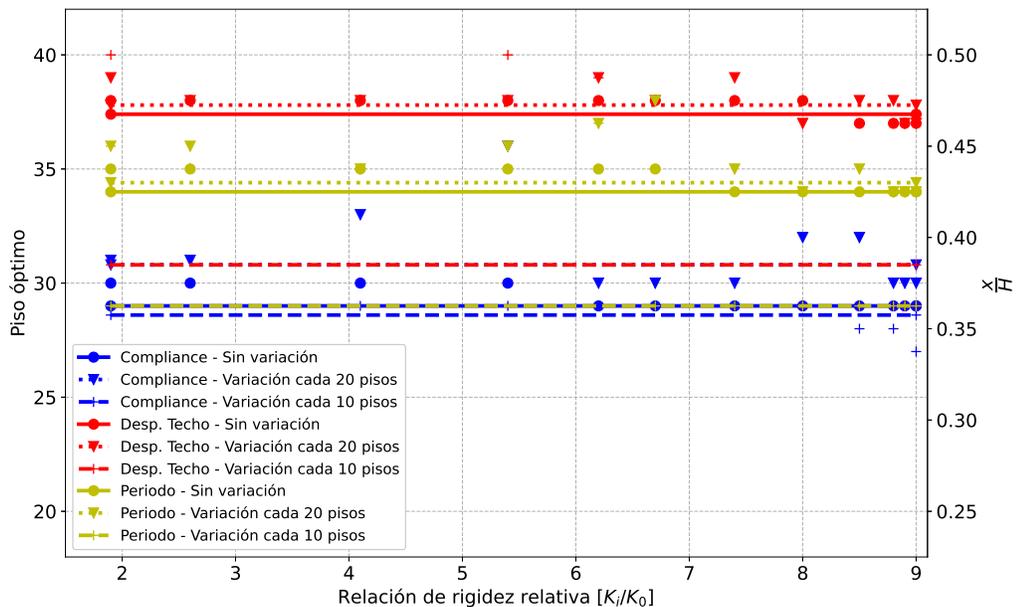


Figura 3.14. Comparación de resultados obtenidos para el piso óptimo en edificio con un *outrigger*.

La energía de deformación óptima se obtiene cuando el *outrigger* se ubica entre  $0,358 H$  y  $0,385 H$ ; el período óptimo cuando el *outrigger* se ubica entre  $0,363 H$  y  $0,430 H$  y el desplazamiento de techo óptimo cuando el *outrigger* se ubica entre  $0,385 H$  y  $0,473 H$ .

### 3.3. Edificio con dos *outriggers* sin considerar variaciones en las secciones

Para el edificio con dos *outriggers* se considera que no existe variación en las secciones de los elementos de la estructura. Se considera que los muros del núcleo y las columnas

han sido predimensionadas por gravedad en el edificio sin *outriggers* y la sección más solicitada se asigna en toda la altura del edificio; los *outriggers* tienen una rigidez con una relación de rigidez  $K_i/K_0 = 8,5$  en comparación del piso sin *outrigger* utilizando la definición de la relación de rigideces realizada en el capítulo anterior.

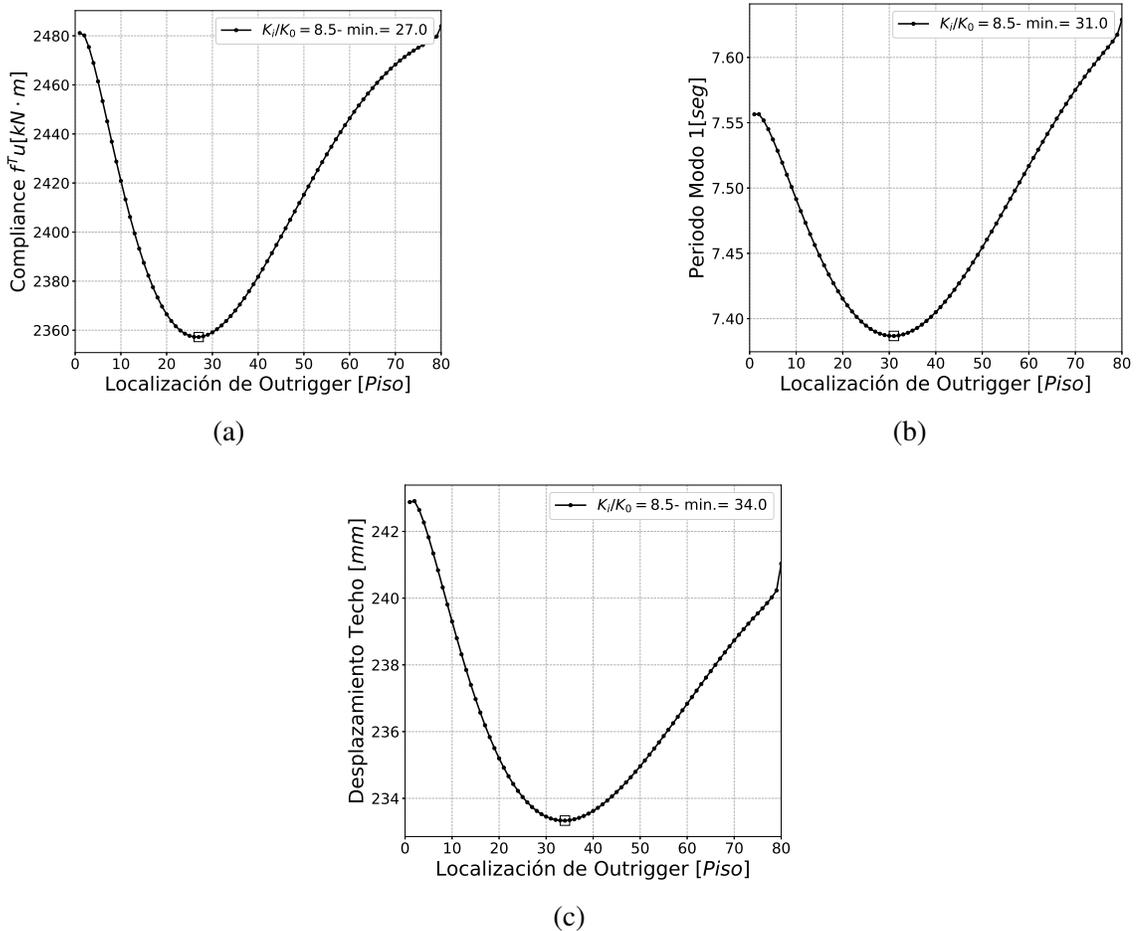


Figura 3.15. Resultados para edificio con un *outrigger*. Predimensionamiento de columnas y muros por gravedad, sin *outrigger*. (a) Variación del trabajo externo. (b) Variación del periodo fundamental. (c) Variación del desplazamiento del techo.

En la Figura 3.15 se presentan los resultados para la estructura con un *outrigger* con las condiciones indicadas en el párrafo anterior, los valores mínimos sirven de comparación entre el edificio con un *outrigger* y el edificio con dos *outriggers*. Para obtener los

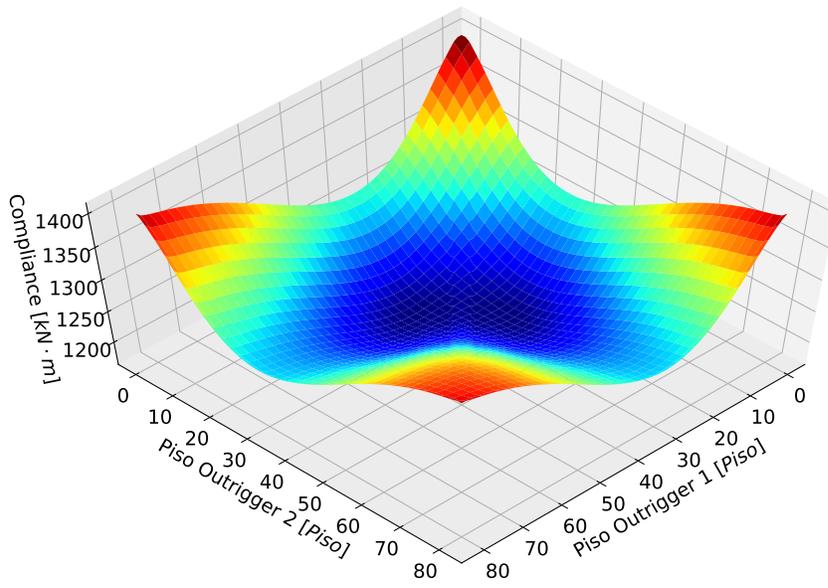
resultados en el edificio con dos *outriggers* se analizan todas las posibles combinaciones ( ${}_{80}C_2 = 3160$  modelos analizados) de ubicación de cada *outrigger*.

En las Figuras 3.16, 3.17, 3.18 se presentan los resultados obtenidos en el edificio con dos *outriggers* al evaluar el trabajo externo realizado por la carga de viento, el período fundamental y el desplazamiento de techo, respectivamente. En las tres figuras cuando los valores donde los dos *outriggers* coinciden en un mismo piso, corresponden al caso del edificio con un solo *outrigger* y no se muestran en las figuras; a fin de tener una gráfica continua se presenta el valor promedio de los puntos adyacentes a los puntos de coincidencia.

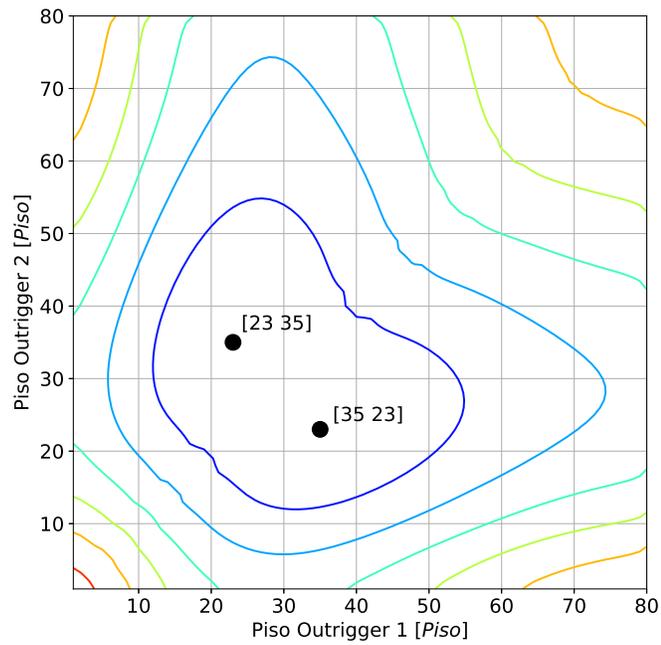
La ubicación óptima de los *outriggers* donde se minimiza el trabajo externo se encuentra cuando se ubica un *outrigger* en el piso 23 y otro en el piso 35. La ubicación óptima de los *outriggers* donde se minimiza el período fundamental se encuentra cuando se ubica un *outrigger* en el piso 26 y otro en el piso 39. La ubicación óptima de los *outriggers* donde se minimiza el desplazamiento de techo se encuentra cuando se ubica un *outrigger* en el piso 29 y otro en el piso 46. Los resultados obtenidos se encuentran resumidos en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Resultados obtenidos para edificio con uno y dos *outriggers*

Parámetro	Dos <i>outriggers</i>						Un <i>outrigger</i>	
	Absoluto		Pisos Contiguos		Un <i>outrigger</i> fijo			
	Piso	$x/H$	Piso	$x/H$	Piso	$x/H$	Piso	$x/H$
<b>Compliance</b>	23;35	0.288;0.438	28	0.350	29	0.363	27	0.338
<b>Período</b>	26;39	0.325;0.488	33	0.413	33	0.413	31	0.388
<b>Desp. Techo</b>	29;46	0.363;0.575	36	0.450	35	0.438	34	0.425

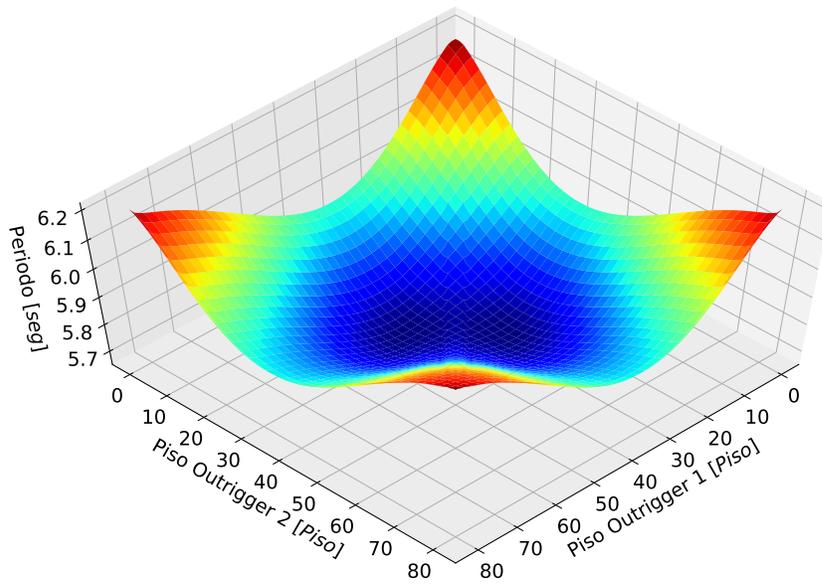


(a)

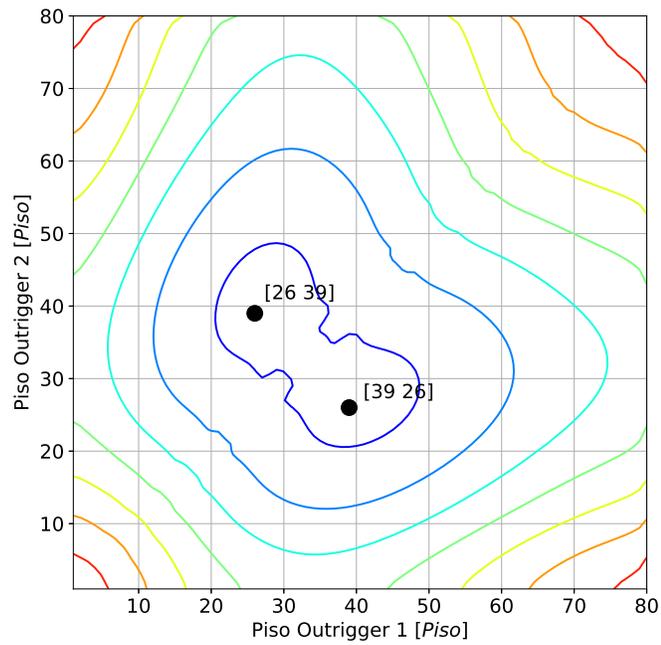


(b)

Figura 3.16. Trabajo externo en edificio con dos *outriggers*. No se consideran variaciones en las secciones y se mantiene constante la rigidez del *outrigger*. (a) Vista 3D. (b) Curvas de nivel con ubicación de valores mínimos.

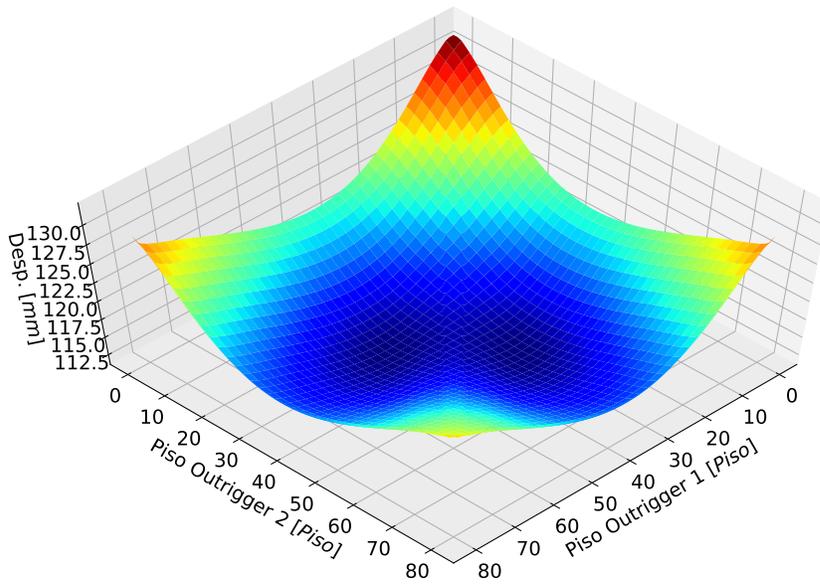


(a)

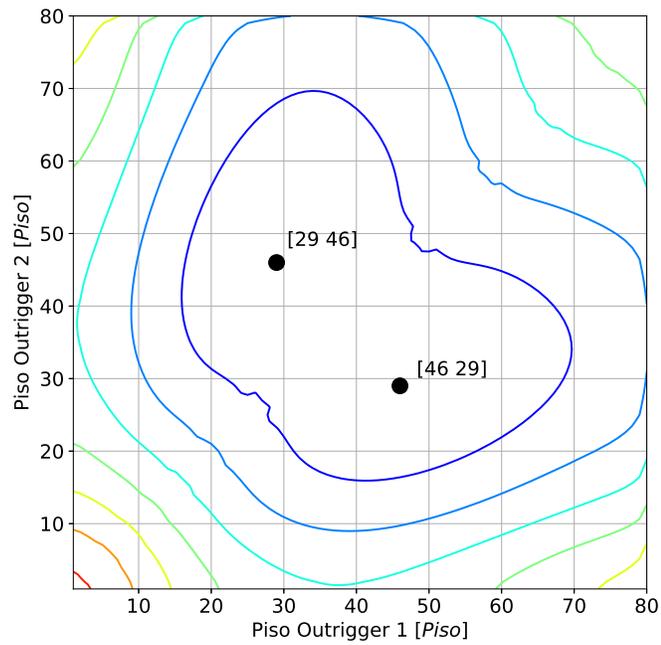


(b)

Figura 3.17. Trabajo externo en edificio con dos *outriggers*. No se consideran variaciones en las secciones y se mantiene constante la rigidez del *outrigger*. (a) Vista 3D. (b) Curvas de nivel con ubicación de valores mínimos.



(a)



(b)

Figura 3.18. Trabajo externo en edificio con dos *outriggers*. No se consideran variaciones en las secciones y se mantiene constante la rigidez del *outrigger*. (a) Vista 3D. (b) Curvas de nivel con ubicación de valores mínimos.

En la Tabla 3.4 se presenta el resumen de los resultados obtenidos para el edificio con dos *outriggers*. Se presenta la posición donde se encuentra el mínimo absoluto de las variables analizadas; se incluyen dos casos relevantes que se extraen de las gráficas obtenidas con dos *outriggers*, los cuales son:

- Dos *outriggers* contiguos, cuyos resultados se muestran en la Figura 3.19.
- Un *outrigger* fijo en el techo y otro cambiando de posición, los resultados obtenidos se presentan en la Figura 3.20.

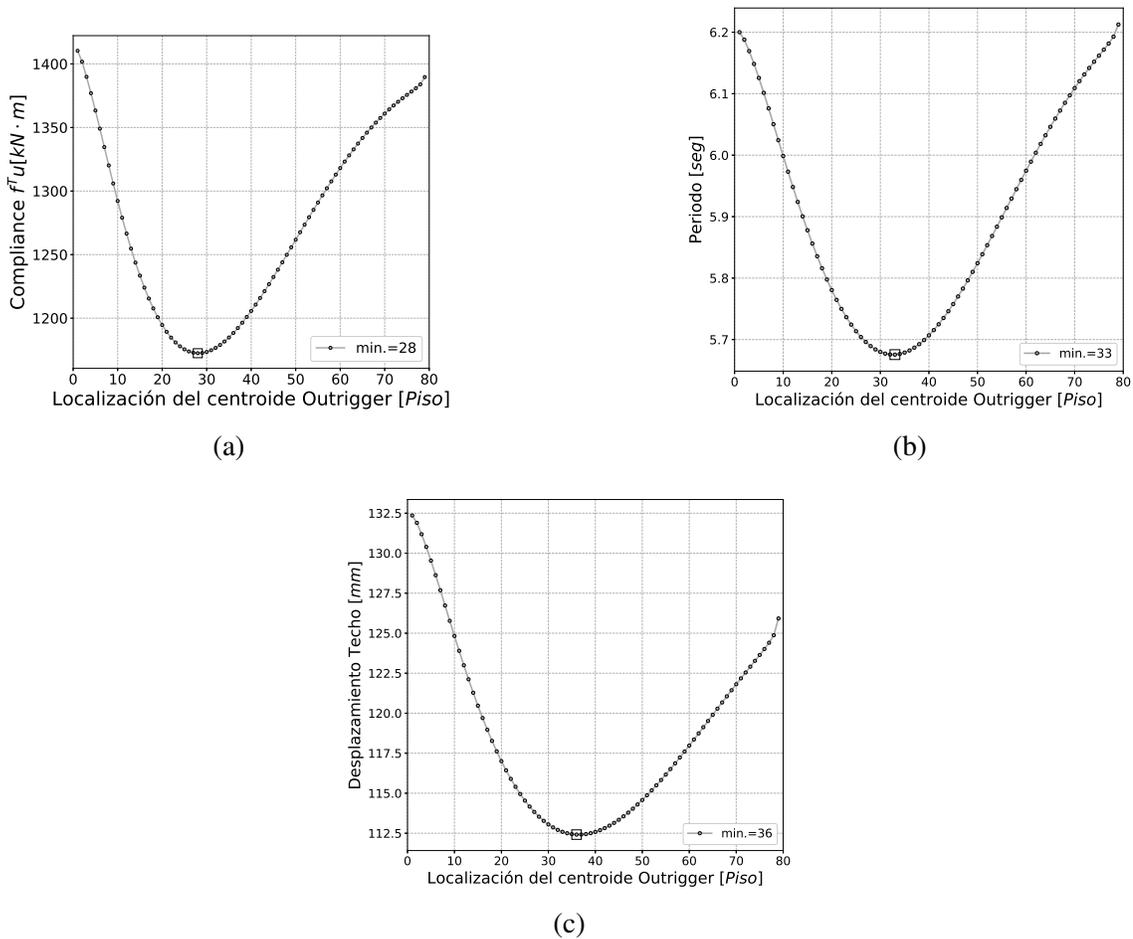
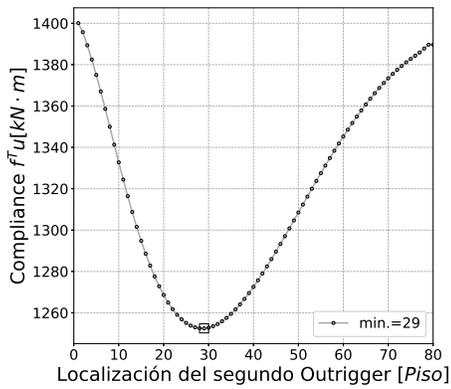
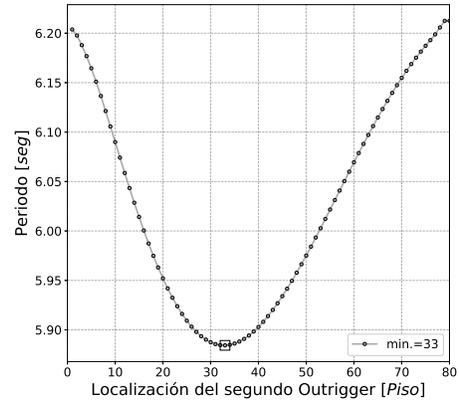


Figura 3.19. Resultados obtenidos con dos *outriggers* contiguos. (a) Variación del trabajo externo. (b) Variación del periodo fundamental. (c) Variación del desplazamiento del techo.

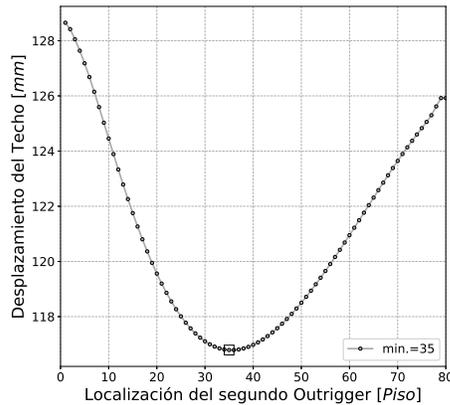
En la Figura 3.19 se presentan los resultados obtenidos cuando los dos *outriggers* se encuentran juntos en pisos contiguos. Para la gráfica se presentan los resultados tomando como centroide del *outrigger* de doble altura el piso que tienen en común.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.20. Resultados obtenidos con dos *outriggers* manteniendo constante un *outrigger* en el techo. (a) Variación del trabajo externo. (b) Variación del periodo fundamental. (c) Variación del desplazamiento del techo.

En la Tabla 3.5 se muestran los valores mínimos obtenidos para los parámetros analizados. Se realiza una comparación de la reducción lograda con dos *outriggers* tomando como referencia el edificio con un *outrigger*.

Las variables que resultan más sensibles a la ubicación óptima de los *outriggers* en el edificio son el trabajo externo y los desplazamientos del techo; obteniéndose reducciones de 50 % aproximadamente en estos parámetros, para los casos en que se encuentran los valores mínimos absoluto y en el caso de dos *outriggers* en pisos contiguos. La reducción del trabajo externo al tener un *outrigger* fijo en el techo y el otro en la posición óptima mostrada en la Figura 3.19 el edificio es de 47 % con respecto al caso con un solo *outrigger*.

Tabla 3.5. Reducciones obtenidas en edificio con dos *outriggers* con respecto al edificio con un *outrigger*

Parámetro	Dos <i>outriggers</i>						Un <i>outrigger</i>
	Absoluto		Pisos Contiguos		Un <i>outrigger</i> fijo		
	Valor	Red.	Valor	Red.	Valor	Red.	
Compliance [ $kN \cdot m$ ]	1167	50.5 %	1172	50.3 %	1252	46.9 %	2357
Período [ $seg$ ]	5.66	23.4 %	5.68	23.1 %	5.88	20.4 %	7.39
Desp. Techo [ $mm$ ]	111.5	52.2 %	112.4	51.8 %	116.8	49.9 %	233.3

La reducción obtenida en el período fundamental del edificio con dos *outriggers* se encuentra entre 20 a 23 % con respecto al edificio con un solo *outrigger*.

## CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

### 4.1. Conclusiones

Los análisis realizados en los edificios sin considerar predimensionamiento en columnas y muros, únicamente variando la posición del *outrigger*, dan como resultado curvas suaves donde se pueden obtener fácilmente tendencias en las mismas. Al realizar el predimensionamiento de los elementos que forman los muros del núcleo y las columnas, se observa que dependiendo del parámetro analizado empiezan a producirse variaciones que rompen la tendencia, como se observa en la Figura 3.12 y en menor medida en la Figura 3.9.

De los resultados obtenidos para el edificio con un *outrigger* se puede concluir que aparentemente la rigidez del *outrigger* no influye de manera significativa en su posición óptima dentro del edificio. A medida que se incrementa la rigidez del *outrigger* su posición óptima se encuentra en pisos inferiores respecto a un *outrigger* con menor rigidez. Se puede resaltar que cuando la rigidez del *outrigger* es alta la posición que minimiza las variables analizadas tiende a estabilizarse en un piso específico.

Tomando el valor promedio de piso óptimo para los casos analizados, donde la relación de rigidez  $K_i/K_0$  es mayor a 8, la energía de deformación óptima se obtiene cuando el *outrigger* se ubica entre  $0,358 H$  y  $0,385 H$ ; el período óptimo cuando el *outrigger* se ubica entre  $0,363 H$  y  $0,430 H$  y el desplazamiento de techo óptimo cuando el *outrigger* se ubica entre  $0,385 H$  y  $0,473 H$ .

El mayor efecto de la rigidez del *outrigger* en el edificio con un *outrigger* se observa en la reducción de la magnitud de respuesta en los parámetros analizados. Cuando la rigidez del *outrigger* es alta se logran reducciones del orden de 15 % en el trabajo externo, 8 % en el período fundamental de la estructura y 13 % en desplazamiento del techo, con respecto a la estructura sin *outrigger*. Es necesario tomar en cuenta que en este estudio únicamente se ha modificado la sección de las diagonales del *outrigger* y armadura de borde, es decir,

al incrementarse las secciones de las vigas del *outrigger* podrían obtener reducciones más significativas.

El predimensionamiento de columnas perimetrales y muros del núcleo agrega tiempo computacional adicional de cálculo, hasta lograr obtener convergencia en las dimensiones de las secciones. Los resultados obtenidos muestran que realizar la búsqueda de la posición óptima sin predimensionar las secciones de muros del núcleo y columnas, encuentra la posición óptima del sistema de *outriggers* aproximadamente hasta 5 veces más rápido que buscando convergencia en el predimensionamiento de las secciones.

En los resultados desplegados de los edificios analizados con dos *outriggers*, los parámetros estudiados presentan importantes reducciones en las respuestas de la estructura con respecto a la de un solo *outrigger*. Estos resultados fueron presentados y analizados en la Sección 3.3. Las tres posiciones comúnmente estudiadas y presentadas en este trabajo presentan pequeñas variaciones entre sus resultados siendo alternativas válidas como punto de partida para un análisis más profundo.

Los resultados presentados en la Figura 3.19 correspondientes a dos *outriggers* ubicados en pisos contiguos, indican que este *outrigger* de doble altura se comporta de manera muy similar que un *outrigger* ubicado en un solo piso; pues la ubicación que minimiza el trabajo externo difiere en solo un piso de altura entre los dos sistemas. Con esta observación se confirma que la rigidez del *outrigger* tiene una mayor influencia en las magnitudes reducidas, manteniéndose la posición óptima con variaciones muy ligeras.

Es importante tener en cuenta que se ha realizado un análisis lineal para una carga de viento estática, el problema podría seguir creciendo en su número de variables y restricciones por ejemplo al considerar la carga sísmica y evaluar el comportamiento del edificio con un análisis dinámico lineal o no lineal.

Es importante señalar las posibilidades que ofrece la interacción entre un lenguaje de programación con librerías científicas desarrolladas y el software de análisis estructural,

pudiéndose realizar análisis paramétricos sin la necesidad de modificar los modelos estructurales manualmente, lo que representa un significativo ahorro de tiempo.

#### **4.2. Futura investigación**

Se podría analizar el comportamiento del edificio cambiando el material de los *outriggers* por uno que aporte una mayor rigidez axial, como es el caso del acero, que tiene un módulo de elasticidad mucho más alto que del hormigón empleado en este estudio. Esto llevará a obtener la posición óptima con reducciones mayores en la respuesta del edificio.

Al modificar el periodo fundamental de la estructura se modifica también el comportamiento bajo la acción de cargas sísmicas, sería importante entender como se comporta la estructura optimizada para carga de viento bajo la acción de sismo y verificar bajo una serie de registros sísmicos si el piso óptimo obtenido para la carga estática de viento también mejora el comportamiento sísmico.

Al analizar las curvas obtenidas para el edificio con uno y dos *outriggers* sin predimensionamiento de muros del núcleo y columnas se obtiene una curva convexa, donde se podría pensar en aplicar un algoritmo de programación no-lineal no-restringido para obtener la posición óptima en busca de reducir los tiempos de análisis.

## REFERENCIAS

- Alhaddad, W., Halabi, Y., Xu, H., y Lei, H. (2020). Outrigger and Belt-Truss System Design for High-Rise Buildings: A Comprehensive Review Part II - Guideline for Optimum Topology and Size Design. *Advances in Civil Engineering*, 2020(February). doi: 10.1155/2020/2589735
- Ali, M. M., y Moon, K. S. (2007). Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects. *Architectural Science Review*, 50(3), 205–223. doi: 10.3763/asre.2007.5027
- ASCE. (2017). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* (ASCE/SEI 7 ed.). American Society of Civil Engineers. Descargado de <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784414248> doi: 10.1061/9780784414248
- Atkinson, J. C. H. (2017). *Seismic design of outrigger systems for tall buildings* (Tesis Doctoral, University of British Columbia). doi: <http://dx.doi.org/10.14288/1.0343969>
- Banks, C., internationale du béton. Task Group 1.6, F., Burridge, J., Cammelli, S., y Chiorino, M. A. (2014). *Tall Buildings - Structural Design of Concrete Buildings Up to 300 M Tall: A Working Group of The Concrete Centre and Fib Task Group 1.6*. MPA The Concrete Centre and Federation internationale du beton, (fib).
- Choi, H. S., Ho, G., Joseph, L., y Mathias, N. (2016). *CTBUH Technical Guides Outrigger Design for High-Rise Buildings 2nd Edition Outrigger Design for High-Rise Buildings 2nd Edition An output of the CTBUH Outrigger Working Group* (Inf. Téc.). Descargado de [www.ctbuh.org](http://www.ctbuh.org)
- Computers and Structures, Inc. (2020). *ETABS Version 18.1.1*. Berkeley, California, USA.
- Cruz, C., y Miranda, E. (2017). Evaluation of Damping Ratios for the Seismic Analysis of Tall Buildings. *Journal of Structural Engineering (United States)*, 143(1), 1–10. doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001628

- Gerasimidis, S., Efthymiou, E., y Baniotopoulos, C. C. (2009). Optimum outrigger locations of high-rise steel buildings for wind loading. *5th European and African Conference on Wind Engineering, EACWE 5, Proceedings*(July), 1–10.
- Ho, G. W. (2016). Outrigger topology and behaviour. *Advanced Steel Construction*, 12(2), 83–93. doi: 10.18057/IJASC.2016.12.2.1
- Hoenderkamp, J. C. D. (2008, sep). Second outrigger at optimum location on high-rise shear wall. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 17(3), 619–634. Descargado de <http://doi.wiley.com/10.1002/tal.369> doi: 10.1002/tal.369
- Hoenderkamp, J. C. D., y Bakker, M. C. M. (2003, dec). Analysis of high-rise braced frames with outriggers. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 12(4), 335–350. Descargado de <http://doi.wiley.com/10.1002/tal.226> doi: 10.1002/tal.226
- Lee, S., y Tovar, A. (2014). Outrigger placement in tall buildings using topology optimization. *Engineering Structures*, 74, 122–129. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.05.019> doi: 10.1016/j.engstruct.2014.05.019
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2011). *MINVU (2011): Requisitos de Diseño y Cálculo para el Hormigón Armado*". Decreto Supremo N°60.
- Rutenberg, A. (1979). Earthquake analysis of belted high-rise building structures. *Engineering Structures*, 1(4), 191–196. doi: 10.1016/0141-0296(79)90046-4
- Sarkisian, M. (2012). *Designing tall buildings: Structure as architecture* (Vol. 9780203806593). doi: 10.4324/9780203806593
- Skidmore, Owings & Merrill LLP. (s.f.). *SOM — 401 North Wabash*. Descargado 2020-08-31, de [https://www.som.com/projects/401\\_{\\_}north\\_{\\_}wabash](https://www.som.com/projects/401_{_}north_{_}wabash)
- Taranath, B. S. (2009). *Reinforced Concrete Design of Tall Buildings*. CRC Press. Descargado de <https://www.taylorfrancis.com/books/9780429131165> doi: 10.1201/9781439804810

*Tour de la Bourse.* (s.f.). Descargado 2020-09-01, de [https://es.wikipedia.org/wiki/Tour\\_de\\_la\\_Bourse](https://es.wikipedia.org/wiki/Tour_de_la_Bourse)

Xu, P., Xiao, C., y Li, J. (2014). Research on Relationship between Natural Vibration Periods and Structural Heights for High-rise Buildings and Its Reference Range in China. *International Journal of High-Rise Buildings*, 3(1), 49–64. doi: 10.21022/IJHRB.2014.3.1.049