

# TESIS\_NAVACH\_&\_SEVILLANO.p df

*por* Bills SEVILLANO

---

**Fecha de entrega:** 02-jul-2024 02:53p.m. (UTC-0500)

**Identificador de la entrega:** 2411753788

**Nombre del archivo:** TESIS\_NAVACH\_\_SEVILLANO.pdf (3.96M)

**Total de palabras:** 27212

**Total de caracteres:** 144042

<sup>2</sup>  
**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO  
SÍSMICO DE UN EDIFICIO ALTO, MEDIANTE EL USO DE  
OUTRIGGERS. CASO DE ESTUDIO: ONE WILSON SQUARE**

<sup>3</sup>  
**Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil**

**AUTORES:**

Bills Jeanpool Tairo Sevillano Maturana  
Carlos Eduardo Navach Ruiz

<sup>1</sup>  
**ASESOR:**

**Christian Alberto Asmat Garaycochea**

**Lima, junio, 2024**

## RESUMEN

El déficit habitacional del país alcanza el 11.7% de los hogares que conforman este territorio. (INEI, 2017). Dentro de la problemática actual, la construcción vertical se propone como una alternativa para mitigarla. Sin embargo, las normativas que rigen el territorio peruano se ven especializadas en estructuras de poca elevación, lo cual podría suponer que existe una relación entre la falta de metodologías y el desarrollo de estructuras de semejantes características.

52 Es por ello que la presente tesis tiene como objetivo principal contribuir con metodologías para el diseño de una edificación alta con finalidad de vivienda. Este partirá del estudio del sistema sismo resistente denominado outriggers y cómo este podría mejorar el comportamiento de una estructura de 40 pisos ubicada en la ciudad de Lima. Los resultados estarán basados en la comparación de fuerzas internas, derivas y desplazamientos de un modelo en Etabs sin outriggers y uno donde se iterará la ubicación de estos elementos. Con ello se busca encontrar la posición de optimización, y con base en ello, se emitirán conclusiones y recomendaciones.

## AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA

*Agradecer no será suficiente, quedamos con una deuda pendiente a todas las personas que hicieron posible la culminación de este trabajo. Esta investigación va dedicada en primer lugar a nuestros padres, quienes apostaron por la mejor herencia que le pudieron dejar a sus hijos: el conocimiento; a nuestro asesor Christian Asmat que confió en nuestro trabajo desde un inicio; a Víctor Calderon por compartir lo aprendido en sus años de intercambio por Chile; y a ti, apreciado lector, por no dejar que nuestro aporte quede olvidado en un estante.*

## INDICE DE CONTENIDO

<b>8</b>	<b>1</b>	<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
	<b>1.1</b>	<b>Antecedentes .....</b>	<b>1</b>
	<b>1.2</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>2</b>
	1.2.1	Objetivo General.....	2
	1.2.2	Objetivos Específicos .....	2
	<b>1.3</b>	<b>Hipótesis .....</b>	<b>2</b>
	<b>1.4</b>	<b>Metodología.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>		<b>Marco Teórico .....</b>	<b>5</b>
	<b>2.1</b>	<b>Outriggers .....</b>	<b>5</b>
	2.1.1	Definición.....	5
	2.1.2	Beneficios Estructurales .....	7
	2.1.3	Historia de los Sistema Outriggers.....	<b>1</b>
	2.1.4	Tipos de Outriggers.....	<b>8</b>
	<b>2.2</b>	<b>Marco Teórico .....</b>	<b>13</b>
	2.2.1	Regularidad estructural .....	13
	2.2.2	Requisitos de rigidez.....	13
<b>3</b>		<b>Estado del arte .....</b>	<b>15</b>
	<b>3.1</b>	<b>Investigaciones previas .....</b>	<b>15</b>
	<b>3.2</b>	<b>Ejemplos de estructuras con outriggers .....</b>	<b>20</b>
	3.2.1	Estructuras metálicas – New York Times Building .....	20
	3.2.2	Estructura de concreto armado – Waterfront Place .....	21
	3.2.3	Estructura Mixta – 300 North LaSalle .....	22
	<b>3.3</b>	<b>One Wilson Square .....</b>	<b>23</b>
	<b>3.4</b>	<b>Consideraciones para adoptar en la investigación.....</b>	<b>25</b>
<b>4</b>		<b>Estructuración y Predimensionamiento .....</b>	<b>26</b>
	<b>4.1</b>	<b>Criterios de regularidad y simetría.....</b>	<b>26</b>
	<b>4.2</b>	<b>Estructuración .....</b>	<b>26</b>
	<b>4.3</b>	<b>Definición de cargas.....</b>	<b>28</b>
	4.3.1	Cargas de gravedad .....	28
	4.3.2	Cargas de viento .....	28
	<b>4.4</b>	<b>Predimensionamiento.....</b>	<b>29</b>
	4.4.1	Elementos Horizontales .....	29
	4.4.2	Elementos Verticales .....	31
<b>5</b>		<b>Análisis de la Estructura sin Outriggers .....</b>	<b>33</b>
	<b>5.1</b>	<b>Modelo Computacional del Edificio .....</b>	<b>33</b>
	5.1.1	Definición del Espectro del Sismo.....	34
	<b>5.2</b>	<b>Análisis por Viento.....</b>	<b>36</b>
	<b>5.3</b>	<b>Análisis Sísmico Estático.....</b>	<b>37</b>
	5.3.1	Cálculo de Peso por Unidad de Área .....	37

5.3.2	Determinación de la Fuerza Cortante Estática .....	38
5.3.3	Distribución de Cortante Estático en Altura .....	39
<b>5.4</b>	<b>Análisis Sísmico Dinámico Modal Espectral.....</b>	<b>41</b>
5.4.1	Análisis Modal.....	41
5.4.2	Verificación de los valores de R0 asumidos.....	45
5.4.3	Factor de Escala .....	45
5.4.4	Distribución de Cortante Dinámico en Altura.....	46
5.4.5	Cálculo de Desplazamientos Laterales y Derivas de Entrepiso.....	46
<b>6</b>	<b>Análisis de la Estructura con Outriggers .....</b>	<b>51</b>
<b>6.1</b>	<b>Criterios de Modelación y Análisis .....</b>	<b>51</b>
<b>6.2</b>	<b>Análisis de la Estructura con un Nivel Outrigger .....</b>	<b>52</b>
6.2.1	Outrigger en Piso 25 .....	52
6.2.2	Iteraciones con un Nivel Outrigger.....	56
<b>6.3</b>	<b>Análisis de la Estructura con Dos Niveles Outrigger .....</b>	<b>59</b>
6.3.1	Outrigger en pisos 10 y 30.....	59
6.3.2	Iteraciones con Dos Niveles Outrigger .....	62
<b>6.4</b>	<b>Análisis de la Estructura con Tres Niveles Outrigger .....</b>	<b>64</b>
6.4.1	Outrigger en pisos 20, 30 y 35.....	64
6.4.2	Iteraciones con Tres Niveles Outrigger.....	67
<b>7</b>	<b>Comparación de Casos Destacados .....</b>	<b>69</b>
<b>7.1</b>	<b>Fuerzas Internas en los Elementos Estructurales .....</b>	<b>69</b>
7.1.1	Fuerza Cortante .....	69
7.1.2	Momento Flector del Núcleo.....	70
<b>7.2</b>	<b>Derivas .....</b>	<b>72</b>
<b>7.3</b>	<b>Desplazamientos .....</b>	<b>73</b>
<b>7.4</b>	<b>Elección de Alternativas .....</b>	<b>74</b>
<b>7.5</b>	<b>Análisis de Columnas .....</b>	<b>75</b>
<b>7.6</b>	<b>Análisis de la Estructura con Dos Outriggers Adyacentes.....</b>	<b>78</b>
<b>8</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones.....</b>	<b>80</b>
<b>9</b>	<b>Referencias.....</b>	<b>83</b>

**INDICE DE ILUSTRACIONES**

<b>Ilustración 1:</b> Flujograma de proceso de análisis de Outriggers.....	4
<b>Ilustración 2:</b> Esquema del funcionamiento de los outriggers (Cainzo, 1994, p.4) .....	6
<b>Ilustración 3:</b> Diferencia en el diagrama de momento flector para una estructura con y sin outriggers (Ho, 2016, p.23) .....	6
<b>Ilustración 4:</b> Esquema básico de configuración de outriggers dentro de la estructura (Ho, 2016, p.21) ..	8
<b>Ilustración 5:</b> Funcionamiento del sistema de outriggers directos (Choi et al, 2012, p.15) .....	9
<b>Ilustración 6:</b> Funcionamiento del sistema de outriggers virtuales (Choi et al, 2012, p.21) .....	9
<b>Ilustración 7:</b> Sistema Cross-Jack de outriggers (Choi et al, 2012, p.40) .....	11
<b>Ilustración 8:</b> Sistema Shim-Plate de corrección (Choi et al, 2012, p.39) .....	11
<b>Ilustración 9:</b> Esquema del sistema de outriggers amortiguado (Smith, 2016, p.63) .....	12
<b>Ilustración 10:</b> Vista isométrica de la configuración de outriggers en St. Francis Shangri - La Place (Choi et al, 2012, p.69).....	12
<b>Ilustración 11:</b> Vista en planta del modelo sin outriggers y con outriggers (Sukesh et al., 2017, p.1750) 16	
<b>Ilustración 12:</b> Variación lateral de desplazamientos para la zona 2 (Sukesh et al, 2017, p.1750) .....	16
<b>Ilustración 13:</b> Vista en planta y elevación del modelo empleado en la investigación (Krunal et al., 2015, p.269).....	18
<b>Ilustración 14:</b> Diagrama deriva vs número de piso para casos con 1 outrigger (a), 2 outriggers (b) y 3 outriggers (c) (Krunal et al., 2015, p.273) .....	19
<b>Ilustración 15:</b> Sistema estructural del New York Times Building (Choi et al., 2012, p. 50).....	20
<b>Ilustración 16:</b> Diagonales de acero del sistema outrigger (Callow et al., 2009) .....	21
<b>Ilustración 17:</b> Planta de outriggers del edificio Waterfront Place – outriggers señalados en rojo (Choi et al., 2012, p.51).....	21
<b>Ilustración 18:</b> Construcción de muro outrigger (Choi et al., 2012, p.53) .....	22
<b>Ilustración 19:</b> Núcleo central, columnas exteriores y armadura outrigger del edificio 300 North LaSalle (Choi et al., 2012, p.58).....	23
<b>Ilustración 20:</b> Armaduras outrigger del edificio 300 North LaSalle (Choi et al., 2012, p.58) .....	23
<b>Ilustración 21:</b> Se muestra una elevación en perspectiva del One Wilson Square (Rchitects, s.f.).....	24
<b>Ilustración 22:</b> Planta de arquitectura del piso 28 (típico) del One Wilson Square (Federal Land Properties, 2018).....	24
<b>Ilustración 23:</b> Planta típica de adaptación del One Wilson Square .....	27
<b>Ilustración 24:</b> Vista en planta plano de estructuración usado para el One Wilson Square .....	27
<b>Ilustración 25:</b> Distribución de presiones en el edificio, para efectos de empuje y succión. ....	29
<b>Ilustración 26:</b> Vista 3D del modelo realizado en ETABS .....	34
<b>Ilustración 27:</b> Espectro de pseudo aceleraciones para la dirección X (a) e Y (b).....	35
<b>Ilustración 28:</b> Distribución de fuerza cortante en altura debido al viento, para ambas direcciones de análisis .....	36
<b>Ilustración 29:</b> Distribución de derivas en altura producto a cargas de viento, para ambas direcciones de análisis .....	37
<b>Ilustración 30:</b> Distribución de fuerza cortante en altura debido a cargas de sismo – análisis estático, para ambas direcciones de análisis.....	41
<b>Ilustración 31:</b> Deformada para el modo fundamental en X (modo 3) .....	43
<b>Ilustración 32:</b> Deformada para el segundo modo en X (modo 6).....	43
<b>Ilustración 33:</b> Deformada para el modo fundamental en Y (modo 1).....	44
<b>Ilustración 34:</b> Deformada para el segundo modo en Y (modo 4) .....	44
<b>Ilustración 35:</b> Deformadas de edificios de pórticos (izquierda), muros (centro) y sistema dual (derecha) (Engel, 2013, p. 281) .....	44
<b>Ilustración 36:</b> Distribución de fuerza cortante en altura debido a cargas de sismo – análisis dinámico.46	
<b>Ilustración 37:</b> Distribución de derivas en altura debido al análisis dinámico .....	48
<b>Ilustración 38:</b> Desplazamientos máximos de piso debido al análisis dinámico.....	49
<b>Ilustración 39:</b> Diagrama de momento flector en X del núcleo central, debido al sismo en Y.....	50
<b>Ilustración 40:</b> Encofrado para los niveles con outriggers, los cuales se muestran en color azul. ....	51

Ilustración 41: Elevación y detalle del modelo con outriggers en el piso 25.....	52
Ilustración 42: Deformada para el modo fundamental en Y - estructura con outriggers en piso 25.....	53
Ilustración 43: Distribución de fuerza cortante dinámica en altura para la dirección Y – estructura con outriggers en piso 25.....	53
Ilustración 44: Diagrama de momento flector en X del núcleo central, debido al sismo en Y.....	54
Ilustración 45: Distribución de derivas (izquierda) y desplazamientos (derecha) inelásticos debido al análisis dinámico en Y - estructura con outriggers en piso 25.....	55
Ilustración 46: Distribución de fuerza cortante dinámica (sin escalar) en altura para la dirección Y para las iteraciones con un outrigger.....	57
Ilustración 47: Distribución de fuerza cortante dinámica (escalado) en altura para la dirección Y para las iteraciones con un outrigger.....	57
Ilustración 48: Distribución de derivas en altura, para las iteraciones realizadas con un nivel outrigger.....	58
Ilustración 49: Deformada para el modo fundamental en Y - estructura con outriggers en pisos 10 y 30.....	59
Ilustración 50: Distribución de fuerza cortante dinámica en altura para la dirección Y – estructura con outriggers en pisos 10 y 30.....	60
Ilustración 51: Diagrama de momento flector en X del núcleo central, debido al sismo en Y – estructura con outriggers en pisos 10 y 30.....	61
Ilustración 52: Distribución de derivas (izquierda) y desplazamientos (derecha) inelásticos debido al análisis dinámico en Y - estructura con outriggers en pisos 10 y 30.....	62
Ilustración 53: Distribución de derivas en altura, para las iteraciones realizadas con dos niveles outrigger.....	63
Ilustración 54: Deformada para el modo fundamental en Y - estructura con outriggers en pisos 20, 30 y 35.....	64
Ilustración 55: Distribución de fuerza cortante dinámica en altura para la dirección Y – estructura con outriggers en pisos 20, 30 y 35.....	65
Ilustración 56: Diagrama de momento flector en X del núcleo central, debido al sismo en Y – estructura con outriggers en pisos 20, 30 y 35.....	65
Ilustración 57: Distribución de derivas (izquierda) y desplazamientos (derecha) inelásticos debido al análisis dinámico en Y - estructura con outriggers en pisos 20, 30 y 35.....	66
Ilustración 58: Distribución de derivas en altura, para las iteraciones realizadas con tres niveles outrigger.....	68
Ilustración 59: Comparación de diagramas de fuerza cortante dinámica escalada para la dirección de análisis.....	69
Ilustración 60: Comparación de diagramas de momento flector para la dirección de análisis.....	71
Ilustración 61: Comparación de derivas inelásticas.....	72
Ilustración 62: Comparación de desplazamientos inelásticos.....	73
Ilustración 63: Diagramas de fuerza axial (superior) y momento flector en la dirección Y (inferior) para la base del pórtico del eje E, para la combinación $1.25(CM + CV) + S_y$ .....	75
Ilustración 64: Disposición de acero longitudinal en la columna a analizar.....	76
Ilustración 65: Diagrama de interacción para la columna analizada.....	76
Ilustración 66: Disposición de acero longitudinal modificada.....	77
Ilustración 67: Diagrama de interacción para columna de 0.80 x 1.20 m.....	77
Ilustración 68: Comparación de derivas incluyendo outriggers en pisos 30-31.....	78
Ilustración 69: Comparación de desplazamientos incluyendo outriggers en pisos 30-31.....	79



## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Restricciones a la irregularidad de la norma E.030 (Adaptado de norma E.030, 2018, Art. 21.1)	13
Tabla 2: Requisitos de rigidez de la norma E.030 (Adaptado de norma E.030, 2018, Art. 32)	14
Tabla 3: Relación peralte - altura de viga en la investigación (Tomado de Suresh et al., 2017, p.1750)	15
Tabla 4: Cuadro de distribución de outriggers en altura (Adaptado de Krunal et al., 2015, p.268)	18
Tabla 5: Criterio para predimensionamiento de losas aligeradas	30
Tabla 6: Cuadro de cargas	31
Tabla 7: Peso total de la estructura bajo cargas de servicio	38
Tabla 8: Núcleo de fuerzas sísmicas por piso, para los niveles 1 a 40	40
Tabla 9: Modos de vibración de la estructura	42
Tabla 10: Factores de escala para el análisis dinámico	45
Tabla 11: Derivas y desplazamientos laterales generados por el análisis dinámico	47
Tabla 12: Derivas y desplazamientos laterales en Y debido al análisis dinámico – estructura con outriggers en piso 25	55
Tabla 13: Iteraciones con un outrigger – periodos, cortante basal y momento en el núcleo	56
Tabla 14: Iteraciones con un outrigger – derivas y desplazamiento máximo	58
Tabla 15: Derivas y desplazamientos laterales en Y debido al análisis dinámico – estructura con outriggers en pisos 10 y 30	61
Tabla 16: Iteraciones con dos outriggers – periodos, cortante basal y momento en el núcleo	62
Tabla 17: Iteraciones con dos outrigger – derivas y desplazamiento máximo	63
Tabla 18: Derivas y desplazamientos laterales en Y debido al análisis dinámico – estructura con outriggers en pisos 20, 30 y 35	66
Tabla 19: Iteraciones con tres outriggers – periodos, cortante basal y momento en el núcleo	67
Tabla 20: Iteraciones con tres outrigger – derivas y desplazamiento máximo	68
Tabla 21: Comparación de factor de escala para los casos destacados	70
Tabla 22: Carga axial y momento flector en la columna E-2 – estructura con outriggers en piso 30	76

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 ANTECEDENTES

En Perú, 12 de cada 100 hogares no cuentan con una vivienda propia o digna (INEI, 2017, p. 181-184). Estas cifras reflejan la carencia de construcciones capaces de **satisfacer las necesidades de una población en expansión.**

En Lima, la periferia de la capital se ha visto invadida por cúmulos de ciudadanos en búsqueda de un espacio de pernocte u ocupación, usualmente se encuentra fuera del margen de la formalidad. Esto promueve un crecimiento horizontal desordenado y poco controlado por las autoridades en turno conocido como “Invasión Hormiga”, término acuñado por Ana María Fernández en 2015. Este panorama ilustra cómo un gobierno es incapaz de integrar estas nuevas extensiones de la ciudad con las antiguas áreas y, a su vez, a las redes de servicios básicas. Dentro de las posibles soluciones a este crecimiento acelerado, se opta por densificar y maximizar el área aprovechada por las viviendas (Fernández, 2015, p. 71). Desde este punto de vista la construcción vertical surge como una opción práctica y viable frente a la problemática de Lima.

En la actualidad, la construcción de rascacielos puede alcanzar alturas que sobrepasan los 500 metros. Un claro ejemplo es el Guangzhou CTF Tower, cuya altura total es de 520 metros (Ho, 2016, p. 21-22). Estructuras de esta envergadura exponen al crecimiento vertical como **uno de los grandes desafíos de la construcción del siglo XXI.** En vista de ello, la ingeniería se ha visto forzada a investigar e innovar con herramientas y sistemas estructurales que mejoren **el comportamiento de la estructura ante las diversas solicitaciones a la cual será sometida durante su vida útil.**

En el Perú, la demanda por edificios de altura considerable se viene requiriendo desde la década de los 70. Como ejemplo particular, se puede citar **el Hotel Sheraton ubicado en el centro de Lima.** Estructuras que son usualmente destinadas a cumplir las funciones de hotelería y oficina como el caso emblemático de la más **nueva sede del Banco de la Nación, el cual desarrolla una altura en promedio hasta la azotea de 140 m.**

Sin embargo, **en los últimos años, el rubro de la construcción** de edificios altos se encuentra incursionando en la aplicación de estas estructuras como viviendas. Dentro de este contexto, la Torre Lux es una opción amigable y moderna capaz de albergar a familias dentro de sus 91 metros de altura con un total de 250 departamentos distribuidos en sus 33 pisos (Vargas, 2016).

Esta nueva premisa crea una necesidad por fomentar la construcción de edificios altos de uso residencial en la ciudad de Lima. Sin embargo, el comportamiento de este tipo de estructuras es diferente al de edificaciones de menor altura, en particular desde el punto de vista de las solicitaciones laterales como la acción de sismos. Una solución estructural para mejorar la respuesta del rascacielos ante estos eventos se encuentra en el uso de outriggers, los cuales son brazos rígidos que se ubican en determinados niveles de la estructura, que mejoran el desempeño de una estructura bajo cargas laterales.

## 1.2 OBJETIVOS

A continuación, se detalla el objetivo general de esta investigación, junto con los objetivos específicos.

### 1.2.1 Objetivo General

El objetivo central de la presente tesis es contribuir con metodologías de diseño para edificios altos de vivienda en la ciudad de Lima, mediante el uso de un sistema sismo resistente, outriggers, que contribuya a mejorar su comportamiento sísmico. Esto se realizará mediante un análisis comparativo de estructuras con y sin el sistema mencionado, las cuales se basarán en el concepto del One Wilson Square, ubicado en Filipinas.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudiar el estado del arte, recopilar la información necesaria y elegir el sistema de outriggers más adecuado para la estructura basada en el diseño del One Wilson Square en el contexto peruano.
- Realizar una estructuración basada en la arquitectura original y desarrollar el análisis sísmico de la estructura, sin hacer uso de outriggers.
- Modificar la estructuración para determinar la posición óptima de los outriggers en determinados niveles del edificio bajo criterios iterativos, y comparar el comportamiento sísmico de la nueva estructura con el de la inicial.

## 1.3 HIPÓTESIS

Los resultados que se esperan de esta investigación son que debe existir una disposición óptima de niveles con outriggers en la estructura, de tal forma que el comportamiento dinámico de la misma sea el más eficiente en términos de reducción de derivas laterales y esfuerzos en el núcleo central. Esta distribución dependerá del número de pisos de la edificación y de la cantidad de

niveles con outriggers, el cual se obtendrá a partir de un proceso iterativo. Para fines del presente trabajo, se dispondrá de hasta tres niveles con outriggers en una edificación de 40 pisos de altura.

#### 1.4 METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos descritos en la presente tesis se seguirá una metodología basada en el método científico. Con ello, se busca obtener una secuencia de pasos capaz de satisfacer las necesidades del proyecto y reflejen los resultados esperados manteniendo una lógica concreta.

Para iniciar el estudio de la aplicación de outriggers en edificaciones altas, se requiere de una recopilación preliminar de información a manera de marco teórico, que abarque la teoría de los outriggers y marco normativo. Además, se investigará acerca de estudios desarrollados con anterioridad con respecto al tema. Esto permite tener un punto de partida en lo que respecta a teorías numéricas y criterios de evaluación en etapas subsecuentes.

Después de la etapa de recopilación e investigación, la atención se concentrará en el caso de estudio; para nuestro caso, este será el One Wilson Square. Se tendrá como punto de partida las plantas de arquitectura y las elevaciones correspondientes, a partir de las cuales se realizará la estructuración del proyecto. Así se obtendrá una primera propuesta de ubicación para cada uno de los elementos estructurales. Luego, con las fórmulas para predimensionamiento propuestas en el libro del Ing. Antonio Blanco (1997), se calcularán las dimensiones de dichos elementos.

Posterior al proceso de predimensionado, se elaborará un modelo computacional en el software Etabs. Este diseño digital básico será evaluado con las solicitaciones correspondientes a carga viva, muerta y de sismo (análisis estático y dinámico), aplicando la Norma E.030. Cabe mencionar que al ser una estructura de gran extensión se consideraran cargas por viento, lo cual será detallado en la sección 4.3.2. Se obtendrá del modelo los resultados que permitan evaluar la respuesta de la estructura, como las derivas inelásticas y fuerzas internas en los principales elementos. Luego de esta etapa, se procederá con la incorporación e iteración de outriggers. Para este proceso, se define que los outriggers serán instalados cada cinco niveles. Dado que el edificio de estudio cuenta con 40 niveles, existen 8 posibles ubicaciones para dichas estructuras.

El proceso de iteración presentará una secuencia definida de la siguiente manera. Primero, se iniciará con la iteración de un outrigger en un nivel en específico y mediante el software se obtendrán los resultados correspondientes a dicha iteración. Este proceso se realizará en cada una de las ubicaciones mencionadas previamente. La iteración que presente los resultados más favorables estructuralmente será elegida para la primera posición fija de outrigger. Posteriormente, siguiendo la secuencia del proceso anterior, con la variante de que ya se tiene una

posición establecida para uno de los outriggers, se procederá a generar las siete combinaciones para dos de estos elementos en la estructura y, tan igual como para la primera secuencia de iteración, se compararán los resultados tabulados para así obtener el par correspondiente para ocupar las siguientes posiciones fijas. Como proceso final en la etapa de iteraciones, se fijarán las dos posiciones de outriggers previamente establecidas para luego de 6 procesos iterativos se proceda a obtener la combinación que optimice el comportamiento de la estructura frente a cargas laterales. En total se realizarán 21 iteraciones como se puede ver en la Ilustración 1.

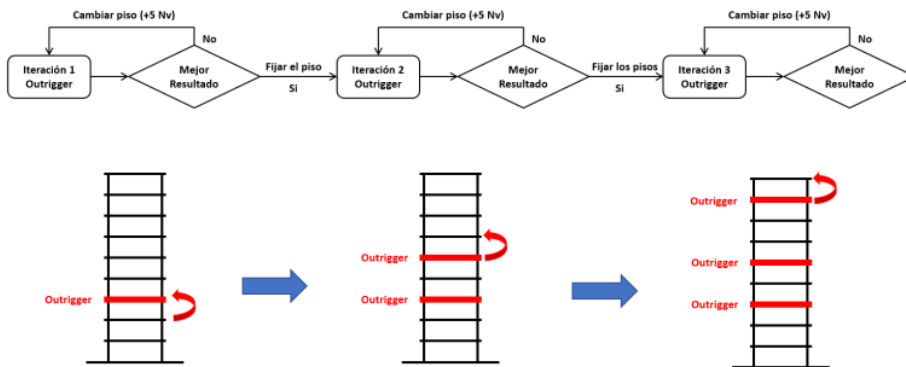


Ilustración 1: Flujo de proceso de análisis de Outriggers

Como última etapa, se procederá a comparar los mejores resultados de cada secuencia iterativa por medio de gráficos, con lo que se podrá determinar la configuración óptima considerando los aspectos técnicos. A partir de esto, se redactarán las conclusiones y recomendaciones necesarias.

## 2 MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se desarrollarán los conceptos básicos a emplear en la presente investigación. Se partirá por exponer el concepto general de qué es un outrigger para familiarizarse con el sistema. Un outrigger es un sistema estructural utilizado en edificios altos para mejorar su estabilidad y resistencia contra fuerzas laterales, como el viento y los terremotos. Este sistema conecta el núcleo central del edificio con las columnas exteriores mediante vigas horizontales, redistribuyendo las cargas y reduciendo las deformaciones.

Seguido a ello, se buscará elaborar una breve reseña de la historia dentro de las últimas dos décadas, donde se formuló y perfeccionó la idea del outrigger. En los años recientes, los avances tecnológicos y la creciente necesidad de construir rascacielos más altos y seguros han impulsado la innovación en este campo. Desde sus primeras aplicaciones, el diseño de outriggers ha evolucionado, incorporando materiales avanzados y técnicas de construcción más eficientes.

Al concluir la sección previa, se abordarán los diferentes tipos de outriggers, ya que será necesario conocer sus características para poder elegir el más apropiado para la estructura que se analizará. Los principales tipos de outriggers incluyen los convencionales, los rígidos y los ajustables, cada uno con sus propias ventajas y desventajas dependiendo de las condiciones específicas del proyecto.

Por último, se incluirá un breve marco normativo en el cual se presentará la norma E.030 de diseño sismorresistente, la cual se empleará para evaluar el comportamiento de las estructuras a desarrollar en la presente investigación. Se presentarán los conceptos de regularidad estructural y requisitos de rigidez exigidos por este código, asegurando que el edificio pueda resistir las deformaciones inducidas por las fuerzas sísmicas sin sufrir daños significativos.

### 2.1 OUTRIGGERS

#### 2.1.1 Definición

Los outriggers son estructuras horizontales que contribuyen a mejorar la rigidez lateral de una edificación al conectar el núcleo central con las columnas o muros exteriores de la misma. El funcionamiento de estos sistemas es simple: dado que los outriggers se comportan como brazos rígidos de conexión, cuando el núcleo central se inclina debido a sollicitaciones laterales, se induce un par de tracción y compresión en las columnas. Este sistema de fuerzas actúa en dirección opuesta al movimiento, lo que resulta en un momento restaurador que actúa en el núcleo (Choi et al, 2012, p. 14). La Ilustración 2 muestra de manera gráfica lo mencionado anteriormente.

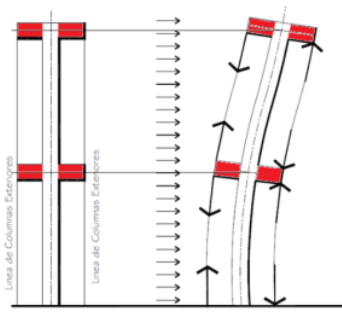


Ilustración 2: Esquema del funcionamiento de los outriggers (Cainzo, 1994, p.4)

Si se denomina a los momentos restauradores, en cada nivel de outriggers,  $M_1$  y  $M_2$ , respectivamente, el momento generado en la base,  $M_{base}$ , se verá reducido en la suma de  $M_1$  y  $M_2$ , es decir:

$$M_{base} = M_{base0} - (M_1 + M_2) \dots\dots\dots (1)$$

Donde  $M_{base0}$  es el momento que se presentaría en la base del núcleo central para una estructura sin outriggers. La ecuación anterior también se puede reescribir de la siguiente manera:

$$M_{base} = M_{base0} - \sum M_i \dots\dots\dots (2)$$

La Ilustración 3 muestra el diagrama de momento flector del núcleo central para el caso de una estructura con (línea continua) y sin (línea punteada) outriggers. Se puede observar la forma en que los momentos restauradores disminuyen <sup>41</sup> el momento flector en la base del muro.

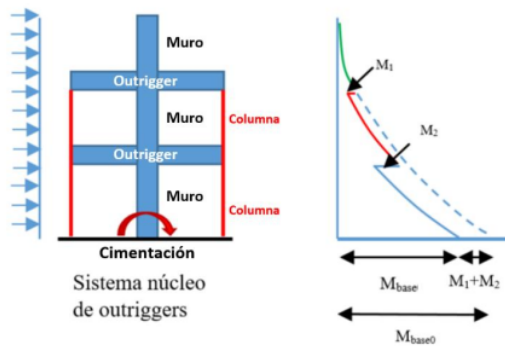


Ilustración 3: Diferencia en el diagrama de momento flector para una estructura con y sin outriggers (Ho, 2016, p.23)

Analizando la ecuación (2), la magnitud del momento en la base puede disminuir si se incrementa la magnitud de  $M_i$  o el número de outriggers en la edificación (Ho, 2016, p. 23). Es importante que estos elementos posean una resistencia elevada pues, a pesar de que se coloque una cantidad

adecuada de outriggers, si la magnitud de  $M_i$  es baja, no se logrará una reducción significativa en el momento flector en la base del edificio.

### 2.1.2 Beneficios Estructurales

Los principales beneficios que se pueden obtener mediante el uso de outriggers, como mencionan Choi et al (2012, p. 15-16), son los siguientes:

- Reducción de la deformación: El momento restaurador permite reducir los desplazamientos laterales producto de la disminución del momento de volteo. Esto conlleva a una reducción en las derivas de entrepiso.
- Disminución de fuerzas en la cimentación: Los outriggers contribuyen a distribuir de manera efectiva las cargas provenientes de solicitaciones horizontales en la cimentación. De esta manera se reducen las concentraciones de esfuerzos en la zona del núcleo central.
- Mejora en la transferencia de fuerzas de gravedad: El sistema proporciona una mejora en la transmisión de cargas de gravedad que permite reducir la diferencia entre las deformaciones verticales del núcleo central y las columnas exteriores.
- Redistribución de fuerzas: Al considerar que un elemento del sistema sismorresistente podría fallar o perder capacidad de conexión, los outriggers proporcionan un camino alternativo para la transmisión de cargas.
- Escalabilidad: El sistema puede aplicarse en edificios bajos como en rascacielos que superen los 100 niveles.

### 2.1.3 Historia de los Sistema Outriggers

Tras una guerra civil y dentro de un proceso de reconstrucción dentro del país, en el año de 1870 en Manhattan, Nueva York se finaliza la construcción del Equitable Life Assurance Building, considerado el primero de los edificios altos en el mundo. El sistema estructural utilizado fue simple: un sistema aporticado de vigas y columnas de acero. Esta proeza de la época **marcó una nueva etapa en la historia de la** construcción. Las nuevas edificaciones estaban regidas bajo nuevas solicitaciones producto del incremento de altura, por ejemplo, una carga lateral por viento (Ho, 2016, p.21-22).

Para diseñar estos nuevos desafíos en altura, la rigidez y desplazamientos que la estructura pueda desarrollar fueron factores clave a tomar en consideración. Por ello, para aumentar la rigidez lateral que pueda desarrollar el edificio se propone incorporar vigas peraltadas que conectan el



núcleo del edificio con las columnas perimetrales de los bordes. Inicialmente este incremento no fue del todo significativo al punto de alterar la arquitectura. Sin embargo, a medida que nuevas propuestas de edificios de mayor elevación fueron apareciendo, el peralte de las vigas conectoras fue aumentando al punto de compararse las dimensiones de un muro (Ho, 2016, p.22-22). Este se puede considerar como el punto de partida de los outriggers. Esquemáticamente, esto se puede apreciar en la Ilustración 4 donde las líneas punteadas representan vigas peraltadas en determinados niveles, mientras que en la imagen contigua se muestran el desarrollo de peralte equiparable con la de un muro.

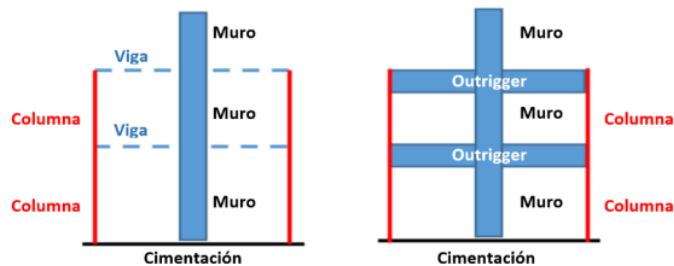


Ilustración 4: Esquema básico de configuración de outriggers dentro de la estructura (Ho, 2016, p.21)

A pesar del gran interés por construir edificaciones con alturas desafiantes, el tiempo y cantidad de investigaciones a estos sistemas es relativamente incipiente y limitada, pero congruente con el tiempo que el hombre lleva edificando rascacielos. En los últimos 20 años, los diversos estudios se han centrado en el análisis y comparación de las derivas generadas por la incorporación de outriggers. Además, se toma en cuenta cómo la ubicación de estos sistemas afecta directamente los resultados obtenidos (Krunal et al., 2015, p.274). Es decir, que el número y ubicación son variables que definen la eficiencia de estos elementos. Sin embargo, a la fecha estas variables se ven forzadas a determinadas ubicaciones dentro de la estructura. Por lo general, el hecho de colocar un piso outrigger llega a limitar el área disponible para ser usada por las personas. Es usual que estos ambientes se limiten a cumplir la función de pisos refugio, donde también se resguarda todo equipamiento electromecánico.

#### 2.1.4 Tipos de Outriggers

Los outriggers se pueden clasificar como sistemas convencionales, indirectos o virtuales, ajustables y amortiguados. A continuación, se explicará brevemente cada uno de estos.

##### a) Sistema directo o convencional

Este sistema aplica el concepto fundamental de los outriggers, es decir, un núcleo central con alta rigidez lateral, columnas dispuestas en el perímetro de la edificación, y outriggers

rígidos que conectan en núcleo con las columnas (Choi et al, 2012), como se explicó en la sección 2.1.1 (ver Ilustración 5). Estos outriggers pueden ser armaduras metálicas o muros de concreto armado.

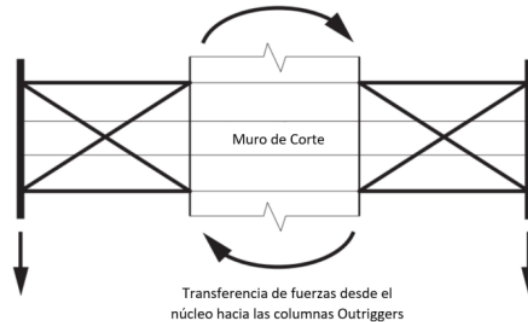


Ilustración 5: Funcionamiento del sistema de outriggers directos (Choi et al, 2012, p.15)

**b) Sistema indirecto o virtual**

En este caso, no hay conexión directa entre el núcleo central y las columnas exteriores. Por el contrario, una armadura perimetral rodea al edificio y conecta entre sí a todas las columnas exteriores. Las cargas laterales que ocasionan la rotación del núcleo intentarán mover los diafragmas en los diferentes niveles hacia la izquierda y derecha, lo cual genera que la armadura perimetral se trate de mover hacia arriba y abajo, intentando rotar. Las columnas exteriores se opondrán a este movimiento generando un par de fuerzas opuestas a la rotación causada por las cargas laterales, las cuales se transmiten a la armadura y generan fuerzas horizontales en los diafragmas en dirección opuesta. Esto induce un cortante opuesto al del movimiento en el núcleo, con lo que reducen los momentos de volteo y las rotaciones del edificio. Ilustración 6 resume el funcionamiento de este sistema.

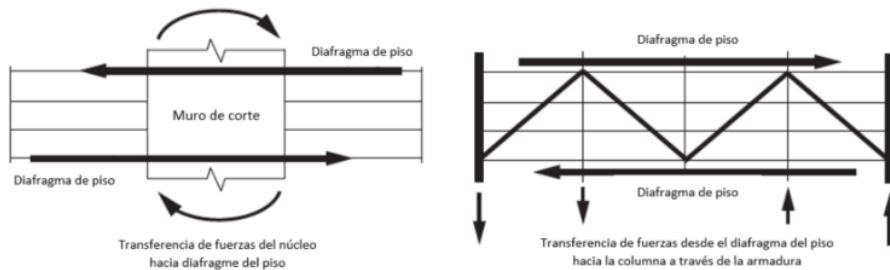


Ilustración 6: Funcionamiento del sistema de outriggers virtuales (Choi et al, 2012, p.21)

Si se compara el sistema directo con el virtual, la trayectoria de las cargas en el primer caso es más directa. Esto genera que la restricción al volteo sea más eficiente que en el caso del sistema virtual de outriggers. Sin embargo, en algunos edificios es suficiente el uso de este sistema para satisfacer los requisitos de desplazamientos laterales permisibles, siendo las conexiones entre los elementos más sencillas que las que requiere un sistema directo (Choi et al, 2012, p.21).

c) **Sistema ajustable**

Una de las principales preocupaciones en el diseño de outriggers es la deformación diferencial entre en núcleo central y las columnas perimetrales. Deformaciones pequeñas, cuyo origen está en la deformación elástica, creep y contracción del concreto, pueden generar grandes fuerzas en los elementos que conforman el sistema de outriggers debido a la alta rigidez de estos. Algunas de las variables que intervienen en estas deformaciones son dependientes del tiempo, como el creep y la contracción por secado, por lo que no culminarán hasta que la edificación entre en servicio (Ho, 2016).

Una solución para reducir este efecto se encuentra en los sistemas de outriggers ajustables, los cuales incluyen una junta que permite conectar los outriggers una vez que todas las cargas verticales ya estén presentes en los elementos verticales. Esta junta también debe garantizar cierto grado de conexión durante la construcción, para garantizar la estabilidad lateral del sistema en esta etapa.

Existen diversos sistemas ajustables de outriggers, los cuales han ido evolucionando con el paso de los años. Entre estos se puede destacar los siguientes:

- Sistema Cross-Jack: Este sistema consiste en el uso de flat jacks, dispositivos conformados por dos planchas de acero soldadas en su perímetro entre las cuales se inyecta un fluido hidráulico a presión. Esto va engrosando el dispositivo, introduciendo esfuerzos en la estructura. Los flat jacks se colocan entre el outrigger y las columnas perimetrales, como se muestra en la Ilustración 7. El jack en la cara superior de un extremo del outrigger está conectado hidráulicamente al ubicado en la cara inferior del otro extremo. Así, bajo cargas de gravedad el volumen hidráulico es constante, pues uno de los jacks conectados se cierra (inferior a un extremo) mientras el otro se abre (superior al otro extremo). En caso de giro, ambos jacks se intentarán cerrar, lo cual genera una presión que permitirá resistir el momento. (Choi et al, 2012, p. 38).

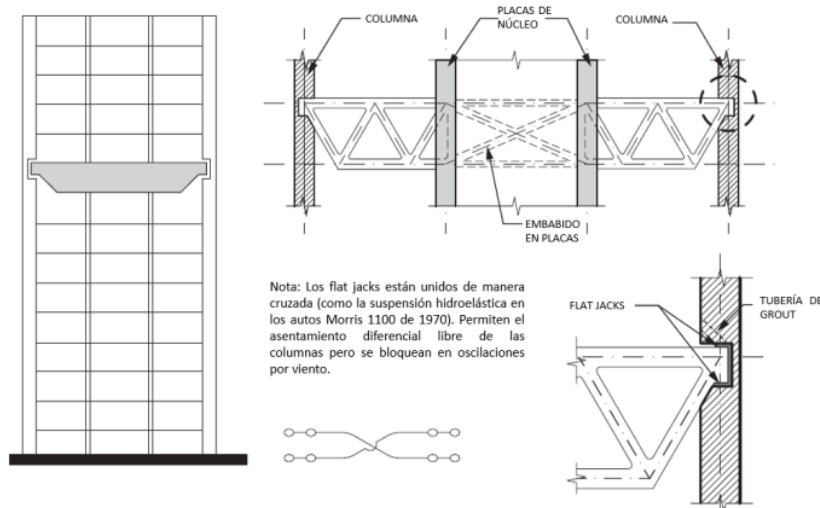


Ilustración 7: Sistema Cross-Jack de outriggers (Choi et al, 2012, p.40)

- Sistema Shim Plate o planchas de calce: Este sistema de corrección consiste en colocar planchas de acero (shim packs) en la parte superior e inferior de la conexión entre el outrigger y la columna perimetral, los cuales son comprimidos. Estos elementos pueden ser añadidos o removidos para compensar los movimientos diferenciales entre la columna y el outrigger, conforme progresa la construcción. A diferencia del sistema anterior, este método requiere mayor monitoreo. (Choi et al, 2012, p. 38). El funcionamiento de este sistema se resume en la Ilustración 8:

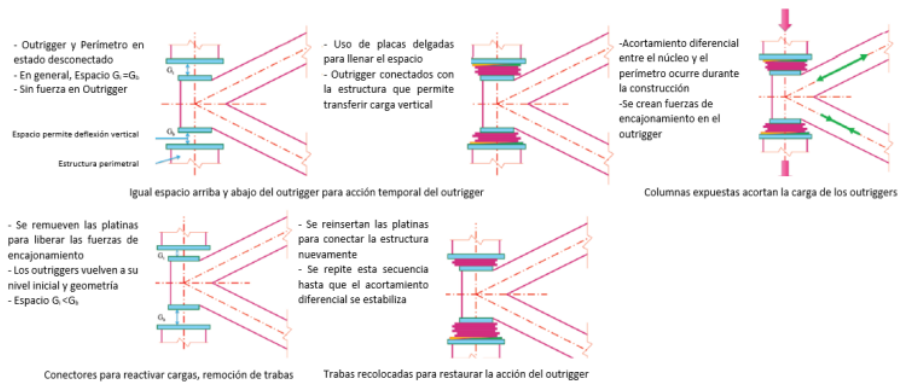
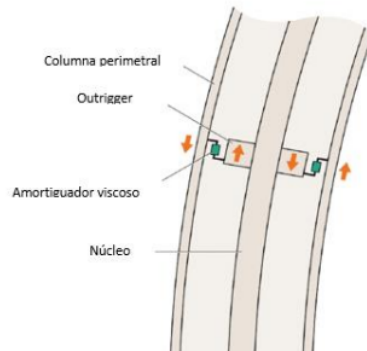


Ilustración 8: Sistema Shim-Plate de corrección (Choi et al, 2012, p.39)

#### d) Sistemas amortiguados

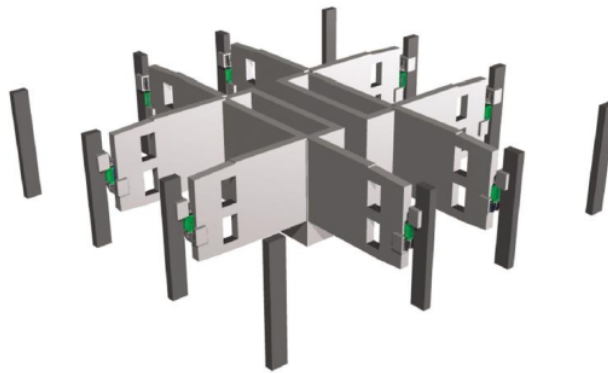
El principio de funcionamiento de este sistema es similar al de los outriggers tradicionales. La diferencia es que, en este caso, en el punto de conexión entre el brazo rígido y la columna perimetral, se coloca un disipador viscoso. Ante la acción de cargas

laterales, el edificio intentará rotar, lo cual genera un desplazamiento diferencial entre la columna y el outrigger, lo cual activa el dispositivo y provee de una fuerza de amortiguamiento (Smith, 2016, p.63). La Ilustración 9 muestra el esquema de la conexión entre los outriggers y las columnas perimetrales incluyendo amortiguadores.



*Ilustración 9: Esquema del sistema de outriggers amortiguado (Smith, 2016, p.63)*

Este sistema fue empleado por primera vez en el conjunto residencial St. Francis Shangri-La Place, en Filipinas, el cual consiste en dos torres de 217 metros de altura cada una. Los disipadores instalados deberían ser capaces de reducir las aceleraciones del edificio durante un evento sísmico al 35% del valor original, mientras que, bajo condiciones de servicio, los momentos debidos a cargas de viento disminuyen en un 40% (Choi et al, 2012, p. 68). La Ilustración 10 muestra una vista isométrica de la configuración de outriggers y disipadores en este edificio, en la que se resalta la ubicación de los dispositivos.



*Ilustración 10: Vista isométrica de la configuración de outriggers en St. Francis Shangri - La Place (Choi et al, 2012, p.69)*

## 2.2 MARCO TEÓRICO

Se utilizará la norma E.030 de diseño sismorresistente (Ministerio de Vivienda, 2018) para realizar el análisis sísmico de las estructuras a estudiar en la presente investigación. Si bien es cierto que dicha normativa es limitada en cuanto a especificaciones para edificios altos, en el sentido en que no se brindan disposiciones adicionales para este tipo de estructuras de periodo alto y, por tanto, aceleraciones espectrales bajas, deberá asegurarse que la estructura cumpla con las disposiciones indicadas en la misma. De manera particular, son de interés las restricciones a la irregularidad y los requisitos de rigidez que especifica la norma.

### 2.2.1 Regularidad estructural

Una estructura regular se define como aquella cuya configuración resistente a cargas horizontales, no presenta irregularidades en altura o planta. Ahora bien, la norma hace énfasis en determinadas irregularidades extremas, las cuales pueden ser de rigidez, resistencia o torsional. Dependiendo del tipo de estructura a diseñar y el lugar en que se encuentre, la norma E.030 impone restricciones con respecto a dichas irregularidades, las cuales se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Restricciones a la irregularidad de la norma E.030 (Adaptado de norma E.030, 2018, Art. 21.1)

Categoría de la edificación	Zona	Restricciones
A1 y A2	4, 3 y 2	No se permiten irregularidades
	1	No se permiten irregularidades extremas
B	4, 3 y 2	No se permiten irregularidades extremas
	1	Sin restricciones
C	4 y 3	No se permiten irregularidades extremas
	2	No se permiten irregularidades extremas excepto en edificios de hasta 2 pisos y 8 metros de altura
	1	Sin restricciones

### 2.2.2 Requisitos de rigidez

La norma E.030 define los requisitos de rigidez que deben cumplir las estructuras por medio de límites para las derivadas inelásticas de entrepiso. Estos requisitos dependen del material predominante de la estructura. Para que una estructura pueda satisfacer las exigencias de rigidez del código, sus distorsiones de entrepiso deben estar por debajo de los valores que se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Requisitos de rigidez de la norma E.030 (Adaptado de norma E.030, 2018, Art. 32)

Material predominante	Distorsión límite
Concreto Armado	0.007
Acero	0.010
Albañilería	0.005
Madera	0.010
Edificios de muros de ductilidad limitada	0.005

### 3 ESTADO DEL ARTE

#### 3.1 INVESTIGACIONES PREVIAS

El concepto de outriggers ha sido estudiado no más de 4 décadas en el mundo, lo cual nos muestra un panorama un tanto reciente y en vías de desarrollo. Como parte de ello, los tópicos abordados en investigaciones recientes se encuentran enfocados en el comportamiento de una estructura de considerable altura bajo los efectos de la incorporación de estos sistemas. En los últimos años, las variables principales de análisis han sido: el peralte, cuyas dimensiones pueden compararse con la altura de un muro; el número de pisos a utilizar como outriggers; así como su ubicación en altura dentro de la estructura. Estas consideraciones influyen las deformaciones que el edificio pueda desarrollar bajo la acción de cargas laterales (Ho, 2016). En primer lugar, la definición de viga peraltada que une un núcleo con las columnas de borde es el punto de partida del concepto. Un outrigger se relaciona con el incremento sustancial del peralte de una viga al punto de compararse con la altura de un muro. Ello plantea una proporcionalidad en la reducción de los desplazamientos laterales a medida que se incrementa la altura de la sección transversal de la viga.

Uno de los trabajos que aborda esta relación fue desarrollado en el año 2017 por el equipo hindú conformado por los miembros del departamento de ingeniería civil del Colegio de Ingeniería en Mandya, Karnataka, India. La propuesta fue la de modelar una estructura de 35 niveles sin la configuración para incorporar outriggers y modelar otra con las características necesarias para añadir estas estructuras sismorresistentes. La particularidad de esta investigación radica en que para el segundo modelo se contemplaron 5 variantes donde a cada una de ellas le correspondía una proporción diferente entre el peralte de viga y la altura de entrepiso. Estas proporciones se pueden distinguir en la Tabla 3 que se muestra a continuación.

Tabla 3: Relación peralte - altura de viga en la investigación (Tomado de Suresh et al, 2017, p.1750)

Relación peralte/altura entrepiso	Dimensión viga outrigger [mm] – [b x h]
1	300 x 600
2	300 x 1200
3	300 x 1800
4	300 x 2400
5	300 x 3000

Para ambos modelos, se mantuvieron las generalidades para garantizar la congruencia durante el proceso de comparación y por ende la única variable propia de la estructura fuese la dimensión de las vigas outrigger.



La estructura por estudiar es un edificio de aproximadamente 107 metros de altura con un sistema estructural aporticado, con diafragmas rígidos en su totalidad de área 2880 metros cuadrados. Además, se puede identificar que la estructura es perfectamente regular en planta y elevación. La Ilustración 11 representa la vista de una planta sin outriggers (lado izquierdo), mientras que la otra vista representa una disposición con outriggers (lado derecho).

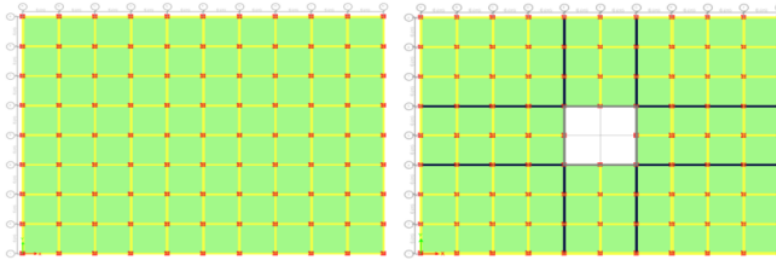


Ilustración 11: Vista en planta del modelo sin outriggers y con outriggers (Sukesh et al., 2017, p.1750)

El análisis realizado fue utilizando el software Etabs haciendo uso de elementos finitos, con lo cual se busca una representación más fiel de la estructura en lo que respecta a su comportamiento. Para cada modelo se realizó un análisis estático y dinámico siguiendo los lineamientos del código de diseño hindú. Tras el análisis, cada modelo desarrolló un comportamiento acorde a lo estipulado párrafos más arriba: a mayor peralte, menor desplazamiento lateral desarrollará el edificio. Esto se puede visualizar de manera gráfica en la Ilustración 12. Además, se puede notar que, para el caso en el que las vigas adoptan la altura de entrepiso como peralte, los desplazamientos alcanzan su menor valor posible. Es notoria la diferencia entre un modelo sin considerar los outriggers y uno con ellos. Esta variación es máxima para el piso 35 en los 6 modelos con una reducción al 77% para el modelo 2; por otro lado, la máxima, claramente, se desarrolla en el modelo 6 al 66%.

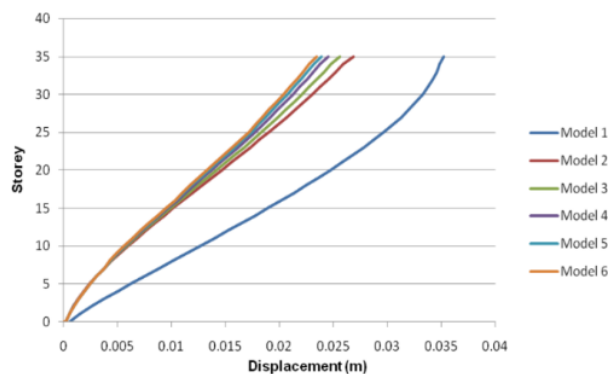


Ilustración 12: Variación lateral de desplazamientos para la zona 2 (Sukesh et al., 2017, p.1750)

Otro factor para considerar es la ubicación de los outriggers dentro de la estructura. Para ello, en 2015, Krunal y Dhruvi publicaron un artículo acerca de la influencia de su posición dentro de la estructura a lo largo de la elevación. Los investigadores postulan que existe una posición tal que el comportamiento del edificio se optimiza. Además, identifican que la aplicación de estos elementos dentro un edificio alto se encuentra limitada por ciertos criterios como la arquitectura y funcionalidad, ya que los pisos donde se instalen outriggers quedarán inhabilitados y se verán condicionados en cumplir la función de almacenamiento de equipamiento electromecánico o el mejor de los casos como pisos refugio en caso de movimientos telúricos. Además, se debe garantizar la conexión de elementos entre el núcleo y las columnas perimetrales. Como última variable, la distancia entre centro y el perímetro influirá en el momento flector interno presente en el outrigger, ya que la longitud entre núcleo y perímetro se verá acotada dentro de un rango de longitudes dependiendo del tipo.

Como se pudo ver líneas arriba, existen variables para la ubicación de un outrigger; sin embargo, Krunal y Dhruvi, al realizar su investigación en 2015, se ignoran dichas variables para enfocarse en la búsqueda de una posición tal que los desplazamientos ante cargas laterales se vean minimizados. Esta búsqueda de la posición ideal surgió bajo un proceso iterativo que implica la modificación de niveles específicos para convertirlos en pisos outrigger dentro la misma estructura en análisis para garantizar el grado de comparación.

Tan igual como en la investigación previamente mencionada acerca de la importancia del peralte en una estructura outrigger, se partió de un modelo sin la incorporación de estos, el cual tendrá la función de modelo base con el cual se compararán los análisis subsecuentes. Como generalidades para la concepción de los modelos, la estructura analizada fue un edificio de 150 metros de altura con un sistema estructural aperticado y un núcleo de muros de corte, con diafragmas rígidos en su totalidad. Además, la estructura es perfectamente regular en planta y elevación donde esta consideración permite que los procesos sean más exactos. Con un área bruta en planta aproximada de  $1764\text{m}^2$  y 3m de altura por entrepiso se bosqueja una estructura que puede ser catalogada como aperticada dentro de sus 40 niveles. Esto se puede visualizar en la elevación y en planta como se puede ver a continuación en la Ilustración 13.

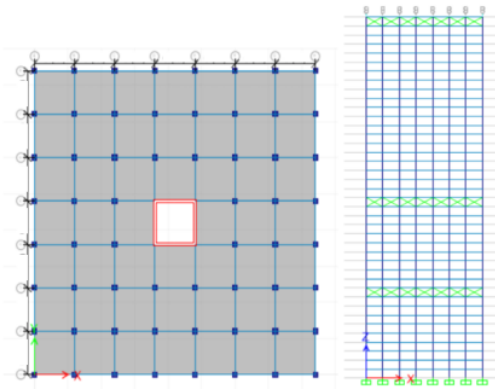


Ilustración 13: Vista en planta y elevación del modelo empleado en la investigación (Krunal et al., 2015, p.269)

Para el análisis iterativo se siguieron los patrones que se describen a continuación. Debido a que se trata de un proceso repetitivo, este se limitó a 3 outriggers en pisos específicos múltiplos de 10. Se entiende la toma de esta decisión, ya que al hacer el cálculo con un outrigger las iteraciones serían 40. Luego, al tomar en consideración 2 de estas estructuras sismo resistentes, la combinación asciende a 780; y si se tomaran 3 pisos, la combinación puede llegar a requerir 9880 casos de estudios. Por temas de simplificación, el equipo de investigación optó por solo tomar en consideración 10 casos puntuales donde el primero es el modelo base y los siguientes se detallarán en la Tabla 4 adjunta líneas abajo.

Tabla 4: Cuadro de distribución de outriggers en altura (Adaptado de Krunal et al., 2015, p.268)

Caso	Outrigger 1	Piso	Outrigger 2	Piso	Outrigger 3	Piso
Caso 1	No		No		No	
Caso 2	Sí	40	No		No	
Caso 3	Sí	30	No		No	
Caso 4	Sí	20	No		No	
Caso 5	Sí	10	No		No	
Caso 6	Sí	20	Sí	40	No	
Caso 7	Sí	20	Sí	30	No	
Caso 8	Sí	20	Sí	10	No	
Caso 9	Sí	20	Sí	10	Sí	30
Caso 10	Sí	20	Sí	10	Sí	40

Bajo las definiciones previas, los análisis proporcionaron los siguientes resultados con respecto a las derivadas, las cuales se encuentran plasmadas en la Ilustración 14, para los casos con 1, 2 y 3 outriggers.

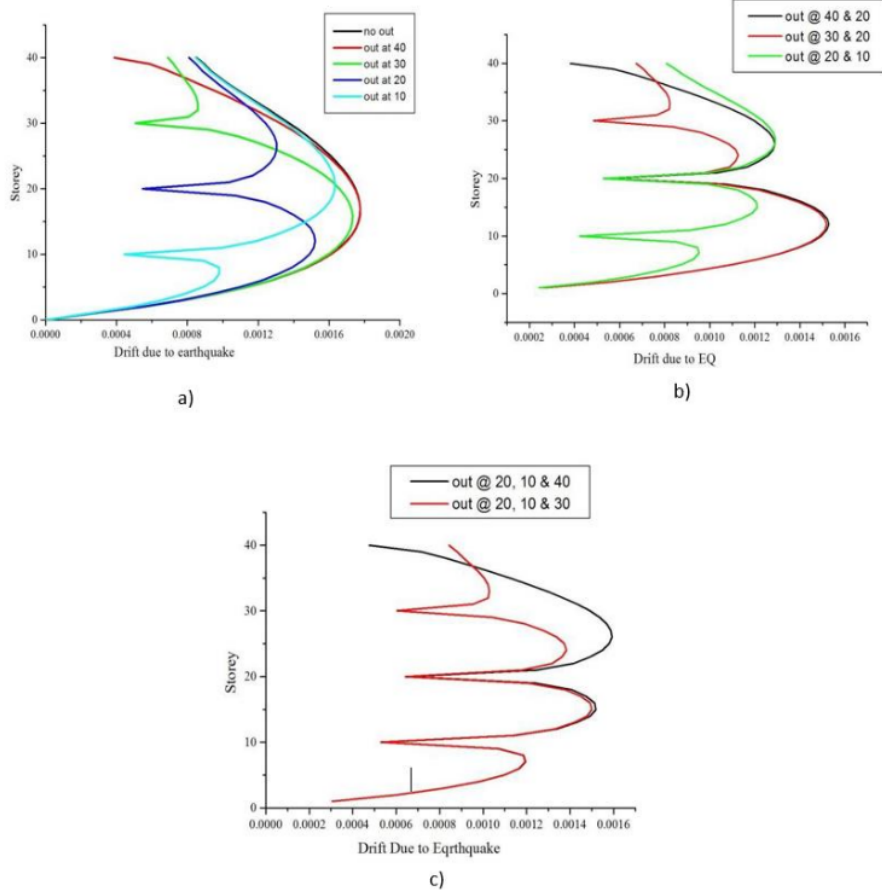


Ilustración 14: Diagrama deriva vs número de piso para casos con 1 outrigger (a), 2 outriggers (b) y 3 outriggers (c) (Krunal et al., 2015, p.273)

Observando los resultados presentados, es posible inferir la secuencia de análisis. En la primera etapa, se colocan outriggers en pisos múltiplos de 10 para tener un panorama general de cuál sería el comportamiento bajo la influencia en la estructura. Al momento de comparar la data resultante, se destaca que para el nivel 10 y 20 se obtienen las menores derivas. Por ello, para el análisis con 2 outrigger se opta por anclar a los niveles previamente mencionados y se añaden como segunda estructura variable a los niveles 30 y 40 que no redujeron los desplazamientos considerablemente. Luego se elige el que desarrolle menor derivas. Esta secuencia se repite una vez más para la última iteración. Con ello, se optimiza el proceso de análisis limitando los cálculos a 10 posibles casos.

A manera de conclusión, se puede notar que las variaciones entre colocar 1, 2 y 3 no refleja cambio significativo entre cada una de las variantes. Inicialmente, se planteaba que a mayor número de outriggers las derivas se reducirían, lo cual no necesariamente se cumple para todos

los casos. Es posible, por otro lado, que haya una configuración óptima que escape de los casos analizados, por lo que es recomendable realizar un mayor número de permutaciones.

### 3.2 EJEMPLOS DE ESTRUCTURAS CON OUTRIGGERS

En la siguiente sección, se presentarán algunas edificaciones en las cuales se ha hecho uso del sistema de outriggers. Dada la variedad de tipos y materiales de estos elementos, se muestra un ejemplo de estructura metálica, un caso de estructura de concreto armado y un sistema mixto de concreto y acero.

#### 3.2.1 Estructuras metálicas – New York Times Building

Esta estructura, ubicada en Nueva York, cuenta con 52 niveles, con outriggers ubicados en los pisos 28 y 51. Se decidió emplear acero debido a que facilita tener grandes áreas de oficinas, brinda flexibilidad para futuras modificaciones y posee menor costo y mayor velocidad de construcción (Scarangelo et al., 2008).

Para el sistema resistente a acciones laterales, se seleccionó un núcleo central cuyas dimensiones son 27.4 por 19.8 metros. Este debió ser complementado con outriggers en los pisos mecánicos para otorgar al edificio la rigidez lateral necesaria. Una particularidad del sistema de outriggers es que permite la redistribución de cargas de gravedad entre el núcleo y los pórticos perimetrales, así como los esfuerzos térmicos entre las columnas externas y las internas. (Choi et al., 2012, p. 50). La configuración de este sistema estructural se muestra en la Ilustración 15 y 16. Nótese el núcleo central de acero, así como los dos outriggers dispuestos en la estructura.

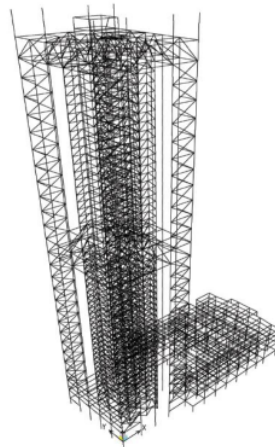


Ilustración 15: Sistema estructural del New York Times Building (Choi et al., 2012, p. 50)



Ilustración 16: Diagonales de acero del sistema outrigger (Callow et al., 2009)

### 3.2.2 Estructura de concreto armado – Waterfront Place

Este edificio de 40 niveles se ubica en la ciudad de Brisbane, Australia, y fue completado en el año 1990. Posee una altura total de 162 metros, lo que lo ubica como el noveno edificio más alto de la ciudad (CTBUH, 2018). La estructura está conformada en su totalidad en concreto armado, incluyendo los outriggers, los cuales tienen una altura total de dos pisos, entre los niveles 26 y 28. Una particularidad de la estructuración es que las columnas perimetrales no están alineadas con el núcleo central del edificio, por lo cual se tuvo que conectar dichas columnas con muros perimetrales, los cuales se conectan al núcleo central por medio de los outriggers. (Choi et al, 2012, p. 51). Esto se puede observar en la Ilustración 17 y 18, que muestra la planta de outriggers del edificio.

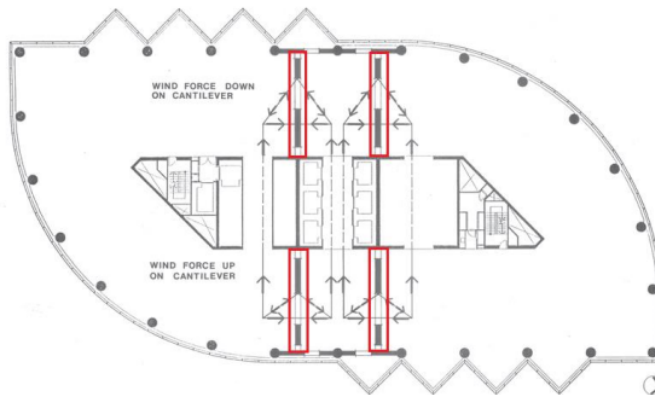


Ilustración 17: Planta de outriggers del edificio Waterfront Place – outriggers señalados en rojo (Choi et al., 2012, p.51)



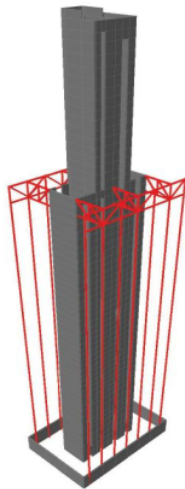
*Ilustración 18: Construcción de muro outrigger (Choi et al., 2012, p.53)*

Como mencionan Choi et al. (2012, p. 51-52), dos peculiaridades de los outriggers para esta edificación representaron innovaciones en el diseño en concreto armado de estos elementos. En primer lugar, se pudo reducir la transferencia de cargas entre los muros perimetrales y los outriggers durante la etapa de construcción, mediante el uso de juntas de fricción deslizantes. En función de la fuerza aplicada en las juntas, se podía ajustar el deslizamiento y así, lograr la reducción mencionada. Dichas juntas fueron bloqueadas al concluir la construcción para que los outriggers puedan cumplir su función.

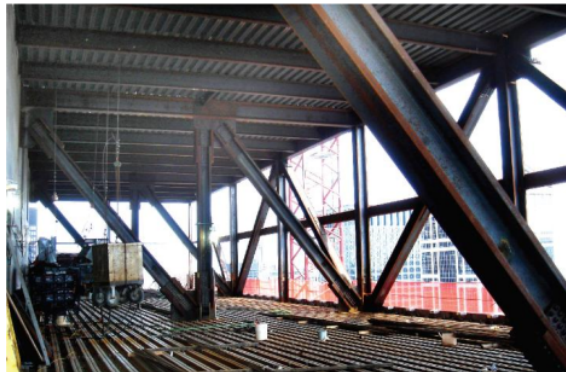
Por otro lado, dado que los brazos rígidos poseen un peralte importante, fue necesario dejar aberturas en los mismos. Se debió emplear, entonces, modelos de tipo puntal-tensor, los cuales representan las zonas de compresión como puntales y las de tensión como tensores. Actualmente, dichos modelos se usan de forma cotidiana para el diseño de elementos con alto refuerzo.

### **3.2.3 Estructura Mixta – 300 North LaSalle**

Esta estructura se encuentra localizada en la ciudad de Chicago, EE. UU., y posee 57 niveles con una altura total de 239 metros (CTBUH, 2018). Esta edificación está conformada por un núcleo central de concreto armado, columnas exteriores y outrigger de acero. Este elemento está conformado por una armadura perimetral que une las columnas exteriores, y armaduras transversales que conectan el núcleo central con la exterior, como se observa en la Ilustración 19 y 20, la ubicación de estos elementos se encuentra aproximadamente a dos tercios de la altura total del edificio, entre los niveles 40 y 41 (Choi et al., 2012, p. 58).



*Ilustración 19: Núcleo central, columnas exteriores y armadura outrigger del edificio 300 North LaSalle (Choi et al., 2012, p.58)*



*Ilustración 20: Armaduras outrigger del edificio 300 North LaSalle (Choi et al., 2012, p.58)*

Para reducir las fuerzas en el outrigger debidas a las deformaciones diferenciales entre el núcleo y las columnas exteriores, las conexiones finales en las armaduras debieron ser postergadas a una etapa posterior de la construcción. Sin embargo, fue necesario incluir los efectos a largo plazo como el creep del concreto, al considerar las cargas para la verificación por capacidad (Choi et al., 2012).

### **3.3 ONE WILSON SQUARE**

El One Wilson Square es <sup>1</sup> un edificio residencial de 36 niveles ubicado en la ciudad de San Juan, Filipinas. Del total de pisos, los 7 primeros son áreas comunes, locales comerciales y estacionamiento, y los siguientes 29 son de apartamentos. En total, la edificación cuenta con 240 unidades residenciales, 9 comerciales y 379 estacionamientos. La estructura ocupa un área total



de terreno de 2573 m<sup>2</sup>, mientras que el área techada de la planta típica es aproximadamente 1060 m<sup>2</sup>. (De Leon, 2015). La Ilustración 21 muestra un *render* en perspectiva del edificio.



*Ilustración 21: Se muestra una elevación en perspectiva del One Wilson Square (Rchitects, s.f.)*

Como se observa en la imagen anterior, a partir del piso 7 se mantiene una geometría típica hasta llegar a los últimos niveles, denominados “zona alta” (De Leon, 2015) a partir de donde se reduce progresivamente la planta desde la derecha, lo cual genera un escalonamiento en esta zona. Una peculiaridad de la arquitectura es la simetría que guarda en ambas direcciones, en particular en los pisos de la zona central del edificio. Esto permite tener una configuración estructural regular, que contribuye a mejorar la respuesta de la edificación ante eventos sísmicos. La Ilustración 22 presenta una planta típica de la zona media, en la cual se puede notar la distribución simétrica de columnas y muros estructurales. Se observa, además, que estos últimos se concentran en la zona de circulación vertical de la edificación, a manera de núcleo central.



*Ilustración 22: Planta de arquitectura del piso 28 (típico) del One Wilson Square (Federal Land Properties, 2018).*

### 3.4 CONSIDERACIONES PARA ADOPTAR EN LA INVESTIGACIÓN

Luego de haber presentado los diferentes sistemas de outriggers, el modelo a elegir para hacer el análisis será el sistema convencional. Esta elección se basa en dos criterios: en primer lugar, este modelo permite comprender mejor el funcionamiento de los outriggers, al conectar de forma directa un núcleo central con las columnas o muros perimetrales de la estructura, lo cual simplifica la comprensión de los resultados obtenidos y permite hacer una comparación más clara. En segundo lugar, la estructuración a realizar contará con un núcleo central y columnas ubicadas de forma radial en el perímetro del edificio. Además, se emplearán outriggers de concreto armado para la comparación, dado que este es el material constituyente de la estructura a analizar y, en general, la gran mayoría de edificaciones de vivienda en la ciudad de Lima están estructuradas a base de este material.

El edificio para tomar como caso de estudio fue el One Wilson Square. Se harán algunas simplificaciones en su geometría y estructuración para la comparación a realizar. Como punto inicial, se considerará una edificación de 40 niveles, lo cual permitirá iterar con la posición de los outriggers cada 5 niveles. Además, la arquitectura es típica en todos los niveles, así como la geometría de la planta. Esto quiere decir que no se incluirán los estacionamientos y locales comerciales de los primeros 7 niveles de la estructura.

Con respecto al análisis a realizar, se llevará a cabo un análisis dinámico modal-espectral según lo especificado por la norma E.030, a partir del cual se podrán obtener las fuerzas y desplazamientos en las estructuras, para cada iteración. Para el modelo inicial, además, se realizará un análisis estático para comparar los resultados obtenidos con el dinámico, así como un análisis por cargas de viento empleando la norma E.020. De manera similar a las investigaciones estudiadas en el acápite 3.1, se empleará el software Etabs para la presente investigación.

En cuanto a las disposiciones de los outriggers, se utilizarán elementos cuya altura sea igual a la de un entrepiso del edificio, dado que, como mostraron Suresh et al. (2017), con esta configuración se obtienen las menores derivas. Respecto a las iteraciones, se realizará un proceso similar a lo desarrollado por Krunal et al. (2015). Sin embargo, en este caso las iteraciones se realizarán cada 5 pisos.

## 4 ESTRUCTURACIÓN Y PREDIMENSIONAMIENTO

La estructuración es la actividad en la cual se busca identificar <sup>34</sup> la ubicación y definir los diferentes elementos estructurales teniendo como base los planos de arquitectura, como, por ejemplo: vigas, columnas, muros, etc. Además, con formulaciones empíricas se obtienen dimensiones aproximadas para así elaborar un modelo, el cual será analizado con el software.

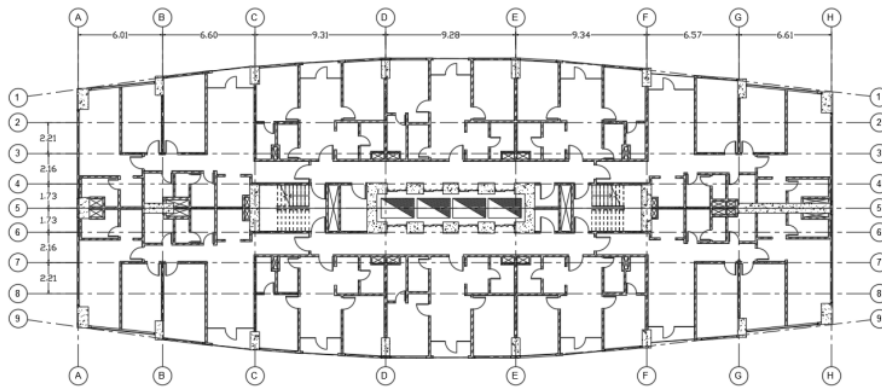
### 4.1 CRITERIOS DE REGULARIDAD Y SIMETRÍA

Según lo recomendado por el Ing. Antonio Blanco (1997), es necesario que la estructura cumpla con los siguientes criterios para lograr una resistencia adecuada ante cargas laterales:

- Simplicidad y simetría: Mejor comportamiento durante eventos telúricos y facilidad en la predicción de resultados.
- Resistencia y ductilidad: Capacidad para resistir cargas laterales. Dado que los sismos son eventuales, <sup>20</sup> se le confiere a la estructura una resistencia inferior a la necesaria, por lo que el saldo se debe complementar con una ductilidad adecuada.
- Hiperestaticidad y monolitismo: Disposición que permite proporcionar mayor rigidez y proporciona la capacidad de generar rótulas plásticas para facilidad en la disipación de energía.
- <sup>1</sup> Uniformidad y continuidad de la estructura: La estructura debe mantener su continuidad tanto en planta como en elevación para minimizar los daños colaterales por redistribución de esfuerzos
- Rigidez lateral: Contribuye a reducir las deformaciones laterales en caso de eventos sísmicos.
- Diafragma rígido: Permite idealizar <sup>19</sup> la estructura como una unidad, donde las fuerzas laterales se pueden distribuir en columnas y muros de acuerdo con su rigidez lateral.
- Influencia de elementos no estructurales: Debe considerarse su efecto en el análisis, pues pueden modificar el comportamiento de la estructura.

### 4.2 ESTRUCTURACIÓN

La estructuración del proyecto se realizó tomando en cuenta la arquitectura adaptada de la planta típica del One Wilson Square (Federal Land Properties, 2018). La Ilustración 23 muestra el plano mencionado.

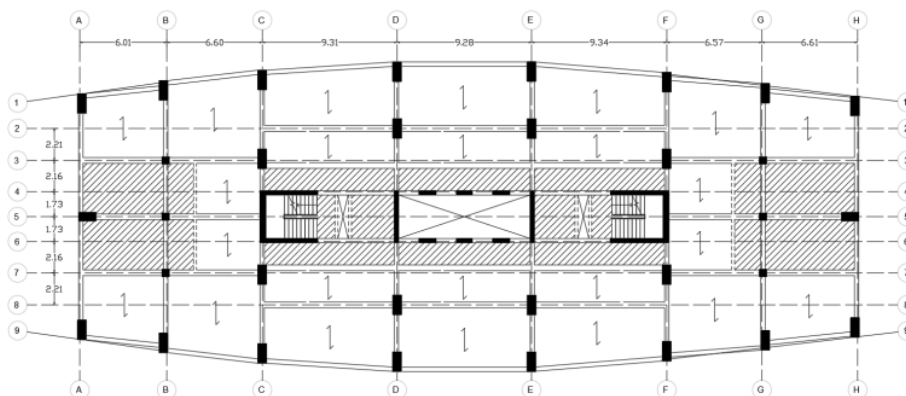


*Ilustración 23: Planta típica de adaptación del One Wilson Square*

Bajo los criterios previamente establecidos se optó por mantener un equilibrio entre los elementos verticales en planta. Se dispuso de muros de concreto en la parte central de la planta, a manera de núcleo central de la estructura y como caja para ascensores, y pares de muros en las direcciones de análisis para aumentar su rigidez en cada una de estas.

Lo característico de esta estructura se encuentra en su simetría en las dos dimensiones de análisis, como se mostró en la Ilustración 23. Además, al ser un edificio diseñado para vivienda, la ubicación de vigas es acorde con la distribución de tabiques del edificio, evitando interferir con los ambientes de los departamentos. En el caso de los diafragmas, se optó por una combinación de losas macizas y aligeradas, las cuales se ubicarán dependiendo de necesidades estructurales y arquitectónicas, como el paso de instalaciones en ambientes de baño.

La Ilustración 24 presenta el plano de la estructuración realizada utilizada para el proyecto. En ella se puede distinguir la ubicación de columnas, muros, vigas y losas según lo mencionado en los párrafos previos.



*Ilustración 24: Vista en planta plano de estructuración usado para el One Wilson Square*

### 4.3 DEFINICIÓN DE CARGAS

Se utilizó la Norma E.020 (Ministerio de Vivienda, 2006) para la asignación de cargas de gravedad y de viento, las cuales se presentan a continuación:

#### 4.3.1 Cargas de gravedad

Estas cargas se dividen en muerta y viva. En el caso de la primera, se considera el peso propio de la estructura y elementos no estructurales adosados a la misma, como la tabiquería. De esta manera, se ha considerado el peso específico del concreto armado en  $2.40 \text{ ton/m}^3$ , con el cual se determina el peso propio de columnas, vigas, muros y losas macizas. Para las losas aligeradas, se considerará su peso en función del espesor que resulte del predimensionamiento.

Con respecto a la tabiquería, se consideró una carga uniformemente repartida en el área calculada tomando el peso específico de la arcilla hueca ( $1.35 \text{ ton/m}^3$ ), una altura promedio de 2.5 m, un espesor de 0.15 m y una longitud de tabiques por unidad de área de 0.30 o 0.50  $\text{m/m}^2$ . Con esto, se obtuvieron cargas de 0.15 y 0.25  $\text{ton/m}^2$ , que se asignaron según la densidad de tabiques en cada paño de losa.

En cuanto a la carga viva, la norma indica que, para edificios de vivienda, se considere una sobrecarga de 0.20  $\text{ton/m}^2$  incluyendo los pasillos y escaleras, por lo que se asigna esta carga al modelo. Para el techo, dado que se considera que no habrá circulación y no posee inclinación, se ha tomado como sobrecarga 0.10  $\text{ton/m}^2$ .

#### 4.3.2 Cargas de viento

Se realiza un análisis por cargas de viento dado que, al ser una edificación de altura considerable, este puede generar solicitaciones laterales importantes en la edificación, que incluso podrían compararse en magnitud a las generadas por el sismo. Para este análisis, se utilizó la ecuación 3 extraída de la norma E.020 para la presión del viento en  $\text{kg/m}^2$ :

$$P_h = 0.005 \cdot C \cdot V_h^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

Donde  $V_h$  es la velocidad del viento a la altura  $h$  en  $\text{km/h}$ , la cual se obtiene de la siguiente expresión:

$$V_h = V(h/10)^{0.22} \quad \dots\dots\dots (4)$$

En la ecuación 4,  $V$  es la velocidad del viento a 10 m de altura, que se obtiene del Anexo 2 de la norma. Dado que el edificio a analizar se ubicaría en Lima, entre los distritos de Lince y San

Isidro, el valor que se extrae del gráfico es 45 km/h. Sin embargo, la norma indica que no puede ser menor que 75 km/h, por lo que se emplea este valor.

Respecto al coeficiente  $C$ , este <sup>49</sup> es un factor de forma que depende de la geometría de la estructura a analizar. Para el presente caso de estudios, se consideran los valores para superficies verticales de edificios, por lo que los valores son de 0.8 para barlovento y 0.6 para sotavento (succión). Ambos efectos se combinan para cada dirección de análisis, con lo que se obtiene la presión total de viento debido a efectos de empuje y succión.

Para el análisis, se ha considerado aplicar las presiones en la mitad de cada entrepiso, por lo que, multiplicado por el área lateral de los mismos, <sup>61</sup> se obtendría la fuerza resultante en cada nivel debido a efectos de viento. La Ilustración 25 <sup>61</sup> muestra la distribución de presiones en la altura del edificio, sumando los efectos de empuje y succión previamente mencionados.

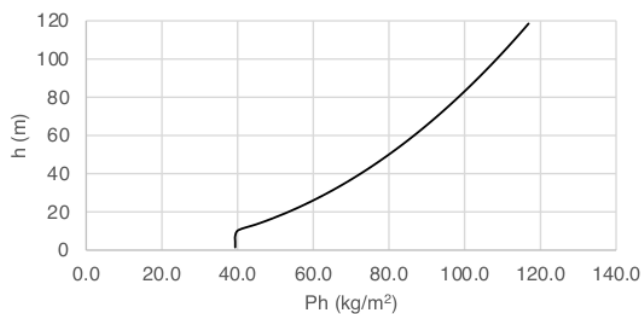


Ilustración 25: Distribución de presiones en el edificio, para efectos de empuje y succión.

Del gráfico, se puede observar <sup>19</sup> que la presión se mantiene constante e igual a aproximadamente 40 kg/m<sup>2</sup> hasta los 10 metros de altura. Luego, aumenta progresivamente con la altura de forma parabólica, hasta un valor máximo de aproximadamente 117 kg/m<sup>2</sup>.

## 4.4 PREDIMENSIONAMIENTO

### 4.4.1 Elementos Horizontales

Se empezará con el dimensionamiento de los elementos horizontales, necesario para poder dimensionar los elementos verticales con mayor precisión.

- **Vigas:**

Para estos elementos unidireccionales se predimensiona el peralte, siguiendo la recomendación del Ing. Blanco (1997) quien considera recomendable asignar un peralte

entre la décima parte y la doceava parte de la luz libre de la viga. Para cada viga, se elige el tramo de mayor longitud y se dimensiona el peralte bajo el criterio mencionado, el cual se aplica a toda la viga del eje para uniformizar. En el caso de las vigas largas, se asignan hasta dos peraltes diferentes, usando el par de tramos de mayor medida.

Respecto al ancho de las vigas, se coloca una dimensión mínima de 30 cm para garantizar una unión adecuada con las columnas.

A manera de ejemplo, se muestra el dimensionamiento de la viga del eje 1. Para el primer tramo de 9.5 m se aplica el criterio de dividir dicha cantidad entre 10 y 12. El resultado indica que el valor debería encontrarse entre los 79 y 95 cm; por ello, se elige un valor intermedio de 85 cm. Para el segundo tramo de 7 m se aplicó el mismo criterio y la medida elegida fue de 60 cm.

Además, para las vigas interiores, las que no se encuentran en el perímetro, y que superen un peralte de 80 cm serán consideradas como vigas post tensadas para aumentar la luz libre de entrepiso. En ese sentido, de cumplir esas condiciones deberán ser predimensionadas bajo la mitad de los criterios de una viga de concreto armado convencional (Asmat,2022).

Además, el peralte asignado a las vigas del núcleo de ascensores es 80 cm, a pesar de que por cálculo se obtenga un valor significativamente menor. Esto se debe a que dichos elementos funcionarán como vigas de acoplamiento de los muros, para que las placas alrededor del ascensor puedan trabajar en conjunto, por lo que requieren de un peralte considerable.

- **Losas:**

Los tipos de losas elegidas para nuestra adaptación del One Wilson Square serán aligeradas y macizas. Por un lado, para el caso de las losas aligeradas, se usarán los criterios de la Tabla 5.

Tabla 5: Criterio para predimensionamiento de losas aligeradas

Luz libre (m)	$L_n < 4$	$4 < L_n < 5.5$	$5 < L_n < 6.5$	$6 < L_n < 7.5$
Peralte (m)	0.17	0.2	0.25	0.3

A manera de ejemplo se realizará el predimensionamiento de la losa aligerada de los ejes 1-3 y ejes A-B. La losa de 5 m de longitud libre tendrá un espesor de 20cm según los criterios previamente mencionados en la Tabla 5.

Por otro lado, para el caso de losas macizas, estas secciones seguirán los criterios de análisis propuestos por Antonio Blanco (1997), los cuales indican que debemos calcular el perímetro de la losa maciza y dividirlo entre 180.

En este caso, el ejemplo se realizó en la losa entre eje 3-7 y ejes A-B. Para esta losa maciza, el espesor obtenido fue de 18 cm y se redondeó a 20 cm, este es el resultado de dividir el perímetro de 32 m entre 180.

Sin embargo, <sup>20</sup> para el caso de las losas macizas, estas se colocarán en las zonas de servicios higiénicos y por conceptos de instalación de tuberías se usará un espesor de 0.2 m capaz de contener dichos elementos.

#### 4.4.2 Elementos Verticales

- **Columnas:**

Elementos tratados como unidimensionales, los cuales serán dimensionados bajo el criterio de la columna más cargada. Dado que se le colocará una misma carga promedio a toda la planta típica, la columna que seleccionamos sería la de mayor área tributaria. En nuestro caso, la columna elegida se encuentra entre los ejes 3 y C. Esta cuenta con 31 metros cuadrados de área tributaria.

Para el dimensionamiento, se comienza con asumir unas dimensiones iniciales de 0.70 m x 0.70 m. Con ello se podrá calcular la carga que soportará todo el elemento. Este cálculo de las fuerzas se realiza y presenta <sup>2</sup> en la Tabla 6.

Tabla 6: Cuadro de cargas

Carga Muerta		
Descripción	Cantidad	Unidad
Peso Propio	3.53	ton
Piso Terminado	3.1	ton
Peso Losa Aligerada	4.62	ton
Peso Losa Maciza	7.49	ton
Peso Viga	4.38	ton
Peso Tabiquería	8.1	ton
<b>Total</b>	<b>31.22</b>	<b>ton</b>
Carga Viva		
Descripción	Cantidad	Unidad
Sobre carga	6.2	ton
<b>Total</b>	<b>6.2</b>	<b>ton</b>

Como resultado final por la acumulación de carga viva y muerta se obtiene 37.42 ton para un nivel. Al multiplicar el peso de un nivel por los 40 pisos del edificio resulta en 1496.8



ton para la columna más cargada. Al dividir el peso entre la el 45 % de  $f'c$  como lo indica el Ing. Blanco (1997). El área resultante necesaria es de 6652.44 cm<sup>2</sup>. Por motivos de seguridad y para mantener dimensiones múltiplos de 5, se elige una sección transversal de 120 cm x 60 cm. Esto nos ofrece una sección de 7200 cm<sup>2</sup> superior a los 6650 cm<sup>2</sup> necesarios.

Tras realizar los cálculos correspondientes se concluye que se emplearan tres secciones de columna de 60 x 120 cm, 50 x 110 cm y 70 x 70 cm, secciones que guardan proporción dependiendo del área tributaria de cada columna.

- **Muros:**

Según la norma ACI 318-14, el cálculo del espesor de las placas será regido por la longitud del elemento dividido entre 25, pero no menor a 0.15 m (ACI, 2015). Bajo este criterio el espesor de los muros debería ser mayor a 0.15 m. Sin embargo, asumiremos un espesor entre 30 y 40 cm para proporcionar mayor rigidez a la estructura, considerando que solo hay muros en la parte central de la estructura. Además, estos espesores permitirán un mejor comportamiento ante fuerzas de tracción y compresión en los muros debido al sismo.

## 5 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA SIN OUTRIGGERS

El siguiente capítulo presenta los resultados del análisis por cargas laterales del One Wilson Square sin la inclusión de outriggers. Se empezará por explicar los criterios de modelado que se tuvieron en cuenta, para continuar con la definición de espectros para el análisis dinámico. En lo que respecta al análisis, se comienza presentando los resultados por cargas de viento, empleando las presiones determinadas en el capítulo anterior. Se mostrarán las derivas y cortantes de entrepiso generadas por estas cargas. Luego, se realiza el análisis sísmico estático, que incluye la verificación del peso del edificio con relación al área, además de la distribución de cortantes en altura.

En tercer lugar, se mostrarán los resultados del análisis dinámico. Para esto, se empezará presentando una tabla con los modos de vibración de la estructura y su porcentaje de masa participativa, además de gráficas de los principales modos traslacionales de la misma. Luego, se presentarán los resultados de la verificación del valor del coeficiente de reducción de fuerzas sísmicas  $R$  definido en el capítulo anterior, y finalmente, se mostrarán los resultados de derivas y cortantes de entrepiso escalados.

### 5.1 MODELO COMPUTACIONAL DEL EDIFICIO

El modelo para el análisis de la edificación fue realizado en el software Etabs. A continuación, se detallan las consideraciones para cada tipo de elemento estructural, así como para el modelo en general.

Las columnas se modelaron como elementos tipo frame, con resistencia  $f'c=500 \text{ kg/cm}^2$  como se asumió en el predimensionamiento. Se asumió que la cimentación del edificio provee las restricciones al volteo y deslizamiento suficientes como para considerar a las columnas empotradas en la base.

Los muros fueron modelados como elementos shell, los cuales poseen 6 grados de libertad por nudo. Se consideró el tipo shell-thick, que toma en cuenta las deformaciones transversales por corte, las cuales son importantes cuando el espesor del elemento es entre un décimo y un quinto de su longitud (CSI, 2017, pág. 192), como en el caso de la estructuración realizada. La resistencia del concreto de estos elementos es  $f'c=500 \text{ kg/cm}^2$ , al igual que en las columnas.

Con respecto a las vigas, se emplearon elementos frame cuyas dimensiones corresponden a las determinadas en el predimensionamiento. Se asignó un concreto de resistencia  $f'c=280 \text{ kg/cm}^2$  para estos elementos. En cuanto a las losas, estas se modelaron como elementos tipo membrane,

los cuales solo tienen tres grados de libertad por nudo (traslacionales) y rigidez únicamente en su plano (CSI, 2016). Debido a esto, solo permiten la transmisión de cargas de gravedad a los elementos adyacentes, sin contribuir a la rigidez de la estructura. Dependiendo del tipo de losa (aligerada o maciza), se consideró la distribución de cargas en una o dos direcciones.

Por otro lado, se asignaron diafragmas semirrígidos a cada piso del edificio. Esto se debe a que no se recomienda el uso de diafragmas rígidos al hacer el modelo analítico de los outriggers, puesto que puede rigidizar artificialmente el sistema y reportar fuerzas erróneas en el outrigger (Choi et al, 2012).

La Ilustración 26 muestra una vista 3D del modelo realizado:

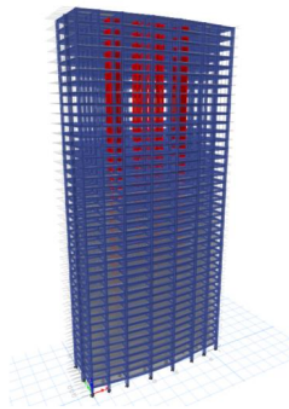


Ilustración 26: Vista 3D del modelo realizado en ETABS

### 5.1.1 Definición del Espectro del Sismo

La ecuación 5 define el espectro de pseudo aceleraciones como indica la norma E.030, empleando la siguiente expresión:

$$S_a = \frac{ZUCS}{R} \cdot g \dots\dots\dots (5)$$

Donde Z es el factor de zona, U es el de uso, C es el coeficiente de amplificación sísmica, S es el factor de suelo y R el coeficiente de reducción de fuerza sísmica. A continuación, se detalla cada uno de estos valores.

El factor Z depende de la ubicación del edificio. Dado que este estaría situado en la ciudad de Lima, que corresponde a la zona 4, el valor de Z que se toma es 0.45. Además, como es un edificio de viviendas, el factor de uso U correspondiente es 1.0. Con respecto al factor de suelo S, se considera que el terreno sobre el que se ubicaría el edificio corresponde a la grava de Lima, un

suelo muy rígido, que se clasifica como un perfil tipo S1. Para la zona 4 y dicho perfil de suelo, el valor correspondiente para el coeficiente S es 1.00.

El valor del coeficiente C depende de los periodos asociados a los modos de vibración de la estructura, dependiendo de la zona del espectro en que se encuentren. Para ello, es necesario definir los periodos  $T_p$  y  $T_L$ , que corresponden al periodo en que se define la plataforma del coeficiente C, y el inicio de la zona espectral de desplazamiento constante, respectivamente. Para un perfil de suelo S1, estos valores son 0.4 y 2.5 segundos, respectivamente.

El valor del coeficiente R será diferente para cada dirección de análisis, y se determina mediante la ecuación 6:

$$R = R_0 \cdot I_a \cdot I_p \dots\dots\dots (6)$$

Donde  $R_0$  es el coeficiente básico de reducción de fuerzas sísmicas, y su valor depende del sistema estructural sismorresistente en cada dirección de análisis. Se ha determinado que, para las direcciones X y Y, los sistemas estructurales correspondientes son de muros y dual, respectivamente, por lo que los valores de  $R_0$  para cada una de estas direcciones son 6 y 7. La verificación del tipo de sistema estructural se hace empleando el cortante basal; estos resultados se presentarán en el acápite de análisis dinámico de la estructura sin outriggers

Además,  $I_a$  e  $I_p$  son los factores de irregularidad en altura y planta. Se ha podido determinar que la estructura presenta no presenta ningún tipo de irregularidad en planta o altura, por lo que el valor de ambos factores es 1.00.

Reemplazando estos valores en la ecuación (6), se obtiene que, para la dirección X, el valor del coeficiente R es 6 mientras que, para la dirección Y, el coeficiente es igual a 7. Dado que se tiene dos valores de R, el espectro de pseudo aceleraciones para cada dirección será diferente. La Ilustración 27 presenta estos espectros.

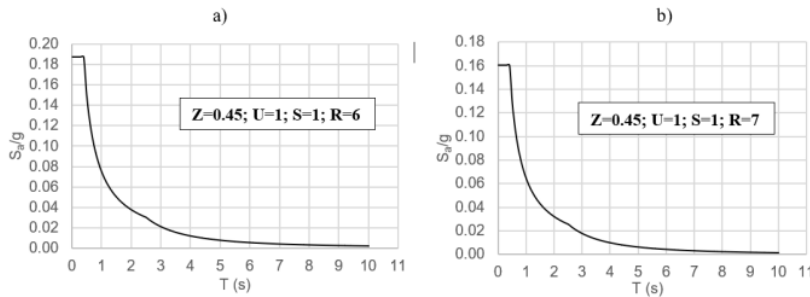


Ilustración 27: Espectro de pseudo aceleraciones para la dirección X (a) e Y (b)

Nótese que el espectro para la dirección X presenta mayores aceleraciones asociadas a cada periodo en comparación al espectro para Y, lo cual se debe a la elección de un menor coeficiente de reducción de fuerza sísmica en el primer caso, debido al sistema estructural de muros. Para dicha dirección, el valor máximo que podría tomar la pseudo aceleración, correspondiente a los modos con periodos menores a 0.4 segundos, es 0.188g, mientras que para la dirección Y, el valor respectivo es 0.161g.

## 5.2 ANÁLISIS POR VIENTO

El siguiente gráfico muestra la distribución de fuerzas cortantes en altura producto de las cargas laterales de viento, para cada una de las direcciones de análisis:

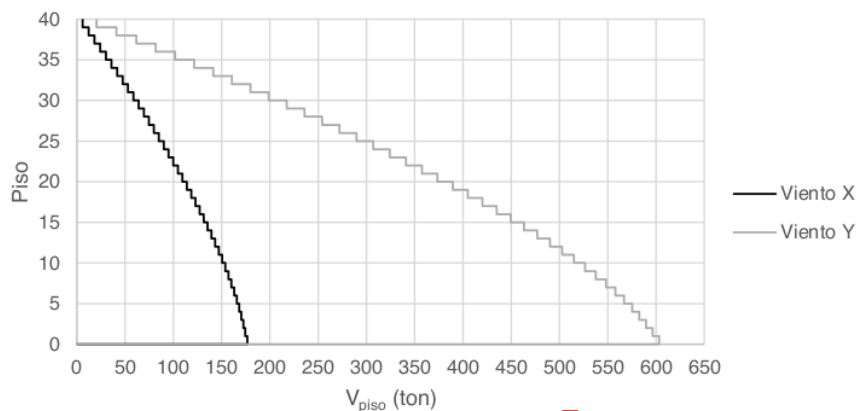


Ilustración 28: Distribución de fuerza cortante en altura debido al viento, para ambas direcciones de análisis

De la Ilustración 28, se puede observar claramente que la fuerza cortante en la dirección Y es significativamente mayor a la dirección X. El cortante basal en X es 176.60 ton, mientras que, en la dirección perpendicular, es 603.21 ton, lo cual es aproximadamente 3.4 veces mayor que en la dirección X. Esto se debe a que la superficie sobre la que actúa el viento en Y es más grande que la correspondiente a la dirección perpendicular, debido a la geometría del edificio. Por otro lado, puede notarse que las mayores fuerzas de entrepiso se dan en los pisos superiores, y van disminuyendo progresivamente hacia los pisos inferiores. Esto guarda relación con lo presentado en la Ilustración 25, pues la presión del viento va aumentando con la altura.

A continuación, se muestra un gráfico con las derivas de entrepiso producto de las cargas de viento, para ambas direcciones de análisis:

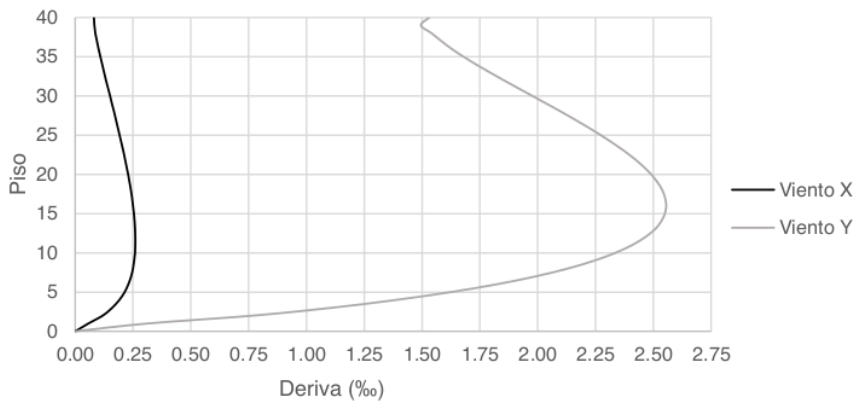


Ilustración 29: Distribución de derivas en altura producto a cargas de viento, para ambas direcciones de análisis

De la Ilustración 29, se observa que la derivación de entrepiso va incrementando hasta llegar a un máximo aproximadamente en el primer tercio de la altura total del edificio, a partir de lo cual empieza a disminuir. Para la dirección X, el valor máximo de la derivación es 0.26 ‰, y se da en el piso 12. En la dirección perpendicular, el máximo se da en el piso 16 y tiene un valor de 2.56 ‰. Se evidencia claramente que las distorsiones de entrepiso son mayores para la dirección Y. Esto puede deberse no solo al hecho de que las fuerzas en la dirección Y sean mayores que en X, sino también a que la rigidez lateral de la estructura en Y sea menor que en la dirección perpendicular. Más adelante, cuando se realice el análisis sísmico, podrá verificarse esto.

### 5.3 ANÁLISIS SÍSMICO ESTÁTICO

#### 5.3.1 Cálculo de Peso por Unidad de Área

Previo a la realización de este análisis, se procede a calcular el peso de la estructura por unidad de área, lo cual permitirá garantizar que los resultados del análisis sísmico sean adecuados. Si el peso de la estructura que se obtiene del modelo computacional resulta ser muy alto o bajo con respecto al valor estándar para una edificación de uso común ( $0.90 \leq P/A \leq 1.2$ ), puede haber problemas con el modelo que induzcan a un análisis sísmico erróneo.

El peso total de la estructura, calculado como la suma de carga muerta y viva, es igual a 47815.63 ton. Esto se obtiene del software ETABS, y se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 7: Peso total de la estructura bajo cargas de servicio

Nivel	Tipo de carga	P (ton)
Piso 1	Muerta	39915.32
Piso 1	Viva	7900.31
Piso 1	Servicio	47815.63

El área por piso es aproximadamente 1055 m<sup>2</sup>. Considerando los 40 pisos de la estructura, se obtiene:

$$P / A = \frac{47815.63 \text{ ton}}{40 \times 1055 \text{ m}^2} = 1.13 \text{ ton/m}^2$$

Este valor está dentro de lo aceptable para un edificio de viviendas, por lo que se puede afirmar que la asignación de cargas de gravedad al modelo es adecuada.

### 5.3.2 Determinación de la Fuerza Cortante Estática

La fuerza cortante basal se determina empleando la siguiente ecuación de la norma E.030

$$V = \frac{ZUCS}{R} \cdot P \dots\dots\dots (7)$$

Los parámetros  $Z$ ,  $U$ ,  $S$  y  $R$  fueron definidos en el capítulo anterior. Con respecto al coeficiente de amplificación sísmica, para determinar su valor se debe determinar el periodo del modo fundamental de vibración en cada dirección de análisis. Esto se obtiene del análisis modal de la estructura, que se presentará en la siguiente sección. Sin embargo, se emplean estos valores para el análisis estático. Los periodos de los modos fundamentales en cada dirección son 3.763 segundos para la dirección X y 6.614 segundos para la dirección Y.

Dado que los periodos son mayores que  $T_L$  para ambas direcciones, el valor de  $C$  se obtiene con la siguiente expresión de la norma:

$$C = 2.5 \cdot \left( \frac{T_P \cdot T_L}{T^2} \right) \dots\dots\dots (8)$$

Se obtiene que los coeficientes a utilizar son  $C_x = 0.1768$  y  $C_y = 0.0536$ . Sin embargo, la norma indica que el cociente  $C/R$  no debe ser menor a 0.11. Considerando los valores previamente calculados para los coeficientes de reducción de fuerza sísmica, es decir,  $R_x = 6$  y  $R_y = 7$ , se

determina que este cociente es menor al valor indicado para ambos casos, por lo que se utiliza dicho valor. El hecho de considerar este C/R mínimo responde a poder considerar una fuerza sísmica equivalente al 5% del peso sísmico, el cual es un valor común de diseño para edificios en la zona 4 y suelo tipo 1.

Respecto a  $P$ , corresponde al **peso sísmico de la estructura**, compuesto por **la suma de carga muerta** y una fracción de la carga viva, que corresponde al 25% para una edificación de categoría C, que corresponde a edificaciones de vivienda. El valor asciende a 41890.4 ton para una carga muerta de 39915.3 ton y una carga viva de 7900.3 ton.

Dado que todos los coeficientes son iguales para ambas direcciones de análisis (debido al hecho de usar el cociente C/R mínimo especificado por la norma), el valor de **la fuerza cortante basal** será el mismo para X e Y. Así, resolviendo la ecuación 7, se calcula que el valor es de 2073.6 ton. Aproximadamente el 5% del peso sísmico de la estructura corresponde a **la fuerza sísmica** que se aplica a la estructura.

### 5.3.3 Distribución de Cortante Estático en Altura

Para obtener **la distribución de fuerzas sísmicas en la altura** del edificio, se utilizan **las siguientes expresiones de la norma**:

$$F_i = \alpha_i \cdot V \dots\dots\dots (9)$$

$$\alpha_i = \frac{P_i(h_i)^k}{\sum_{j=1}^n P_j(h_j)^k} \dots\dots\dots (10)$$

Donde  $F_i$  corresponde a **la fuerza sísmica en el piso  $i$** ,  $P_i$  es el **peso sísmico del nivel  $i$** ,  $h_i$  es la **altura a la que se encuentra dicho nivel** y  $n$  es el **número de pisos de la estructura**. El factor  $k$  depende del **periodo de vibración fundamental para la dirección de análisis**. Como en este caso los periodos son mayores a 0.5 segundos, se emplea  $k = (0.75 + 0.5T) \leq 2.0$ . Se determina que **el valor de  $k$  para ambas direcciones de análisis es 2.0**.

La Tabla 8 muestran el cálculo de la fuerza sísmica **en cada piso de la estructura**. Los pesos de **cada nivel** se extrajeron del modelo en Etabs.



Tabla 8: Cálculo de fuerzas sísmicas por piso, para los niveles 1 a 40

Piso	P <sub>i</sub> (ton)	h <sub>i</sub> (m)	h <sub>i</sub> <sup>k</sup> (m)	P <sub>i</sub> .h <sub>i</sub> <sup>k</sup>	F (ton)
1	1050.418	3	9	9.454E+03	0.09
2	1050.418	6	36	3.782E+04	0.38
3	1050.418	9	81	8.508E+04	0.85
4	1050.418	12	144	1.513E+05	1.51
5	1050.418	15	225	2.363E+05	2.36
6	1050.418	18	324	3.403E+05	3.40
7	1050.418	21	441	4.632E+05	4.63
8	1050.418	24	576	6.050E+05	6.05
9	1050.418	27	729	7.658E+05	7.65
10	1050.418	30	900	9.454E+05	9.45
11	1050.418	33	1089	1.144E+06	11.43
12	1050.418	36	1296	1.361E+06	13.61
13	1050.418	39	1521	1.598E+06	15.97
14	1050.418	42	1764	1.853E+06	18.52
15	1050.418	45	2025	2.127E+06	21.26
16	1050.418	48	2304	2.420E+06	24.19
17	1050.418	51	2601	2.732E+06	27.30
18	1050.418	54	2916	3.063E+06	30.61
19	1050.418	57	3249	3.413E+06	34.11
20	1050.418	60	3600	3.782E+06	37.79
21	1050.418	63	3969	4.169E+06	41.67
22	1050.418	66	4356	4.576E+06	45.73
23	1050.418	69	4761	5.001E+06	49.98
24	1050.418	72	5184	5.445E+06	54.42
25	1050.418	75	5625	5.909E+06	59.05
26	1050.418	78	6084	6.391E+06	63.87
27	1050.418	81	6561	6.892E+06	68.88
28	1050.418	84	7056	7.412E+06	74.07
29	1050.418	87	7569	7.951E+06	79.46
30	1050.418	90	8100	8.508E+06	85.03
31	1050.418	93	8649	9.085E+06	90.79
32	1050.418	96	9216	9.681E+06	96.75
33	1050.418	99	9801	1.030E+07	102.89
34	1050.418	102	10404	1.093E+07	109.22
35	1050.418	105	11025	1.158E+07	115.74
36	1050.418	108	11664	1.225E+07	122.45
37	1050.418	111	12321	1.294E+07	129.34
38	1050.418	114	12996	1.365E+07	136.43
39	1050.418	117	13689	1.438E+07	143.70
40	924.100	120	14400	1.331E+07	132.99
			Σ	<b>2.075E+08</b>	

Con estos valores, se puede elaborar un diagrama de fuerzas cortantes debido a cargas de sismo estático, para ambas direcciones de análisis. Este diagrama se muestra en la Ilustración 30:

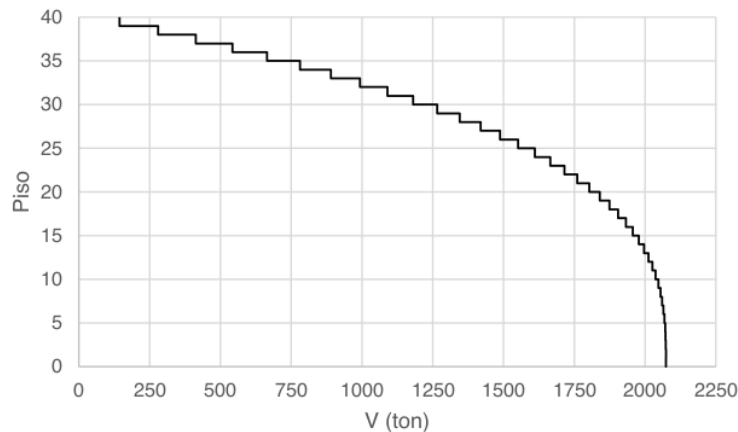


Ilustración 30: Distribución de fuerza cortante en altura debido a cargas de sismo – análisis estático, para ambas direcciones de análisis

Analizando la Tabla 8, así como observando la Ilustración 30, puede notarse que las fuerzas sísmicas van aumentando con la altura de forma cuadrática, debido al exponente  $k$  que se utilizó en la ecuación 10. Se observa también que las fuerzas sísmicas en los primeros niveles son muy pequeñas en comparación a los últimos niveles.

El valor del cortante basal hallado en este acápite servirá <sup>80</sup> para escalar los resultados del análisis dinámico, que se presenta en el inciso siguiente.

## 5.4 ANÁLISIS SÍSMICO DINÁMICO MODAL ESPECTRAL

Este acápite empezará con la realización <sup>3</sup> del análisis modal de la estructura. Se prosigue con la verificación de los valores de los coeficientes de reducción sísmica asumidos. Posteriormente, se determina <sup>1</sup> la distribución de fuerzas cortantes en altura y las derivas inelásticas <sup>1</sup> de la estructura.

### 5.4.1 Análisis Modal

Se empieza realizando <sup>1</sup> un análisis modal de la estructura, para determinar los principales modos de vibración y su porcentaje de masa participativa en la dirección X, Y, y giro alrededor del eje Z ( $\theta$ ). Si bien es cierto se debe considerar tres modos por piso, <sup>1</sup> asociados a cada grado de libertad (dos traslacionales y uno rotacional), se han considerado inicialmente 20 modos para el análisis, los cuales deben sumar por lo menos <sup>1</sup> 90% de masa participativa en cada dirección de análisis.

1  
 Tabla 9: Modos de vibración de la estructura

Modo	T (s)	% Masa participativa X	% Masa participativa Y	% Masa participativa $\theta$
1	6.614	0.00	70.45	0.00
2	5.375	0.00	0.00	74.43
3	3.763	74.91	0.00	0.00
4	1.726	0.00	13.69	0.00
5	1.575	0.00	0.00	11.03
6	1.138	11.17	0.00	0.00
7	0.816	0.00	0.33	4.25
8	0.809	0.00	4.87	0.29
9	0.603	4.35	0.00	0.00
10	0.51	0.00	0.01	2.60
11	0.482	0.00	2.87	0.01
12	0.388	2.41	0.00	0.00
13	0.353	0.00	0.00	1.68
14	0.324	0.00	1.80	0.00
15	0.274	1.54	0.00	0.00
16	0.262	0.00	0.00	1.16
17	0.236	0.00	1.22	0.00
18	0.206	0.01	0.00	0.82
19	0.206	1.07	0.00	0.01
20	0.182	0.00	0.87	0.00
		<b>95.46</b>	<b>96.12</b>	<b>96.29</b>

De la Tabla 9, analizando los tres primeros modos de vibración, se observa que el primero es traslacional asociado a la dirección Y, el segundo, rotacional y el tercero es traslacional en X. Además, sus masas participativas en cada dirección son superiores al 70%, lo cual significa que la respuesta de la estructura estará dominada principalmente por estos tres modos.

En particular, el segundo modo de vibrar, al ser rotacional, indica que la estructura podría ser susceptible a rotar siempre que haya una demanda torsional en la edificación. Esta tendencia a rotar está relacionada a la geometría de nuestro estudio, en específico a la proporción de 3 a 1 entre las dimensiones en planta de la edificación, ya que al añadir una excentricidad accidental en el diseño se genera una condición en el cual la estructura es más propensa a rotar que a desplazarse linealmente. En la investigación de Chao He y Qifeng Luo (2013), se obtuvo que, para edificios superiores a los 400 m de altura, los desplazamientos totales del edificio se componían por la suma de los desplazamientos traslacionales y torsionales. Mientras que, para edificios cercanos a los 160 m, como es el caso de nuestro estudio, los desplazamientos totales del edificio son prácticamente idénticos a los que se producen cuando solo se aplican cargas traslaciones.

Respecto a los periodos, puede afirmarse que, en particular, para el primero modo, el valor obtenido es alto en comparación con el periodo asociado al modo fundamental en la dirección perpendicular. Esto indica que la estructura es más rígida en X que en Y, lo cual también se podrá corroborar al analizar las derivas laterales.

Por otra parte, se puede verificar que, con 20 modos, la suma de **masas participativas** supera el **90% de la masa total**, para cada dirección de análisis. Además, puede notarse que los últimos modos tienen baja participación en las direcciones de interés (1.07% y 0.87% en X e Y, respectivamente), por lo que no será necesario considerar más.

Las siguientes figuras muestran los desplazamientos de los centros de masa (deformadas) **de los** primeros **modos de vibración** para **cada dirección de** análisis. Se acompañan de elevaciones de pórticos del modelo ETABS: para las deformadas en X, se muestra una elevación del eje 7; para las deformadas en Y, del eje E

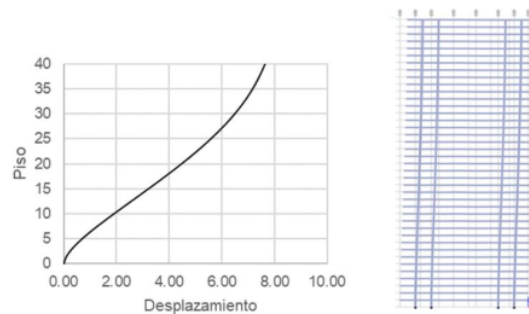


Ilustración 31: Deformada para el modo fundamental en X (modo 3)

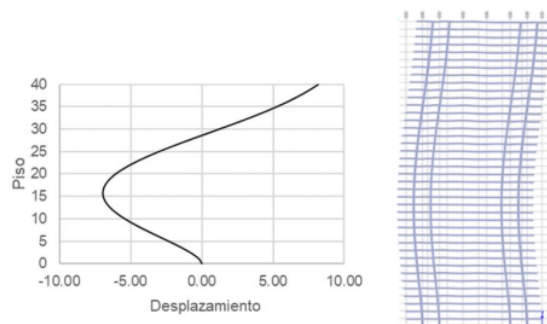


Ilustración 32: Deformada para el segundo modo en X (modo 6)

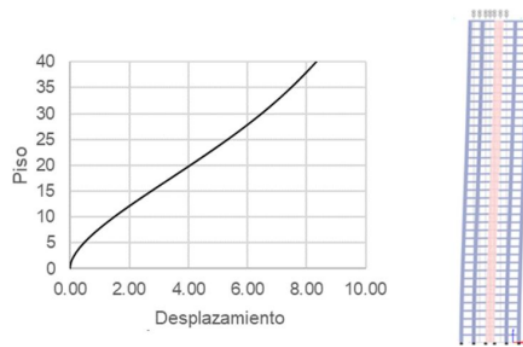


Ilustración 33: Deformada para el modo fundamental en Y (modo 1)

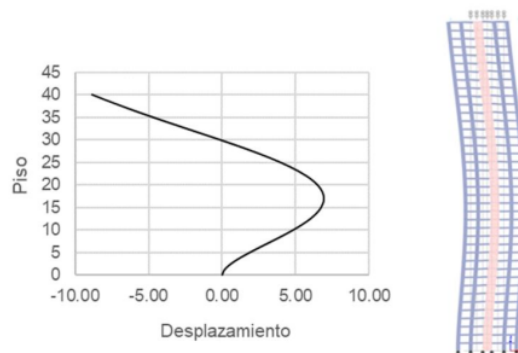


Ilustración 34: Deformada para el segundo modo en Y (modo 4)

La Ilustración 31 a 34 muestran las deformadas de los modos fundamentales en las direcciones de análisis. Se observa que estas son la combinación de la deformada de un edificio de pórticos con la de uno de muros, como se muestra en la Ilustración 35. Esto se debe a la presencia de ambos sistemas **estructurales en las dos direcciones**.

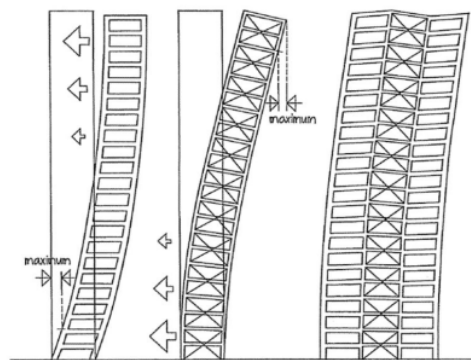


Ilustración 35: Deformadas de edificios de pórticos (izquierda), muros (centro) y sistema dual (derecha) (Engel, 2013, pág. 281)

### 5.4.2 Verificación de los valores de $R_0$ asumidos

Para que un sistema estructural sea clasificado como de muros, por lo menos el 70% de la fuerza cortante en la base debe ser tomada por estos elementos. Si, en cambio, los muros toman entre 20% y 70% del cortante, el sistema se clasifica como dual (Ministerio de Vivienda, 2018). Luego del análisis en el computador se obtiene un cortante dinámico basal en el eje X - Y de 644 ton y 331 ton respectivamente.

Observando los resultados, se concluye que, en la dirección X, el sistema se clasifica como de muros estructurales, ya que soportan 84% de la fuerza; mientras que, en Y, el sistema es dual, porque la cortante de los muros representa el 68%. Por lo tanto, los valores de  $R_0$  empleados para definir los espectros y en el análisis estático son correctos.

### 5.4.3 Factor de Escala

La norma E.030 indica que la fuerza cortante en la base obtenida del análisis dinámico no debe ser menor que el 80% de la que se obtuvo del análisis estático, para cada dirección de análisis. Si no se cumple esta condición, deberá escalarse las fuerzas de este análisis hasta satisfacer la condición. La Tabla 10 resume los valores de los cortantes obtenidos en ambos análisis, así como el factor de escala para cada dirección.

Tabla 10: Factores de escala para el análisis dinámico

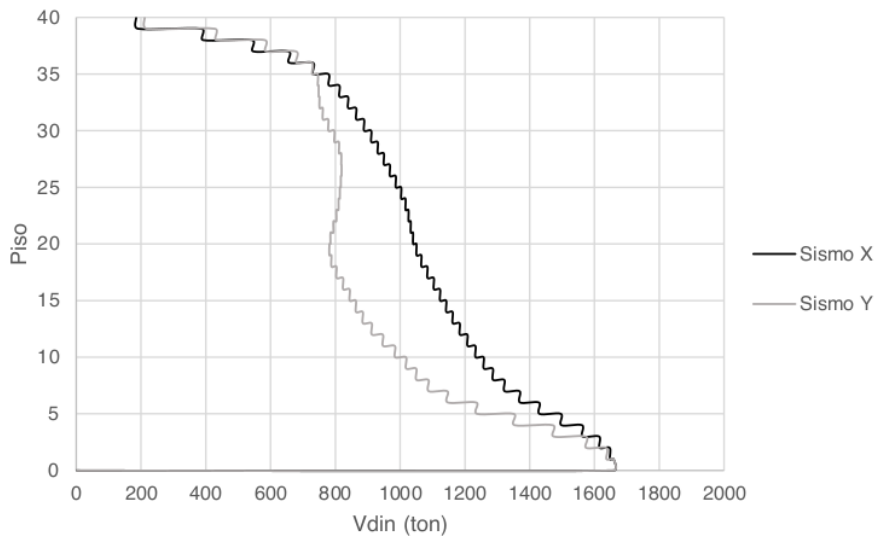
Dirección	Vest (ton)	Vdin (ton)	0.8Vest (ton)	Factor escala
X	2073.6	644.46	1658.88	2.574
Y	2073.6	331.1	1658.88	5.010

Se observa que las fuerzas cortantes dinámicas son significativamente más bajas que las estáticas, lo cual resulta en factores de escala altos. Esto se debe principalmente al hecho de haber empleado un factor C/R de 0.11 por exigencia de la norma en el análisis estático, lo cual incrementa el valor del este cortante en comparación con el que se obtendría usando los valores de C y R correspondientes.

En sí, se puede afirmar que la magnitud del cortante dinámico es baja debido a que la aceleración máxima que se produce en la estructura a causa del sismo, también lo es. Esto se debe a que los periodos traslacionales de los principales modos de vibración son altos, por lo que, al ingresar a los espectros previamente definidos, estos producen aceleraciones bajas en la estructura.

#### 9 5.4.4 Distribución de Cortante Dinámico en Altura

La siguiente figura muestra la distribución de fuerza cortante en altura, para cada dirección de análisis. Los valores fueron escalados con los factores previamente determinados.



9 Ilustración 36: Distribución de fuerza cortante en altura debido a cargas de sismo – análisis dinámico.

Como se puede observar en la Ilustración 36, la distribución es similar para ambas direcciones de análisis. En general, las fuerzas horizontales son mayores en los pisos superiores e inferiores que en la zona central. Incluso, se aprecia que en Y hay una inversión del signo de las fuerzas sísmicas entre los pisos 19 y 25. Esto se debe a la influencia de los modos superiores traslacionales, pues, de lo contrario, las gráficas serían similares a las obtenidas para el sismo estático.

#### 1 5.4.5 Cálculo de Desplazamientos Laterales y Derivas de Entrepiso

La Tabla 11 muestra los desplazamientos totales de cada nivel de la estructura, así como las distorsiones de entrepiso. Ambos se multiplican por 0.75R para obtener los valores máximos, correspondientes a un estado inelástico.

Tabla 11: Derivas y desplazamientos laterales generados por el análisis dinámico

Piso	Altura (m)	Deriva elástica (‰)	Deriva inelástica (‰)	Desplazamiento inelástico (cm)	Deriva elástica (‰)	Deriva inelástica (‰)	Desplazamiento inelástico (cm)
		X	X		Y	Y	
40	120	0.39	1.77	29.31	0.83	4.36	40.70
39	117	0.43	1.95	28.94	0.92	4.80	39.77
38	114	0.47	2.10	28.54	0.97	5.10	38.78
37	111	0.50	2.25	28.12	1.01	5.30	37.77
36	108	0.53	2.39	27.67	1.04	5.45	36.76
35	105	0.56	2.50	27.20	1.06	5.57	35.75
34	102	0.58	2.61	26.70	1.08	5.66	34.75
33	99	0.60	2.69	26.18	1.09	5.71	33.76
32	96	0.62	2.77	25.63	1.09	5.74	32.78
31	93	0.63	2.84	25.06	1.10	5.75	31.82
30	90	0.65	2.90	24.47	1.09	5.73	30.88
29	87	0.66	2.96	23.85	1.08	5.68	29.96
28	84	0.67	3.02	23.21	1.07	5.62	29.06
27	81	0.68	3.06	22.55	1.05	5.53	28.19
26	78	0.69	3.11	21.87	1.03	5.43	27.34
25	75	0.70	3.15	21.16	1.01	5.32	26.50
24	72	0.71	3.19	20.44	0.99	5.20	25.67
23	69	0.72	3.22	19.69	0.97	5.08	24.85
22	66	0.72	3.24	18.93	0.95	4.97	24.03
21	63	0.73	3.27	18.14	0.93	4.86	23.19
20	60	0.73	3.30	17.34	0.91	4.77	22.34
19	57	0.74	3.33	16.51	0.89	4.69	21.46
18	54	0.75	3.36	15.66	0.88	4.64	20.55
17	51	0.75	3.39	14.79	0.88	4.61	19.60
16	48	0.76	3.42	13.91	0.88	4.60	18.61
15	45	0.76	3.44	13.00	0.88	4.63	17.56
14	42	0.77	3.46	12.07	0.89	4.66	16.46
13	39	0.77	3.47	11.13	0.90	4.71	15.30
12	36	0.78	3.49	10.17	0.91	4.78	14.09



Piso	Altura (m)	Deriva elástica (‰)	Deriva inelástica (‰)	Desplazamiento inelástico (cm)	Deriva elástica (‰)	Deriva inelástica (‰)	Desplazamiento inelástico (cm)
		X	X		Y	Y	
11	33	0.78	3.49	9.20	0.92	4.83	12.82
10	30	0.77	3.48	8.21	0.93	4.87	11.51
9	27	0.77	3.46	7.22	0.93	4.89	10.15
8	24	0.76	3.42	6.22	0.93	4.87	8.77
7	21	0.75	3.35	5.22	0.91	4.79	7.37
6	18	0.72	3.24	4.23	0.88	4.63	5.98
5	15	0.68	3.07	3.27	0.83	4.37	4.62
4	12	0.62	2.81	2.35	0.76	3.99	3.32
3	9	0.53	2.40	1.51	0.65	3.43	2.13
2	6	0.40	1.81	0.80	0.49	2.57	1.11
1	3	0.19	0.87	0.26	0.21	1.12	0.34
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

La información presentada en la Tabla 11 se resume de forma gráfica en la Ilustración 37 e Ilustración 38:

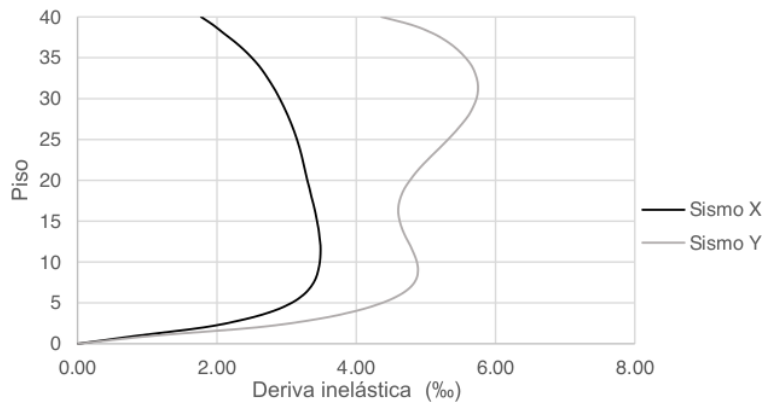


Ilustración 37: Distribución de derivas en altura debido al análisis dinámico

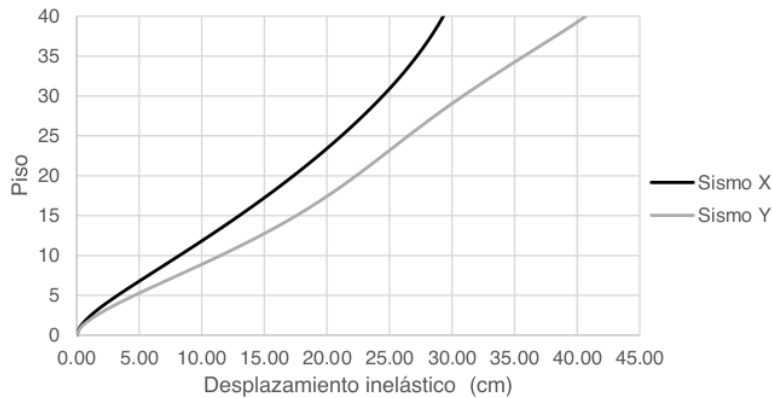


Ilustración 38: Desplazamientos máximos de piso debido al análisis dinámico

En primer lugar, observando los valores de derivas inelásticas presentados en la Tabla 11, se podría afirmar que la estructura está cumpliendo con los requisitos de rigidez de la norma E.030, pues la máxima deriva en la dirección X es 3.49% y en la dirección Y, 5.75%, siendo ambos menores a 7%, límite impuesto por la norma para estructuras de concreto armado. Estos valores, sin embargo, resultan relativamente bajos para una estructura de 120 metros de altura, y esto se debe a que, para su cálculo, se han usado las fuerzas sísmicas del análisis dinámico sin escalera. Otros códigos internacionales como el ASCE 7-16 (Art. 12.9.1.4.2) indican que las derivas deben escalarse de manera similar a las fuerzas sísmicas si es que el cortante dinámico no cumple con un determinado valor mínimo (ASCE, 2017). Sin embargo, esta no es una exigencia en la norma E.030, principalmente debido a que no está concebida para edificios altos. No obstante, se emplean estas derivas de manera referencial para comparar el efecto que tendría la inclusión de outriggers sobre estos valores.

Es también resaltante que, tanto las distorsiones laterales como los desplazamientos de piso, son mayores en la dirección Y que en X. Considerando que las fuerzas sísmicas en Y son menores que en la X (sin escalera), esto permite corroborar nuevamente que el edificio es más rígido en X que en la dirección perpendicular.

Por otro lado, se observa que los resultados de cortantes de entrepiso y derivas laterales del análisis dinámico son significativamente mayores a los obtenidos en el análisis por cargas de viento. Esto quiere decir que el efecto del sismo será más crítico para el diseño del edificio que el que produce el viento. Por tanto, no se considera necesario realizar este último análisis en las estructuras sin outriggers. La comparación se realizará teniendo en cuenta solamente los resultados del análisis sísmico dinámico para cada caso. Además, dado que la dirección Y es la más crítica (mayores derivas), se colocarán outriggers solamente en dicha dirección. Por lo tanto,

el análisis de la estructura con outriggers y la comparación se hará exclusivamente para los resultados del sismo en Y.

4  
A continuación, se presenta el diagrama de momento flector del núcleo central de la estructura (caja de ascensores) debido al sismo dinámico en Y. Los momentos extraídos del modelo se han escalado utilizando los factores determinados previamente.

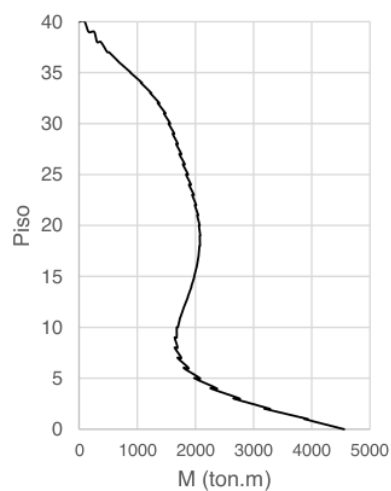


Ilustración 39: Diagrama de momento flector en X del núcleo central, debido al sismo en Y

Se observa en la Ilustración 39 que la distribución de momentos en altura guarda cierta semejanza con la forma de la distribución de derivas y fuerzas cortantes en Y. El momento en la base del núcleo es aproximadamente 4555 ton-m. Este valor se comparará con las iteraciones con outriggers, para analizar el efecto que tiene la inclusión de estos brazos rígidos sobre el mismo.

## 6 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA CON OUTRIGGERS

Este capítulo comprende <sup>1</sup> el análisis sísmico de la estructura considerando las iteraciones con outriggers. Se empezará comentando los criterios de modelación y ubicación de outriggers considerados para la investigación. Luego, se presentarán los resultados de las iteraciones, para lo cual se inicia mostrando el caso específico de la colocación de outriggers en el piso 25 de la estructura, a modo de ejemplo. Después, se procederá a iterar variando la posición de los outriggers cada 5 niveles. <sup>75</sup> Los resultados de estas iteraciones se presentarán en tablas y gráficos que resumirán la respuesta máxima (periodos, cortante basal, derivas y momento en el núcleo) de cada iteración. Se procederá de manera similar con dos y tres niveles con outriggers.

### 6.1 CRITERIOS DE MODELACIÓN Y ANÁLISIS

Para empezar, es necesario recordar que el análisis a realizar será el dinámico, que es el más representativo de la estructura. No se realizará el análisis estático pues se asume que el peso de la estructura permanecerá prácticamente invariable con la inclusión de los muros outrigger. Dado que el resto de los parámetros tampoco varía (teniendo en consideración que el periodo en cada caso seguirá siendo mayor a TL, por lo que el cociente C/R seguirá siendo 0.11), el cortante estático sería el mismo. Para cada iteración, se determinará el factor de escala correspondiente. Tampoco se realizará el análisis por viento pues en el capítulo anterior se determinó que los resultados en términos de fuerzas y derivas son menores que los del sismo dinámico, por lo que el diseño de la estructura no estaría regido por estas solicitaciones. Por otro lado, solo se presentarán los resultados del análisis en la dirección Y, pues se determinó previamente que esta es la dirección más crítica de la estructura que se está analizando.

Con respecto a los outriggers, se decidió emplear muros de 30 cm de ancho para mantener la uniformidad de espesores en planta. La ubicación de estos se muestra en la Ilustración 40.

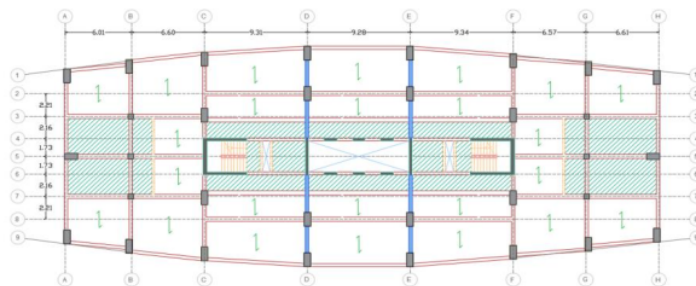


Ilustración 40: Encofrado para los niveles con outriggers, los cuales se muestran en color azul.

Se ha elegido esta disposición para los outriggers debido a que conectan de manera directa las columnas exteriores con el núcleo central del edificio. Los outriggers también conectan con las columnas en los ejes 2 y 8, las cuales aportarán al momento restaurador en el núcleo.

Es importante recalcar que los parámetros sísmicos, en particular <sup>1</sup> el coeficiente de reducción de fuerzas sísmicas  $R$ , no se verán afectados por los outriggers. Podría decirse que el tener un entrepiso más rígido conduce a <sup>11</sup> que la estructura presente la irregularidad de piso blando. Sin embargo, lo que busca la norma con este requisito es evitar que una estructura uniformemente rígida presente un piso blando que concentre las deformaciones. Los outriggers, en cambio, contribuyen a fortalecer de manera adicional una estructura con pisos de rigidez similar. Estos pisos permiten tener ductilidad entre los niveles con outriggers (Choi et al., 2012, pág. 41). Se observa entonces que el efecto del outrigger es opuesto al fenómeno de piso blando.

## 6.2 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA CON UN NIVEL OUTRIGGER

### 6.2.1 Outrigger en Piso 25

La Ilustración 41 presenta vistas del modelo en ETABS con la inclusión de un outrigger en el piso 25. A la izquierda, se muestra la elevación del eje E del edificio donde se aprecia este elemento. A la derecha, se puede observar un detalle 3D del mismo.

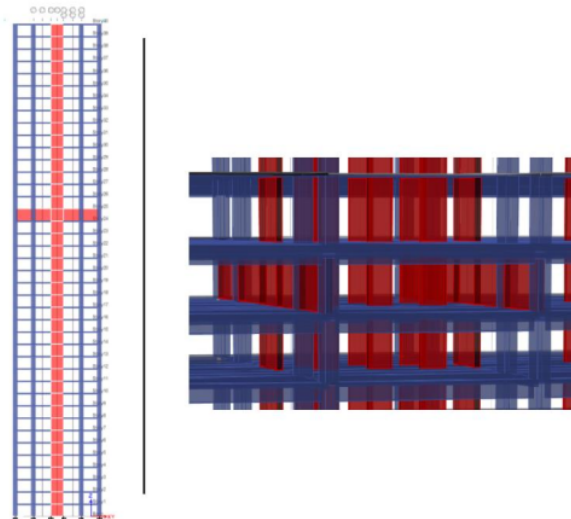


Ilustración 41: Elevación y detalle del modelo con outriggers en el piso 25

En primer lugar, se presentará la deformada de la estructura para el modo fundamental en la dirección Y.

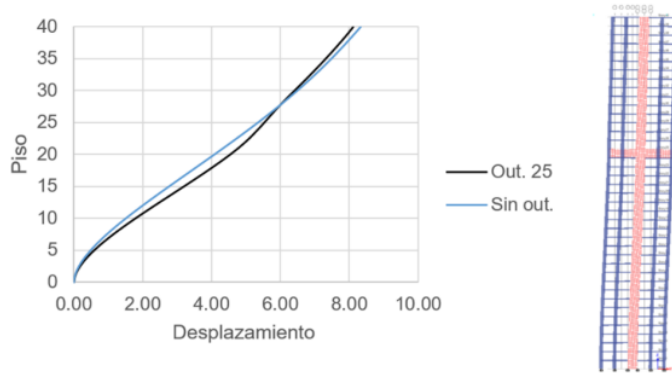


Ilustración 42: Deformada para el modo fundamental en Y - estructura con outriggers en piso 25

Se observa de la Ilustración 42 que la deformada es muy parecida a la presentada para el caso sin outriggers. Sin embargo, puede notarse el efecto del outrigger en el piso 25, a manera de un punto de inflexión que disminuye el desplazamiento total en los pisos superiores.

Con respecto a los periodos de la estructura debido a la inclusión de outriggers, se obtuvo que para la dirección X (modo 3), el periodo es 3.73 s, mientras que para la dirección perpendicular (modo 1), es 5.93 s. Se observa que hubo una reducción significativa (0.68 s) en la dirección Y, cuyo efecto se notará en las fuerzas y derivas de la nueva estructura.

A continuación, se muestra la distribución de cortante dinámico en altura, para la dirección de análisis. El factor de escala para este caso es de 5.08.

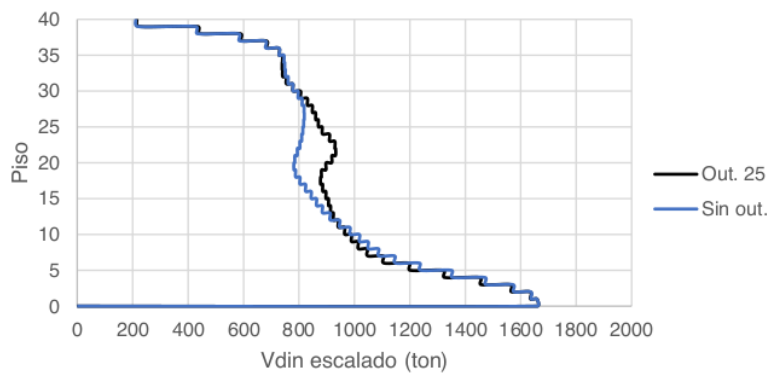


Ilustración 43: Distribución de fuerza cortante dinámica en altura para la dirección Y - estructura con outriggers en piso 25

La Ilustración 43 muestra una distribución muy similar a la presentada en el capítulo anterior, para la estructura sin outriggers. En este caso, no obstante, se aprecia un aumento de la fuerza lateral entre los pisos 20 y 30, seguido de una reducción entre los niveles 10 y 19. Este incremento puede explicarse debido al aumento de rigidez en los niveles adyacentes al outrigger. Es relevante mencionar que el cortante basal es el mismo en ambos casos dado que se ha escalado al 80% del cortante estático como indica la norma. Sin embargo, si no se realizara el escalamiento, se determina que hay una ligera reducción en el cortante basal en el caso de la estructura con outriggers.

Un comportamiento similar se observa en el diagrama de momento flector del núcleo central de la edificación, al cual se conectan los outriggers, como se muestra en el siguiente gráfico:

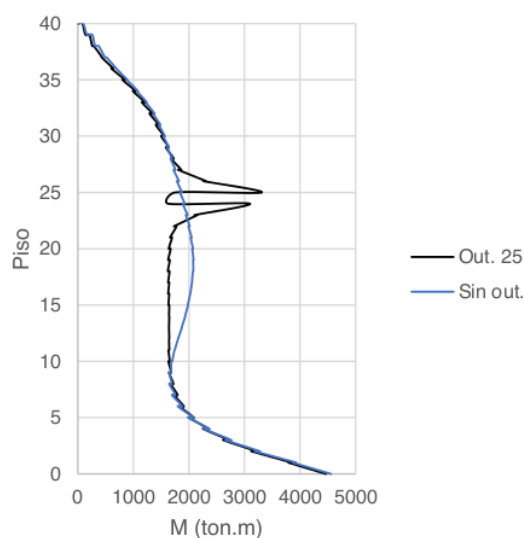


Ilustración 44: Diagrama de momento flector en X del núcleo central, debido al sismo en Y

Comparando el diagrama presentado en la Ilustración 44 con el mostrado en el capítulo anterior, se observa que hay un salto abrupto del valor del momento en el nivel del outrigger, que luego vuelve a estabilizarse y seguir la forma del diagrama de la estructura sin outriggers. Debe recordarse que el diagrama obtenido del análisis modal espectral solo muestra valores máximos en positivo, dado que se trata de una combinación de suma de cuadrados. Este aumento en el diagrama refleja la magnitud de los momentos en el núcleo en el nivel outrigger, debido los pares de fuerzas generados por la compresión y tracción de las columnas perimetrales. Además se puede explicar este aumento por el incremento de rigidez lateral mencionado anteriormente.

Por otro lado, el momento en la base es 4466 ton-m aproximadamente, lo cual representa una reducción del 2.0% con respecto a la estructura inicial. Si bien es cierto hubo una disminución

con la inclusión del outrigger, como sucede en el caso de la cortante basal de la estructura, esta es baja debido al incremento de las solicitaciones sísmicas producto de la disminución de los periodos.

En cuanto al análisis de derivas y desplazamientos para la dirección de comparación, los resultados se muestran en la Tabla 12. Se muestran los valores cada 5 pisos, la información completa de todos los niveles se mostrará de forma gráfica.

Tabla 12: Derivas y desplazamientos laterales en Y debido al análisis dinámico – estructura con outriggers en piso 25

Piso	Altura (m)	Deriva elástica (%)	Deriva inelástica (%)	Desplazamiento elástico (cm)	Desplazamiento inelástico (cm)
		Y	Y	Y	Y
40	120	0.75	3.91	7.70	40.42
35	105	0.95	4.99	6.87	36.06
30	90	0.94	4.95	6.04	31.69
25	75	0.78	4.09	5.30	27.81
20	60	0.90	4.73	4.48	23.51
15	45	0.93	4.90	3.42	17.96
10	30	0.95	4.97	2.18	11.46
5	15	0.82	4.31	0.86	4.52
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00

De manera gráfica, las derivas y desplazamientos inelásticos se muestran en la siguiente figura:

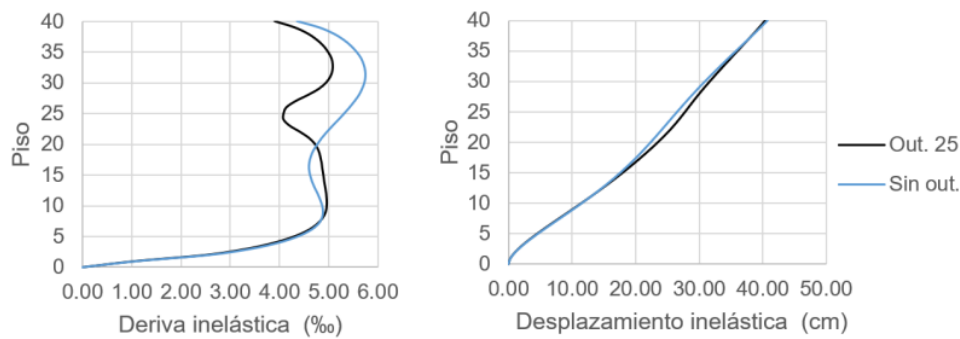


Ilustración 45: Distribución de derivas (izquierda) y desplazamientos (derecha) inelásticos debido al análisis dinámico en Y - estructura con outriggers en piso 25



Observando la Ilustración 45, se evidencia claramente el efecto de los outriggers en las derivas laterales. Si se compara con el análisis sin la incorporación de estos elementos, se aprecia que los outriggers logran uniformizar las distorsiones, aumentándolas ligeramente en los pisos inferiores y reduciéndolas en los superiores, con lo cual se consigue disminuir la deriva máxima a 5.09% en el piso 33, una reducción de aproximadamente 11.5%. En cuando a los desplazamientos laterales, por el mismo hecho de que las derivas se han uniformizado, estos permanecen prácticamente invariables, siendo el desplazamiento máximo en la azotea del edificio igual a 40.42 cm.

### 6.2.2 Iteraciones con un Nivel Outrigger

A continuación, se procederá con el resto de las iteraciones considerando solo un nivel con outriggers en la estructura. Para estos casos, se presentarán los resultados de forma resumida en tablas y gráficas mostrando los valores máximos para cada caso.

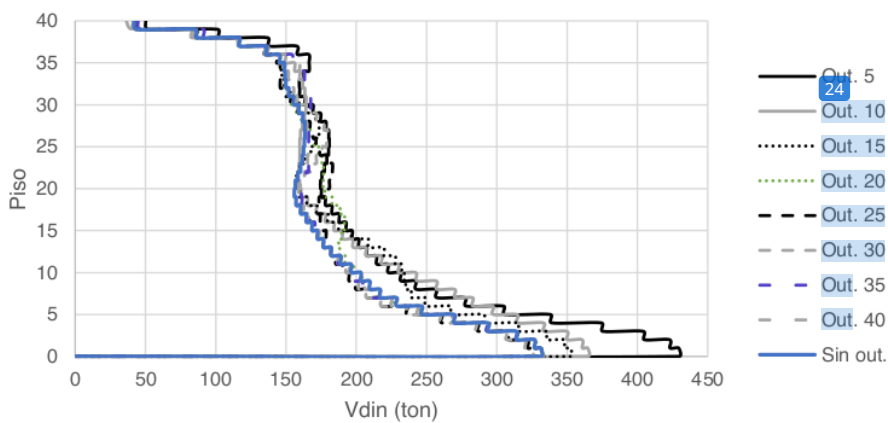
En primer lugar, se muestran los resultados de periodos, factor de escala y momento flector en el núcleo:

*Tabla 13: Iteraciones con un outrigger – periodos, cortante basal y momento en el núcleo*

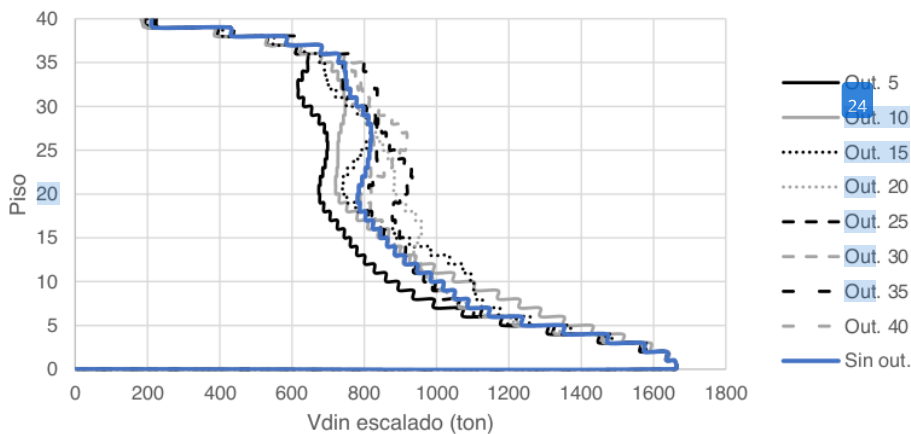
Posición outrigger	T <sub>y</sub> (s)	%Masa participativa en Y	Factor de escala	Mmáx en núcleo	
				M (ton.m)	Ubicación
5	6.15	67	3.86	3542	Piso 6
10	5.80	67	4.55	4142	Base
15	5.66	70	4.71	4460	Base
20	5.73	73	5.00	4520	Base
25	5.93	74	5.08	4466	Base
30	6.15	73	5.11	4507	Base
35	6.38	72	5.01	4504	Base
40	6.53	71	4.98	4472	Base

Se puede observar de la Tabla 13 que la mayor reducción del periodo se da cuando los outriggers están en el piso 15. A partir de ahí, los periodos empiezan a aumentar. Respecto al porcentaje de masa participativa en Y para el modo 1 (modo fundamental en Y), si los outriggers se ubican en los niveles bajos, este es menor al caso de la estructura sin outriggers (70.45%), lo cual indica que aumenta ligeramente la participación de los modos superiores en esta dirección. Sucede lo contrario si se colocan los outriggers en el piso 20 o superior.

Respecto al factor de escala, es interesante notar que este es significativamente menor en los casos en que el outrigger se coloca en los niveles inferiores. Esto indica que la fuerza cortante, si comparamos los valores sin escalar, resulta ser mayor al colocar outriggers en los pisos inferiores, lo cual se entiende debido al aumento de rigidez en los pisos bajos de la estructura. Al realizar el escalamiento de todas las iteraciones al 80% del cortante estático, ocurre más bien que las fuerzas internas son las menores para el caso de la estructura con outriggers en los niveles inferiores, justamente debido al hecho de tener un menor factor de escala. Por este motivo, el momento flector en la base resulta ser menor en los casos de colocar outrigger en los niveles inferiores. Esto se puede comprender mejor en las ilustraciones 46 y 47:



1 Ilustración 46: Distribución de fuerza cortante dinámica (sin escalar) en altura para la dirección Y para las iteraciones con un outrigger



1 Ilustración 47: Distribución de fuerza cortante dinámica (escalado) en altura para la dirección Y para las iteraciones con un outrigger

Con respecto a los desplazamientos y derivas de las estructuras, los resultados se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14: Iteraciones con un outrigger – derivas y desplazamiento máximo

Posición	Deriva máx. inelástica		Desplazamiento azotea inelástico (cm)
	Deriva (‰)	Piso	
5	5.72	31	40.84
10	6.04	31	41.34
15	6.02	30	41.42
20	5.55	31	41.13
25	5.09	33	40.42
30	4.89	12	39.61
35	5.15	27	39.63
40	5.44	29	39.64

Al respecto, se puede comentar que se logra obtener una menor deriva máxima al colocar los outriggers en los pisos superiores. De hecho, si se compara con la estructura sin outriggers (deriva máxima en Y de 5.75‰), el colocar estos elementos en los pisos inferiores (pisos 10 a 15) contribuye a incrementar la deriva máxima de la estructura, lo cual es contraproducente. Es interesante, además, analizar la distribución de derivas en altura para cada iteración, lo cual se observa en la Ilustración 48.

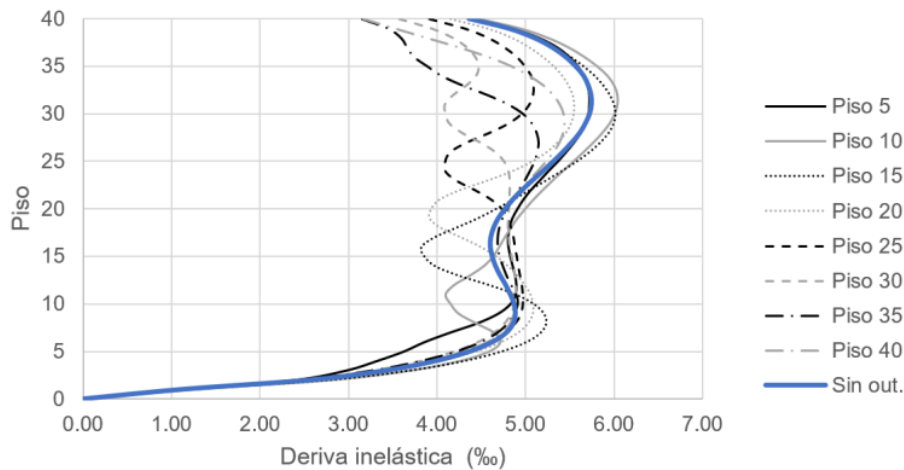


Ilustración 48: Distribución de derivas en altura, para las iteraciones realizadas con un nivel outrigger

La Ilustración 48 muestra que el comportamiento de las derivas es similar para todas las iteraciones. Se evidencia la reducción de la magnitud de las derivas en el nivel en que se colocaron los outriggers. Si se compara con la estructura sin outriggers, puede notarse que la iteración para el piso 5 es muy similar a la primera, por lo que colocar estos elementos en niveles muy bajos prácticamente no tendría efecto en la estructura. Conforme se van colocando los outriggers más arriba, se observa que las derivas se van uniformizando, aumentando en los pisos inferiores y reduciendo en los superiores.

Con respecto a los desplazamientos máximos de la estructura, puede notarse de la Tabla 14 que no hay mucha diferencia entre las distintas iteraciones, por el efecto de uniformización de derivas comentado anteriormente. No obstante, la mayor reducción se da para la iteración con outriggers en el piso 30, que logra una disminución de 1.09 cm con respecto al caso sin outriggers.

En base a lo comentado anteriormente, se puede concluir que la posición óptima para colocar el primer juego de outriggers en la estructura es el nivel 30. Por tanto, para las siguientes iteraciones, se colocarán outriggers fijos en este nivel, y se iterará de manera similar a lo realizado en este acápite para un segundo juego de outriggers.

### 6.3 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA CON DOS NIVELES OUTRIGGER

#### 6.3.1 Outrigger en pisos 10 y 30

Tal como se realizó para el análisis con un nivel outrigger, se comenzará detallando los resultados de una iteración en particular. Se tomará el caso para outriggers en los pisos 10 y 30. En primer lugar, se muestra la deformada de la estructura para el primer modo en la dirección de análisis.

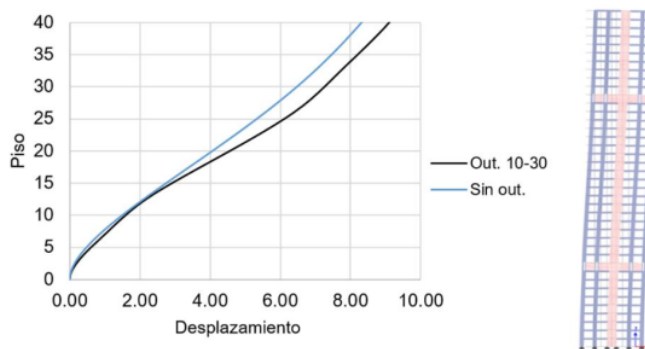


Ilustración 49: Deformada para el modo fundamental en Y - estructura con outriggers en pisos 10 y 30.

La forma de la deformada que se presenta en la Ilustración 49, sigue siendo similar a las presentadas en los análisis anteriores. Sin embargo, en este caso se observa la influencia de los outriggers como marcados puntos de inflexión en los pisos 10 y 30. Este efecto hace que el desplazamiento en la azotea, para este caso, sea mayor a los que se obtuvieron en los análisis anteriores. No obstante, la influencia de los outriggers afecta de manera particular a los modos superiores, por lo que puede que se consiga reducir el desplazamiento máximo de la estructura debido al efecto de estos modos. Esto se podrá observar más adelante al analizar las derivas y desplazamientos de esta iteración.

En cuanto a los periodos de la estructura, el modo fundamental en la dirección X, que sigue siendo el modo 3, tiene un periodo de 3.69 s y 74.9% de participación en dicha dirección, mientras que en Y, cuyo modo fundamental es el 1, el periodo es 5.38 s con 69.6% de participación en la misma dirección. Nuevamente se observa que hay reducción en los periodos con respecto a la estructura base, mientras que los porcentajes de masa participativa se mantienen similares.

Respecto a la distribución de cortantes en altura, se obtiene lo siguiente para la dirección Y:

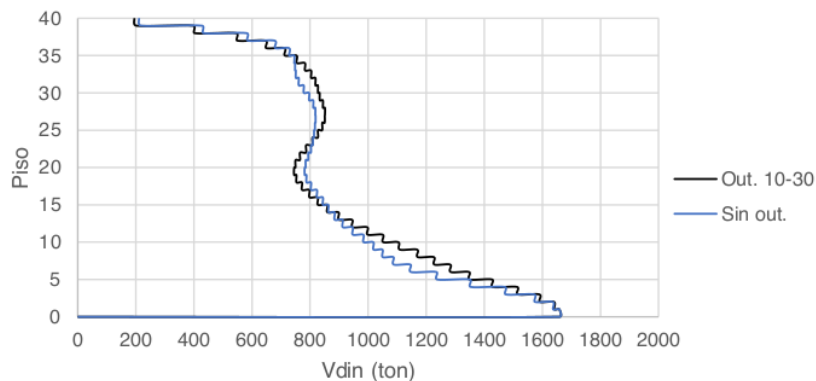


Ilustración 50: Distribución de fuerza cortante dinámica en altura para la dirección Y – estructura con outriggers en pisos 10 y 30

La Ilustración 50 permite observar ciertas diferencias con respecto al gráfico respectivo para la iteración con un outrigger. Por ejemplo, puede notarse que la fuerza cortante alrededor del piso 30 es mayor, lo cual responde a la ubicación de los outriggers en este nivel. Además, la magnitud de las fuerzas laterales entre los pisos 5 y 20 se ha uniformizado si se compara con el análisis anterior, y se observa que las fuerzas son mayores en comparación a la estructura sin outriggers. En particular se observa un incremento de fuerzas alrededor del piso 10 debido a la incorporación del brazo rígido en este nivel. En este caso, el factor de escala es 4.53.

El diagrama de momento flector del núcleo es el siguiente:

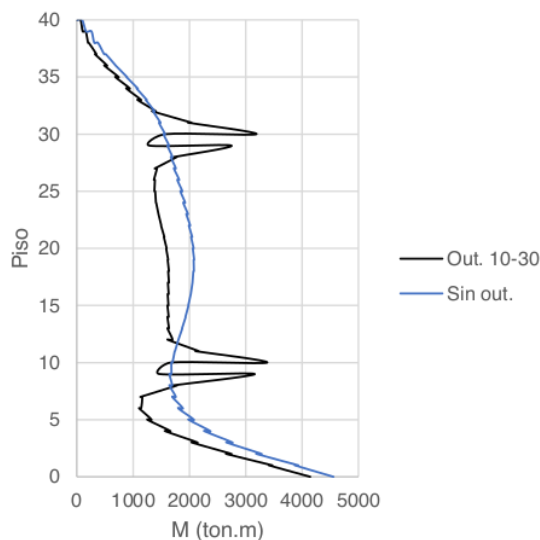


Ilustración 51: Diagrama de momento flector en X del núcleo central, debido al sismo en Y - estructura con outriggers en pisos 10 y 30

El comportamiento del momento flector en el núcleo era el esperado, como puede notarse en la Ilustración 51. Dado que en este caso hay dos niveles outrigger, el diagrama presenta dos discontinuidades en los pisos 10 y 30. El momento flector en la base es 4152 ton-m, principalmente la reducción se debe al menor factor de escala con respecto a la estructura sin outriggers.

Con respecto a las derivas y desplazamientos laterales de la estructura, se muestra la información resumida en la siguiente tabla:

Tabla 15: Derivas y desplazamientos laterales en Y debido al análisis dinámico - estructura con outriggers en pisos 10 y 30

Piso	Altura (m)	Deriva elástica (%)	Deriva inelástica (%)	Desplazamiento elástico (cm)	Desplazamiento inelástico (cm)
		Y	Y	Y	Y
40	120	0.75	3.93	7.16	37.57
35	105	0.93	4.88	6.42	33.72
30	90	0.84	4.43	5.70	29.92
25	75	0.93	4.88	4.91	25.79
20	60	0.90	4.72	3.98	20.88
15	45	0.86	4.52	2.99	15.70
10	30	0.74	3.90	2.01	10.54
5	15	0.81	4.25	0.87	4.55
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00

Gráficamente, lo anterior se muestra en la ilustración 50:

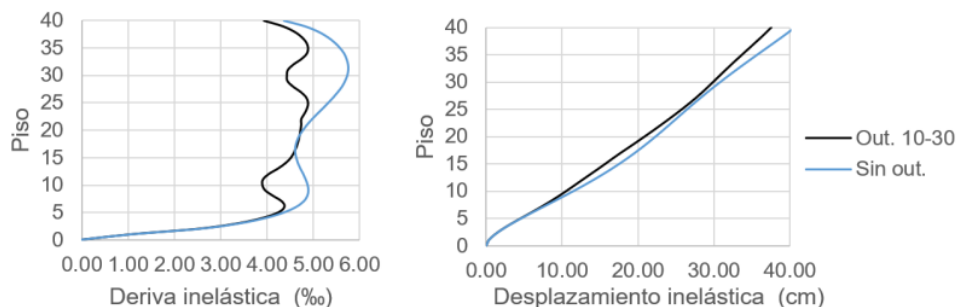


Ilustración 52: Distribución de derivas (izquierda) y desplazamientos (derecha) inelásticos debido al análisis dinámico en Y - estructura con outriggers en pisos 10 y 30

La Ilustración 52 permite evidenciar el efecto de la inclusión de outriggers en dos niveles de la estructura. Se puede comparar la distribución de derivas para este caso en particular, con el gráfico de distribución de derivas de las iteraciones con un outrigger, específicamente con la curva para outriggers en el piso 30. Si bien es cierto las derivas en los pisos superiores son ligeramente superiores en este caso, se observa una reducción significativa en los pisos inferiores cercanos al outrigger en el piso 10. Este efecto logra reducir los desplazamientos laterales, por lo que, ahora, se tiene un desplazamiento máximo en la azotea de 37.57 cm, una reducción de aproximadamente 2 cm con respecto al caso con outriggers solamente en el nivel 30. Esto se comentará con mayor detenimiento en el capítulo de comparación de resultados.

### 6.3.2 Iteraciones con Dos Niveles Outrigger

De manera similar a lo realizado anteriormente, se procede a presentar los resultados del resto de iteraciones, empezando por los periodos, cortante basal y momento en el núcleo.

Tabla 16: Iteraciones con dos outriggers – periodos, cortante basal y momento en el núcleo

Posición outrigger	$T_y$ (s)	% Masa participativa en Y	Factor de escala	M <sub>máx</sub> en núcleo	
				M (ton.m)	Ubicación
5 y 30	6.15	70	3.90	3560	Piso 6
10 y 30	5.38	70	4.53	4142	base
15 y 30	5.33	72	4.71	4393	base
20 y 30	5.49	75	5.02	4495	base
25 y 30	5.77	75	5.06	4478	base
35 y 30	6.09	74	4.94	4463	base
40 y 30	6.13	73	4.98	4445	base

La Tabla 16 muestra que la máxima reducción de periodo en la dirección Y se da cuando se colocan outriggers en los pisos 15 y 30. Los porcentajes de masa participativa en esta dirección para el modo fundamental, que sigue siendo el modo 1 en todos los casos, muestran un comportamiento similar al de las iteraciones con solo un nivel outrigger. Por otro lado, la mayor disminución del momento máximo en el núcleo se da para los pisos 5 y 30, similar a lo hallado en el análisis previo, debido al menor factor de escala.

89

Con respecto al análisis de derivas y desplazamientos, los resultados se presentan a continuación:

Tabla 17: Iteraciones con dos outrigger – derivas y desplazamiento máximo

Posición	Deriva máx. inelástica		Desplazamiento azotea inelástico (cm)
	Deriva (‰)	Piso	
5 y 30	4.94	15	38.87
10 y 30	4.88	25	37.57
15 y 30	4.81	25	37.45
20 y 30	4.88	11	38.41
25 y 30	4.95	13	39.04
35 y 30	4.82	12	38.34
40 y 30	4.85	12	38.79

De la Tabla 17 se puede extraer que la menor deriva máxima se encuentra cuando se colocan outriggers en los pisos 15 y 30, la cual se ubica en el piso 25. Lo mismo sucede con el máximo desplazamiento de la azotea. Se puede observar mejor el efecto que tiene la colocación de dos niveles outrigger sobre las derivas máximas observando la Ilustración 53.

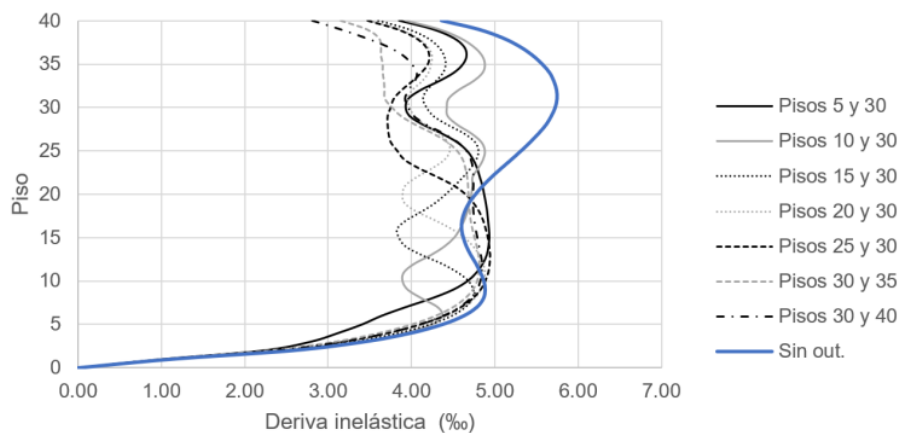


Ilustración 53: Distribución de derivas en altura, para las iteraciones realizadas con dos niveles outrigger



La Ilustración 53 permite evidenciar un comportamiento similar al de las iteraciones con un nivel outrigger. Se observa que en la mayoría de los casos la máxima deriva se encuentra entre los niveles 10 y 15, salvo en las iteraciones para outriggers en los pisos 10-30 y 15-30, en las que la máxima distorsión se da en el piso 25, tal como se indicó en la tabla. Esto indica que, para estos dos casos en particular, hay una mayor reducción de derivas en los pisos inferiores, si bien es cierto que en los superiores las derivas son ligeramente mayores. Con todo, esto permite obtener los menores desplazamientos en la azotea en estas dos iteraciones. Puede entonces inferirse que el colocar un juego de outriggers en la parte superior (nivel 30) y otro en la parte inferior -intermedia (niveles 10 - 15) permite obtener la mayor reducción de desplazamientos en la estructura.

Si se analizan los resultados que se muestran en las tablas 16 y 17, así como las gráficas correspondientes a cada iteración, se presentan dos casos destacados. La opción de colocar outriggers en los pisos 15 y 30 presenta las menores derivas y desplazamiento máximo. Mientras que la opción de colocar outrigger en los pisos 35 y 30 también reduce significativamente la deriva máxima y presenta un mejor comportamiento respecto a las fuerzas internas en comparación con las otras opciones. Se procede a realizar las iteraciones con 3 outriggers para ambas alternativas, y se determina que, entre ellas, la más óptima es la de mantener los outriggers fijos en los niveles 35 y 30, por lo que este será el punto de partida para la siguiente sección.

## 6.4 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA CON TRES NIVELES OUTRIGGER

### 6.4.1 Outrigger en pisos 20, 30 y 35

Para presentar este análisis, se colocará un set de outriggers en el piso 20 adicional a los ya definidos previamente. La deformada para el modo fundamental en Y es la siguiente:

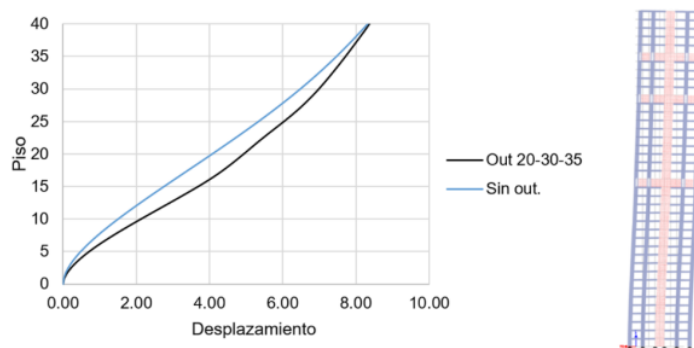


Ilustración 54: Deformada para el modo fundamental en Y - estructura con outriggers en pisos 20, 30 y 35.

Se observa que la silueta de la deformada mostrada en la Ilustración 54 no ha variado respecto a las iteraciones anteriores. Se aprecia el efecto de los outriggers como puntos de inflexión, que modifican la geometría de la gráfica y la vuelven cóncava hacia arriba, reduciendo el desplazamiento en los niveles superiores y, en particular, el desplazamiento total de la estructura en el piso 40.

Con respecto a los modos de vibración de la estructura, no hubo variación en los modos fundamentales en las direcciones X e Y. En la primera, este sigue siendo el modo 3, con un periodo de 3.71 s y 75.5% de masa participativa en dicha dirección. En la segunda, continúa siendo el primer modo con 5.45 s de periodo y 75.3% de participación en Y.

La distribución de fuerzas cortantes para la estructura y el diagrama de momento flector del núcleo central se muestran en las Ilustraciones 55 y 56.

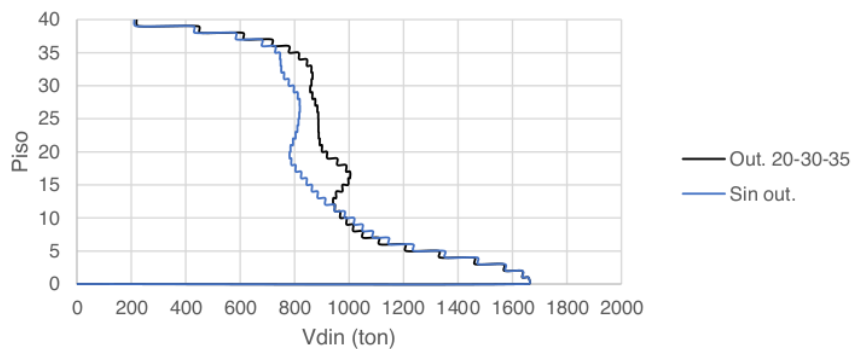


Ilustración 55: Distribución de fuerza cortante dinámica en altura para la dirección Y – estructura con outriggers en pisos 20, 30 y 35.

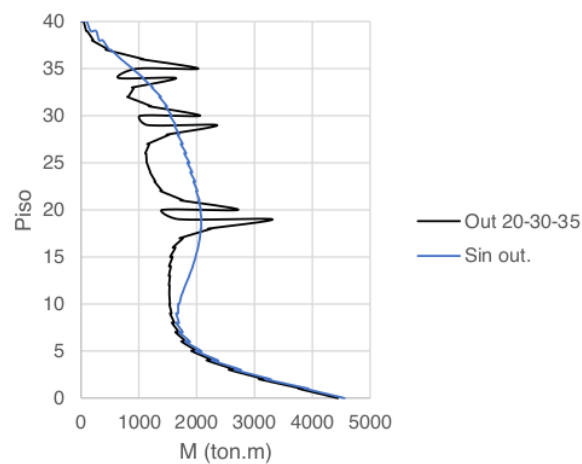


Ilustración 56: Diagrama de momento flector en X del núcleo central, debido al sismo en Y – estructura con outriggers en pisos 20, 30 y 35.

La Ilustración 55 nuevamente muestra el efecto que tiene la variación de la posición de los outriggers en la distribución de cortantes. En este caso, se aprecia que entre los pisos 33 y 20, las fuerzas laterales en la estructura son muy pequeñas por lo que la fuerza cortante es casi constante alrededor de 890 ton. Le sigue un ligero salto en el diagrama debido a un incremento y posterior reducción de cortantes alrededor del piso 15, producto del incremento de rigidez lateral en esos niveles.

Con respecto al diagrama de momento flector presentado en la Ilustración 56, claramente se muestran los saltos en los niveles outrigger, de manera similar a los casos anteriores. El momento flector en la base del núcleo es 4655ton-m aproximadamente. Este incremento con respecto a la estructura sin outriggers se debe a los motivos ya explicados anteriormente.

En cuanto a <sup>26</sup> las derivas y desplazamientos de la estructura para esta iteración, los resultados se presentan en la Tabla 18 y de manera gráfica, en la Ilustración 57.

Tabla 18: Derivas y desplazamientos laterales en Y debido al análisis dinámico – estructura con outriggers en pisos 20, 30 y 35

Piso	Altura	<sup>1</sup> Deriva elástica (‰)	Deriva inelástica (‰)	Desplazamiento elástico (cm)	Desplazamiento inelástico (cm)
	(m)	Y	Y	Y	Y
40	120	0.62	3.28	7.10	37.30
35	105	0.73	3.81	6.52	34.25
30	90	0.76	3.98	5.87	30.80
25	75	0.84	4.42	5.09	26.74
20	60	0.73	3.82	4.26	22.35
15	45	0.87	4.55	3.28	17.23
10	30	0.91	4.78	2.05	10.78
5	15	0.78	4.07	0.81	4.25
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00

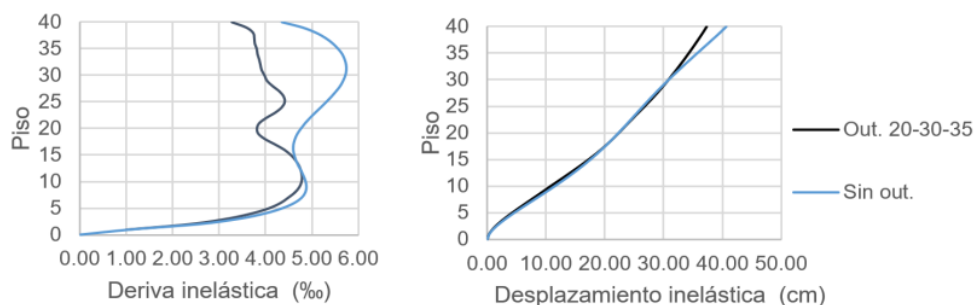


Ilustración 57: Distribución de derivas (izquierda) y desplazamientos (derecha) inelásticos debido al análisis dinámico en Y - estructura con outriggers en pisos 20, 30 y 35.

La Ilustración 57 nuevamente muestra la reducción en las derivas que se da en los niveles cercanos a los pisos outrigger. Para este caso particular, se observa una disminución de las derivas en los pisos superiores y alrededor del piso 20, mientras que las distorsiones en los pisos bajos se mantienen similares a las de la estructura sin outriggers. La deriva máxima se da en el piso 11, con un valor de 4.79 %. Los desplazamientos, por otro lado, no muestran una variación notoria con respecto a las iteraciones anteriores; en este caso, el valor del desplazamiento en la azotea es 37.30 cm.

#### 6.4.2 Iteraciones con Tres Niveles Outrigger

Los resultados para el resto de las iteraciones con tres outriggers, manteniendo fijos los niveles 30 y 35, se muestran a continuación:

Tabla 19: Iteraciones con tres outriggers – periodos, cortante basal y momento en el núcleo

Posición outrigger	T <sub>y</sub> (s)	%Masa participativa en Y	Factor de escala	M <sub>máx</sub> en núcleo	
				M (ton.m)	Ubicación
5, 30 y 35	5.64	70	3.73	3541	Piso 6
10, 30 y 35	5.32	70	4.25	4122	base
15, 30 y 35	5.28	66	4.55	4381	base
20, 30 y 35	5.45	75	4.78	4440	base
25, 30 y 35	5.74	75	4.78	4391	base
30, 35 y 40	6.09	74	4.84	4408	base

Se puede apreciar de la Tabla 19 que, en general, los periodos han disminuido con respecto a las iteraciones previas. Los porcentajes de masa participativa en Y para el modo 1, por otro lado, permanecen similares, salvo para el caso con outriggers en los pisos 15, 30 y 35, donde disminuye a 66%. Esta reducción implica el aumento de participación de los modos superiores en la dirección de análisis.

Los resultados en términos de derivas y desplazamientos se muestran en la Tabla 20. La Ilustración 56 profundiza en el análisis de las derivas para estas iteraciones.

Tabla 20: Iteraciones con tres outrigger – derivas y desplazamiento máximo

Posición	Deriva máx. inelástica		Desplazamiento azotea inelástico (cm)
	Deriva (‰)	Piso	
5, 30 y 35	4.85	14	37.71
10, 30 y 35	5.13	25	36.61
15, 30 y 35	5.07	25	37.92
20, 30 y 35	4.79	11	37.30
25, 30 y 35	4.90	12	38.21
30, 35 y 40	4.81	10	38.15

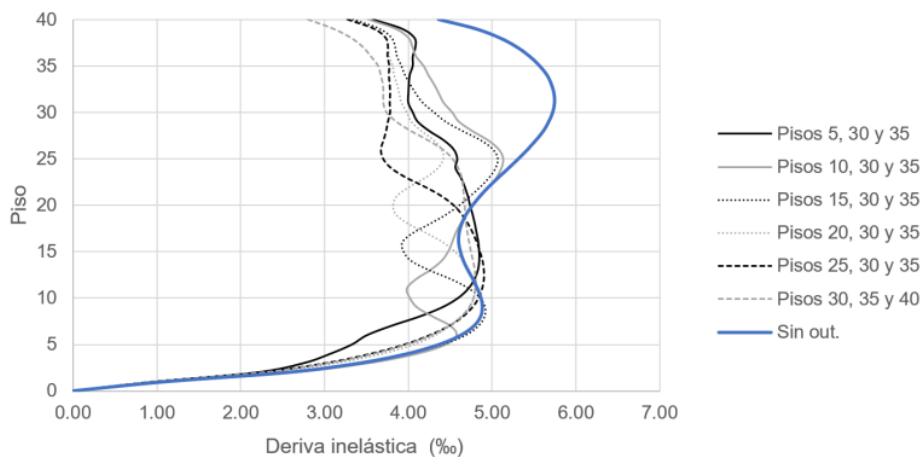


Ilustración 58: Distribución de derivas en altura, para las iteraciones realizadas con tres niveles outrigger

Observando los resultados presentados, claramente se evidencia que las mayores derivas se presentan para los casos con outriggers en los pisos 10, 30 y 35, y 15, 30 y 35. No obstante, el primero de estos también es el que muestra un menor desplazamiento total de la estructura. Si bien es cierto según la Ilustración 58 las derivas en general de dicha iteración no son las menores (a excepción de los pisos 8 a 13), debe tenerse en cuenta que no necesariamente la suma de las máximas derivas son las que conducen al máximo desplazamiento de la estructura. Esto sólo ocurriría si las distorsiones máximas sucedieran en un mismo instante o estuvieran asociadas a un único modo de vibración.

En general, la iteración que presenta las menores derivas es el caso con outriggers en los pisos 20, 30 y 35. Teniendo en cuenta que aquél es el segundo caso con menor desplazamiento máximo en la azotea, y que, si se vuelve a observar la Tabla 20, la fuerza cortante basal y momento en el núcleo están entre los menores, podríamos elegir este caso como el más favorable de este grupo de iteraciones.

## 7 COMPARACIÓN DE CASOS DESTACADOS

Luego de los procesos iterativos con la incorporación de diferentes números de outriggers, se procederá en este capítulo con la comparación final de los resultados obtenidos. Para este fin, se tomará la estructura sin outriggers como punto de referencia para contrastar los valores finales de cada una de las iteraciones seleccionadas para los casos con uno, dos y tres outriggers. Se realizará una comparación teniendo en cuenta las variaciones en fuerzas internas (distribución de fuerza cortante y momento flector en núcleo), derivas y desplazamientos. De esta manera, se podrá emitir un juicio de valor, teniendo en consideración la eficiencia relacionada al espacio que estos elementos ocuparían en la edificación con relación a los beneficios estructurales que proporcionan.

Adicionalmente, en este acápite se presentará el análisis de fuerzas en las columnas, para lo cual se realiza un diagrama de interacción en el que se muestran las solicitaciones en la columna más cargada, para una de las iteraciones. Por último, se mostrará una iteración adicional, en la que se consideran dos outriggers contiguos, para comparar con las otras iteraciones en términos de derivas y desplazamientos.

### 7.1 FUERZAS INTERNAS EN LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES

#### 7.1.1 Fuerza Cortante

El primer resultado a comparar será la distribución de fuerza cortante en la estructura, lo cual se presenta en la Ilustración 59:

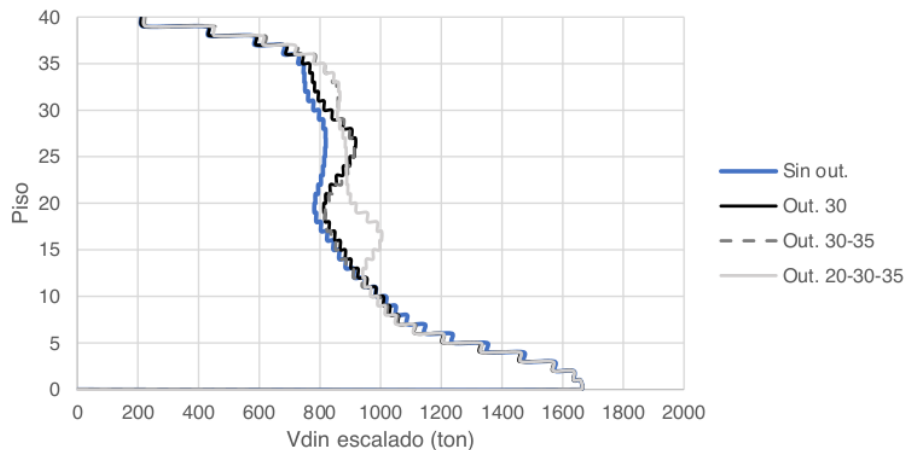


Ilustración 59: Comparación de diagramas de fuerza cortante dinámica escalada para la dirección de análisis

En primer lugar, es importante volver a recalcar que en todos los casos se ha tenido que escalar las fuerzas cortantes al 80% del cortante estático por exigencia de la norma. En ese sentido, es importante analizar los factores de escala de cada iteración. Esto se presenta en la Tabla 21:

Tabla 21: Comparación de factor de escala para los casos destacados

	Sin outrigger	Outrigger 30	Outrigger 30-35	Outrigger 20-30-35
Factor de escala	5.01	5.11	4.94	4.78

La Tabla 21 nos indica que, mientras más outriggers se coloquen, el factor de escala es menor. Esto quiere decir que, si comparamos las fuerzas sin escalar, al colocar más outriggers se presentarían mayores fuerzas internas en la estructura. Es importante tener esto en cuenta ya que podría ser un indicador de los resultados esperados si realizáramos otro tipo de análisis más complejos en la estructura, como el tiempo historia no lineal, en el cual se tiene en cuenta el efecto de los modos superiores de vibración de la estructura en cada instante de tiempo. Esto puede llegar a ser importante en edificios altos.

Sin embargo, al realizar el escalamiento, podemos notar que la distribución de fuerzas es similar en todos los casos, con un incremento de cortante siempre alrededor de los niveles outrigger debido al incremento de rigidez lateral. En este sentido, al incorporar menos outriggers se tiene un menor incremento general en las cortantes de entrepiso.

### 7.1.2 Momento Flector del Núcleo

El segundo resultado a comparar será el momento flector en el núcleo central de la estructura que se presenta en la Ilustración 60.

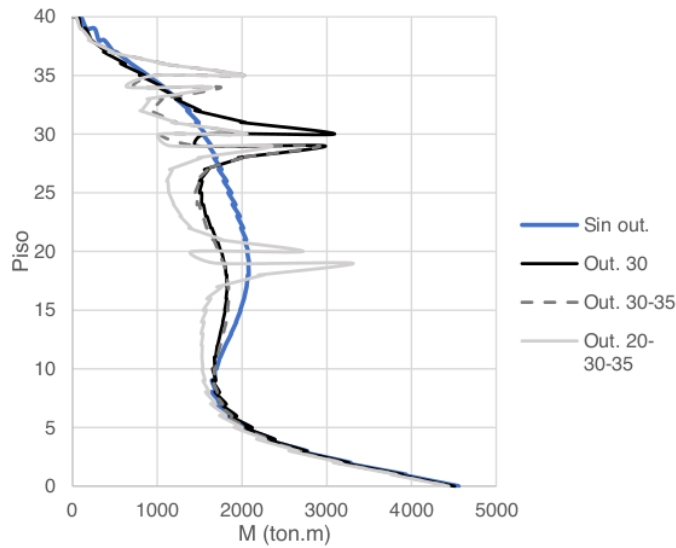


Ilustración 60: Comparación de diagramas de momento flector para la dirección de análisis

Lo primero que se puede notar son los picos que se producen alrededor de los pisos outriggers. Es evidente que en cada nivel donde se haya colocado una estructura outrigger, el momento sufre una reducción con respecto a la estructura base en dichos puntos, pero también se presenta un incremento en los pisos aledaños. Este incremento puede llegar a ser aproximadamente el 100% con respecto a la estructura sin outriggers, como se presenta en el caso con 1 dispositivo en el piso 30. Se entiende este comportamiento debido al funcionamiento de los outriggers explicado en capítulos previos. En lo que respecta al momento en la base del núcleo, sí se observa una ligera reducción al incorporar outriggers. Cuando se incorpora un dispositivo, se tiene una reducción de alrededor de 1.0%. Cuando se colocan 3 outriggers, se consigue reducir el momento en la base en 2.5%

La siguiente observación que es importante radica en que, si bien, por un lado, existen incrementos en los niveles cercanos a un piso outrigger; por otro, se aprecia una reducción considerable en el resto de los niveles, particularmente a partir del piso 10. Esta disminución en los pisos intermedios es más evidente para el caso con tres outriggers, en donde se observan reducciones de hasta el 39%. De manera general, si se calcula la diferencia en magnitud para todos los niveles entre la estructura original y las estructuras que incluyen outriggers, y se hace un promedio de estas, se obtiene lo siguiente: para el caso con 1 dispositivo, la reducción promedio es de 56 ton-m; para el caso con 2 dispositivos, es de 94 ton-m mientras que para el caso con 3 outriggers, se obtiene una reducción promedio de 190 ton-m.



## 7.2 DERIVAS

Como tercer parámetro de evaluación se encuentran las derivas. Este resultado es muy relevante, ya que es el valor que es controlado por la norma E.030 de diseño sismo resistente, la cual busca controlar el daño en estructura restringiendo el desplazamiento relativo de entrepiso a 7%. La Ilustración 61 grafica la distribución de derivas por nivel.

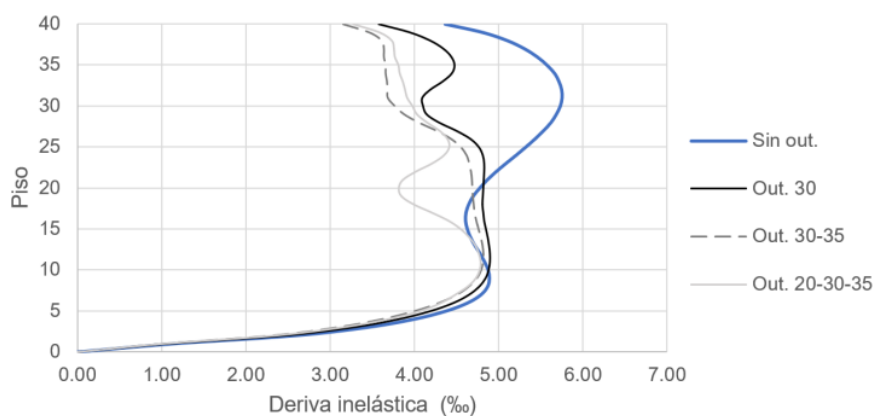


Ilustración 61: Comparación de derivas inelásticas

Como primera observación cabe recalcar que en ninguno de los casos se llega a superar el valor indicado por la norma peruana, incluyendo a la estructura base, lo cual podría significar que no se requiere la incorporación de outriggers. Sin embargo, el objetivo de la tesis es mostrar y comparar el comportamiento de una estructura a la cual se incorpora dichas estructuras, en términos de las reducciones que se pueden conseguir con estos elementos. Lo siguiente que se puede notar radica en que la reducción de derivas está presente en la mayoría de los niveles, a pesar de que existe un incremento entre los pisos 10 y 20 para los casos específicos de 2 y 3 outriggers. Con respecto a la reducción de la deriva máxima, por un lado, los números obtenidos indican que una estructura libre de outriggers y bajo esta geometría proporciona una distorsión máxima de alrededor de 5.8%. Por otro lado, en cualquiera de los casos que cuente con outriggers, la deriva máxima se encuentra cercana al valor de 4.8%, siendo la diferencia muy pequeña entre los diferentes casos analizados. Esto implica una reducción de aproximadamente el 17% entre la estructura base y los casos con outriggers.

### 7.3 DESPLAZAMIENTOS

El último criterio analizado dentro de esta investigación es el control de desplazamientos en la estructura. De manera similar que las anteriores gráficas, en la Ilustración 60 se muestran los desplazamientos máximos de las estructuras analizadas en cada nivel.

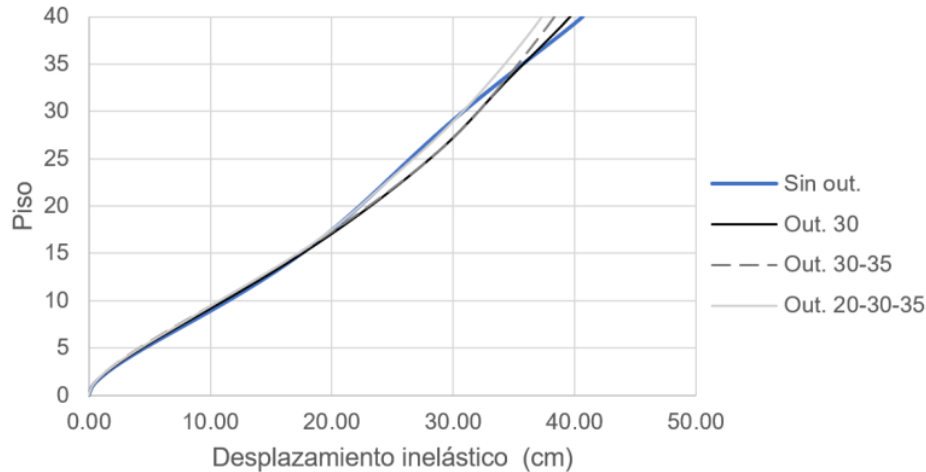


Ilustración 62: Comparación de desplazamientos inelásticos

En primer lugar, se pueden apreciar los ligeros cambios de concavidad en cada punto en que se incorporó un outrigger. Estos resultados alteran la forma en la deformada de la estructura comportándose menos como una viga en voladizo. Claramente, se evidencia el cambio en los puntos de inflexión de las gráficas, lo cual se aprecia especialmente en los casos con dos y tres outriggers. La curva para la estructura sin outriggers presenta un punto de inflexión aproximadamente en el piso 25, el cual cambia la concavidad de la curva hacia abajo y aumenta el desplazamiento en pisos superiores. Mientras que, en los otros casos mencionados, este punto de inflexión desaparece, producto de la incorporación de outriggers, contribuyendo así a la reducción del desplazamiento máximo del edificio. Esta disminución en el desplazamiento en la azotea lo cual es favorable para la edificación, ya que se requerirá una menor separación entre los edificios colindantes.

Así, si se optara solo por la reducción en general de desplazamientos, se tendría que elegir la estructura con 3 outriggers. Esta ofrece una reducción en el nivel más alto de 3 cm con respecto a la propuesta inicial cuyo desplazamiento ronda los 40 cm (8% de reducción), mientras que los desplazamientos en los niveles intermedios y bajos son muy cercanos a los de la estructura base.

En cuanto a los otros casos, con uno y dos outriggers, si bien hay una reducción, aunque menor, en el nivel más alto, también se observa que el desplazamiento máximo en los niveles intermedios se ve incrementado con respecto a la estructura inicial, lo cual es contraproducente dado que se requeriría de una mayor junta sísmica en estos pisos.

#### **7.4 ELECCIÓN DE ALTERNATIVAS**

Luego de realizar la comparación de resultados de las diversas iteraciones realizadas será necesario emitir una elección basada en los resultados obtenidos para ello se enfocará el juicio en 2 variables que fueron parte de la etapa de comparación. La primera variable se enfoca en las fuerzas que se generen en la edificación y la segunda está relacionada con los desplazamientos y derivas.

En primer lugar, en lo que respecta a la comparativa del diagrama de fuerzas cortantes se aprecia que incorporar outriggers no necesariamente disminuye la cortante en cada nivel, lo cual se explica puesto que al añadir estas estructuras se incrementa la rigidez de dicho piso y así las fuerzas cortantes alrededor de él. Bajo este criterio, el mejor comportamiento se obtiene cuando se añade un outrigger, ya que los incrementos solo se dan alrededor del único piso outrigger. Cuando se califica el comportamiento de los momentos registrados en el núcleo, sí se obtienen reducciones, con excepción de los picos marcados en los niveles alrededor de los outriggers. Esto conduce a elegir nuevamente la opción de un outrigger, ya que solo presenta el aumento sustancial de momento alrededor de dicho nivel mientras que en los demás niveles, se consigue reducir la magnitud de esta solicitud.

En segundo lugar, los parámetros derivas y desplazamientos fueron los de mayor estudio, ya que son el foco principal que busca controlar la norma E.030. Los resultados concordaron con la hipótesis, ya que se pudo conseguir una reducción de derivas hasta entre 15 y 17%, valores muy cercanos entre sí. Esto permite que la variable eficiencia se añada como criterio para la elección, ya que se debe recordar que un piso con outriggers queda inutilizado. En consecuencia, la opción de un outrigger vuelve cumplir con las condiciones. Además del estudio de derivas, los desplazamientos cumplen un valor importante, ya que son estos los que definirán el espaciamiento que se requerirá con las estructuras colindantes. De igual manera, se obtiene que la variación en el desplazamiento máximo entre las alternativas es mínima. De esta manera, se define que la mejor alternativa para el caso de estudio será aquella en la que se ubican outriggers únicamente en el nivel 30, ya que maximiza el área aprovechable dentro del edificio y los beneficios estructurales que consigue son comparables a las otras alternativas.

## 7.5 ANÁLISIS DE COLUMNAS

Es necesario verificar que las solicitaciones en las columnas consecuentes de la inclusión de outriggers no superen los límites de diseño de estas, dado que estos elementos introducen en las columnas un par de fuerzas de tracción y compresión. Para este caso, se procede a analizar las compresiones y momentos que se presentan en la columna ubicada en los ejes E y 2, pues se determinó que es la más cargada. Se presentarán los resultados para el caso con outriggers solamente en el piso 30, teniendo en cuenta que las solicitaciones en la base de las columnas son muy similares para los tres casos de estudio estudiados en este capítulo.

Es necesario mencionar que, para la columna a analizar, el incremento de carga axial debido al sismo es de 17.58 ton. Sin embargo, el mayor incremento se da para la columna en el extremo (ejes E y 1), en cuyo caso el incremento debido a la solicitación sísmica es de 21.43 ton.

Se muestra a continuación en la Ilustración 63, a manera de ejemplo, una elevación de la base del pórtico del eje E, mostrando las cargas axiales y momento flector debido a la combinación de carga  $1.25(CM+CV) + S_y$ .

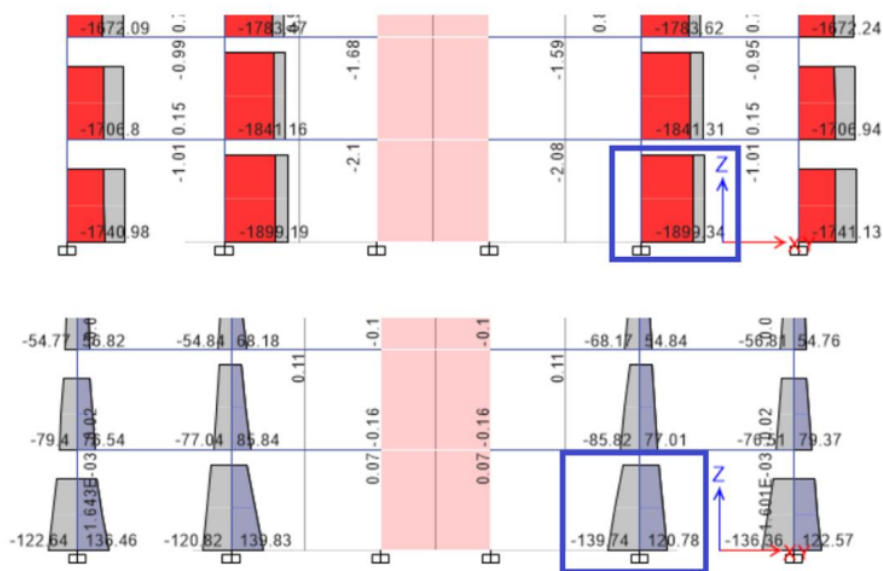


Ilustración 63: Diagramas de fuerza axial (superior) y momento flector en la dirección Y (inferior) para la base del pórtico del eje E, para la combinación  $1.25(CM + CV) + S_y$ .

La Tabla 22 muestra de manera resumida las solicitaciones en la columna indicada para las combinaciones de la norma E.060, considerando únicamente el sismo en la dirección de análisis.

Tabla 22: Carga axial y momento flector en la columna E-2 – estructura con outriggers en piso 30

Combinación	Pu (ton)	Mu (ton.m)
1.4CM+1.7CV	2005.3	11.0
1.25(CM+CV) + Sy	1899.3	139.7
0.9CM+Sy	1194.4	135.9

Respecto al diseño de la columna, previamente se indicó que el concreto a emplear para los elementos verticales es  $f'c = 500 \text{ kg/cm}^2$ , debido a la alta magnitud de las cargas axiales por la altura del edificio. Además, se empleará una cuantía de acero de 1.50%, por lo cual se decide utilizar 21 barras de acero de 1", con área total igual a  $107.1 \text{ cm}^2$ . La configuración se muestra en la Ilustración 64:

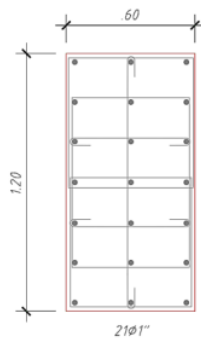


Ilustración 64: Disposición de acero longitudinal en la columna a analizar

El diagrama de interacción para esta columna se muestra en la Ilustración 65:

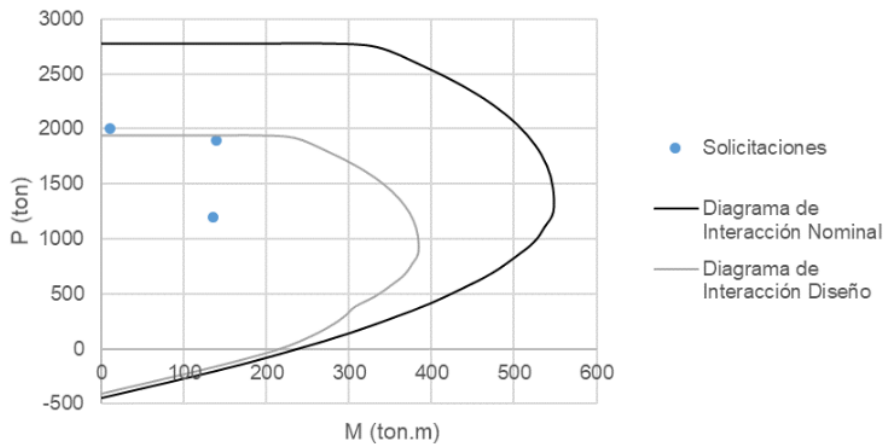


Ilustración 65: Diagrama de interacción para la columna analizada

Claramente, se evidencia que las solicitaciones en la columna están en el límite del diagrama de diseño, lo cual no es apropiado pues deja un bajo margen de seguridad ante deficiencias que pudieran presentarse en la calidad de materiales o construcción. Además, las cargas están por encima del punto de falla balanceada en el diagrama nominal a partir del cual la ductilidad de la columna empieza a bajar. Para mejorar el comportamiento de la columna se puede aumentar la resistencia del concreto, la sección de la columna o la cuantía de acero. En este caso, se opta por aumentar la sección de la columna (considerando que no tenemos restricciones arquitectónicas) a 0.80 x 1.20 m, dado que se necesita que el diagrama crezca en su capacidad de carga axial, lo cual se consigue principalmente aumentando la sección de la columna o la resistencia del concreto. La Ilustración 66 muestra la nueva sección de la columna, manteniendo el área de acero (nueva cuantía de 1.10%).

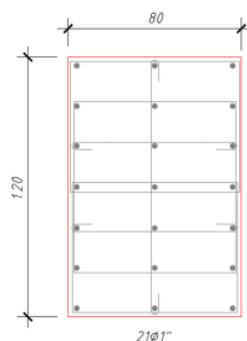


Ilustración 66: Disposición de acero longitudinal modificada

En la Ilustración 67 se muestra el diagrama de interacción para este caso.

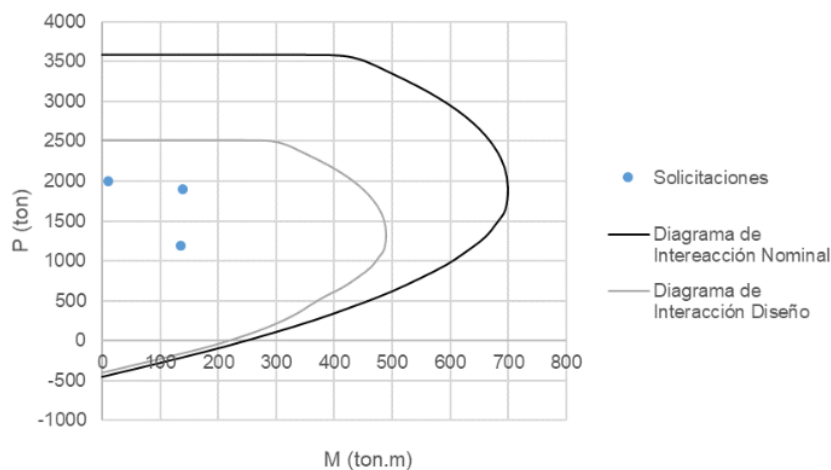


Ilustración 67: Diagrama de interacción para columna de 0.80 x 1.20 m

Como se observa en la Ilustración 67, con la nueva cuantía de acero, todos los puntos caen dentro del diagrama de diseño y más cercanos a la falla balanceada en el diagrama nominal. Por lo tanto, se deberá aumentar la sección en los pisos inferiores necesarios según se requiera en base a los diagramas de carga axial y momento flector de las columnas.

## 7.6 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA CON DOS OUTRIGGERS ADYACENTES

Se ha podido observar que la posición más favorable para un solo juego de outriggers es en el piso 30, mientras que, si se colocan dos sets, se deberían ubicar en los pisos 30 y 35. Es interesante analizar el caso de colocar dos outriggers juntos alrededor de estos pisos, pues podría conseguirse un mejor comportamiento en la estructura en comparación con los casos mencionados. Para esto, se realizaron iteraciones con outriggers en los pisos 30-31, y 32-33. A continuación, se presentan los resultados para el primero de estos casos, pues se determinó que es el más favorable entre los dos. Se muestran las gráficas de derivas y desplazamientos pues son los más relevantes para la comparación.

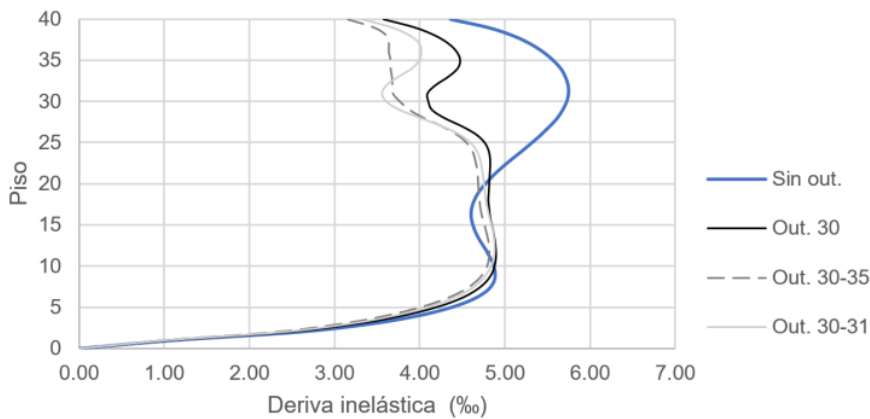


Ilustración 68: Comparación de derivas incluyendo outriggers en pisos 30-31

La Ilustración 68 permite comparar las derivas de la nueva iteración con los casos seleccionados para uno y dos outriggers. Se observa, en general, que la curva correspondiente a los outriggers juntos se encuentra en un intermedio entre las otras dos iteraciones. La silueta es más parecida al caso con un solo outrigger, debido a que al tener dos de estos elementos juntos, trabajan en conjunto como un solo brazo rígido. Si bien es cierto hay una muy ligera reducción en la deriva máxima en comparación con la iteración con un solo outrigger, se observa que la deriva máxima, en el piso 12, para el caso con muros en los pisos 30 y 35 es menor que la del nuevo caso de análisis (4.81 vs 4.88%). Lo mismo sucede en los últimos pisos. Por tanto, considerando los casos

en los que se ocupan dos niveles con outriggers, no se obtienen mejores resultados en términos de derivas al emplear dos outriggers juntos.

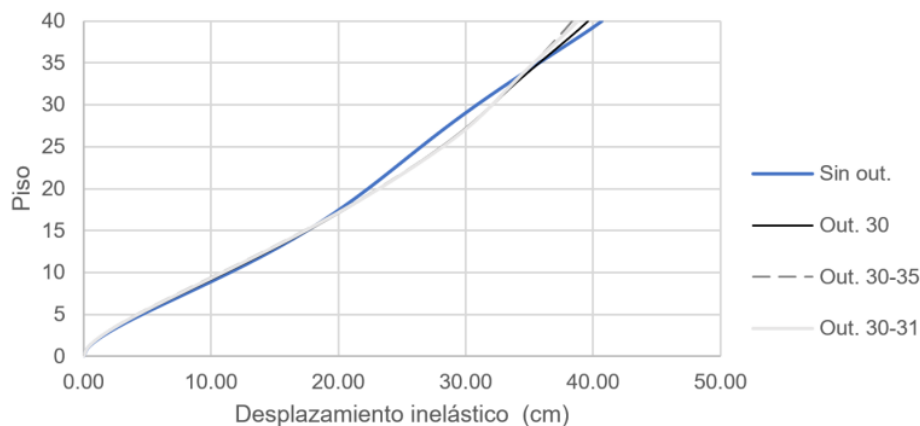


Ilustración 69: Comparación de desplazamientos incluyendo outriggers en pisos 30-31

Con respecto al análisis de desplazamientos, se evidencia en la Ilustración 69 que la curva para la nueva iteración es muy cercana al caso con dispositivos en los pisos 30 y 35. Se puede notar una ligera diferencia en los pisos superiores, aunque sucede lo mismo que en el caso de las derivas: la iteración previa con dos outriggers presenta un mejor resultado que la nueva alternativa, aunque sí se evidencia una mejora con respecto al caso con un solo outrigger.

Se puede concluir de este análisis que el considerar dos outriggers juntos, entre los pisos 30 y 35, no produce mejores resultados en términos de desplazamientos laterales que el tener dos dispositivos en estos niveles de manera separada. Ahora bien, podría darse el caso en que sea necesario tener los dos niveles outrigger contiguos por temas arquitectónicos. En tal caso deberá analizarse si es conveniente tener solo un set ocupando un nivel o dos niveles outrigger contiguos, lo cual solo sería recomendable en caso sea necesario mantener las derivas en los últimos pisos por debajo de 4%, como se pudo notar en la Ilustración 68.



## 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

<sup>30</sup> La presente tesis buscó contribuir en el desarrollo de metodologías de diseño para edificios de mediana y gran altura mediante el análisis comparativo entre las características de una estructura que cuente con outriggers y su versión original sin estos. Este proceso partió con una predimensionamiento y una posterior estructuración de un edificio de 40 pisos equivalente a 120 m de altura. Luego se realizó un análisis dinámico en la estructura sin outriggers para contar con un modelo patrón de comparación. El proceso buscó encontrar el número de estas estructuras que se deberían incorporar a lo alto del edificio y la posición óptima. Sin embargo, se limitó nuestro alcance a un máximo de 3 outriggers.

Para la presente investigación se esperaba que los resultados indiquen cuál es la disposición óptima de niveles con outriggers en la estructura, de forma que se mejore el comportamiento dinámico de la misma. <sup>38</sup> Según los resultados obtenidos, se puede afirmar que la hipótesis se cumple. Esto se justifica con la reducción de desplazamientos, derivas y, en menor medida, fuerzas internas en el núcleo, las cuales se observaron para determinadas configuraciones de outriggers en la estructura. Comparando la disposición óptima con la estructura inicial, se ha conseguido reducir los valores máximos de desplazamiento en 1.10 cm (2.7%), deriva en 0.86% (15.0%) y el momento en la base en 47.3 ton-m (1.0%), considerando además una reducción promedio entre todos los niveles de 56 ton-m. Debido al escalamiento del cortante dinámico, el <sup>1</sup> valor de la fuerza cortante basal permanece invariable, con incrementos de la fuerza cortante de <sup>1</sup> entrepiso de hasta 98 ton en los niveles adyacentes al outrigger.

Sin embargo, existen algunas disposiciones, como el caso en el que se incorpora un outrigger en el piso 10, que resultan contraproducentes para la edificación. Si bien no se ha profundizado en el estudio de las causas de <sup>1</sup> estos resultados, la explicación podría encontrarse en la manera en que cada configuración afecta <sup>1</sup> los modos de vibración de la estructura. Existen determinadas formas <sup>1</sup> que contribuyen a la optimización del comportamiento de la edificación, mientras que otras, por el contrario, incrementan los efectos de las sollicitaciones sísmicas. Esto podría analizarse más en profundidad con métodos de análisis <sup>11</sup> más sofisticados, que tengan en cuenta la manera en que cada modo de vibración contribuye en la <sup>11</sup> respuesta inelástica de la estructura en cada instante de tiempo.

Por otro lado, si bien es cierto se han conseguido reducciones en las magnitudes ya indicadas previamente, los valores máximos alcanzados son elevados en comparación con las investigaciones presentadas en el capítulo 3. Se puede añadir que la geometría de la estructura, variable que no formó parte de la investigación, influye en los resultados. Esto se sustenta bajo la

siguiente hipótesis: los edificios teóricos de Suresh y Krunal presentan anchos de 48 y 42 m respectivamente, lo cual duplica los 20 m que se utilizan en el presente trabajo. Esta variable influiría en el brazo de palanca que genera los momentos restauradores para la estructura en cuestión.

De esta manera, se concluye que, para los edificios entre 100 y 150 metros, con una relación de lados que deberá encontrarse cercana a la proporción de 1:2 a 1:3, simétricos y regulares, con un sistema estructural dual donde los muros se ubican en el núcleo central y los pórticos hacia los extremos, se verán beneficiados con la incorporación de un único outrigger. Este deberá estar ubicado en el cuarto superior de la altura total, con lo que se conseguirá la reducción de las derivas máximas hasta en un 15%. Además, es de esperarse que las derivas no superen el valor límite de la norma, como se verificó en el análisis de la edificación sin incluir outriggers. Por lo tanto, el uso de estos elementos permitiría reducir algunas características de la estructura y aun así cumplir con los requisitos de la norma E.030. Lo recomendable sería, en este caso, disminuir las secciones de los elementos que no están asociados al sistema outrigger. Por ejemplo, se podría reducir la longitud de muros estructurales en la dirección de análisis, ya que estos dispositivos están supliendo la demanda de rigidez lateral que proporcionarían los primeros. Esto puede ser eficiente económicamente dependiendo del área perdida debido a la inclusión de outriggers en relación con la reducción de costos producto de reducir la longitud de muros en todos los niveles de la edificación.

Es relevante mencionar que, luego del análisis realizado, podríamos afirmar que la normativa peruana podría no ser apropiada para el análisis de edificios altos. Como ya se ha visto, el usar una fuerza cortante mínima equivalente al 5% del peso de la estructura es aplicable a los edificios tradicionales de Lima, de baja a mediana altura, y puede no ser justificable para edificaciones altas con periodos de vibración más largos. De igual manera, el escalar al 80% del cortante estático conduce a tener factores de escala muy grandes que pueden exagerar las solicitaciones aplicables a la estructura. En este sentido, la norma E.030 podría hacer precisiones o considerar diferentes parámetros para el análisis de edificios altos, similar a las consideraciones que se tienen en normas extranjeras.

Como recomendaciones para un futuro trabajo que aborde el tema presentado en esa investigación con mayor profundidad, en primer lugar, se sugiere llevar a cabo análisis sísmicos que reflejen de manera más exacta el comportamiento que podría tener la estructura ante un movimiento telúrico. Para este efecto, es recomendable realizar análisis tiempo historia empleando registros de los últimos sismos que afectaron a la ciudad de Lima. Es recomendable realizar análisis en el rango no lineal que tengan en cuenta el efecto de los modos superiores, como se comentó anteriormente.

En segundo lugar, así como en esta investigación se ha iterado con la posición de los outriggers en altura, sería importante también analizar y comparar diversas disposiciones de outrigger en planta. De esta manera, se podría determinar la distribución más eficiente y que permita un mejor aprovechamiento del espacio en los niveles outrigger.

Una tercera recomendación es realizar un análisis más profundo de los muros outrigger en sí, para lo cual se sugiere analizar los esfuerzos que se presentan en estos elementos. Se podría realizar un **modelo de elementos finitos con** las solicitaciones **que se** presentan en estos dispositivos para este fin. Este punto es necesario para un futuro diseño del refuerzo de estos elementos, el cual podría llegar a ser importante dada la magnitud de esfuerzos cortantes que se presentan en estos elementos.

## 9 REFERENCIAS

- ACI (2015). ACI 318SUS-14: Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural. Michigan: ACI
- ASCE (2017). ASCE 7-16: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. Virginia: ASCE
- Asmat, C. (2022). Capítulo 6: Pre dimensionamiento – Estructuras 2 [Diapositiva 618]
- Blanco, A. (1997). *Estructuración y Diseño de Edificaciones de Concreto Armado*. Lima: Colegio de Ingenieros del Perú.
- Cainzo, H. (1994). *Método iterativo para el cálculo de estructuras palanqueadas*. Nueva York: Maity Publishing Co. Obtenido de: <https://www.doccity.com/es/estructuras-palanqueadas/586796>.
- Callow, J., Krall, K. & Scarangelo, T. (2009). Inside Out. *Modern Steel Construction* (Enero 2020). Obtenido de: <https://www.aisc.org/modernsteel/archives/2009/january/>
- Chao, H. & Qifeng, L. (2013). *Impact of Seismic Rotational Components on Symmetric Structures*. Dordrecht Heidelberg New York London: Springer
- Choi, H., Joseph, L., & Mathias, N. (2012). *Outrigger design for high-rise buildings. An output of the CTBUH Outrigger Working Group*. Chicago: Council on Tall Buildings and Urban Habitat.
- Computers & Structures, Inc. (2017). *CSI Analysis Reference Manual For SAP2000, ETABS, SAFE and CSiBridge*. California: CSI
- Computers & Structures, Inc. (2016). ETABS 2016 Help. California: CSI
- Council on Tall Buildings and Urban Habitat (2018). Waterfront Place. *The Skyscraper Center*. Obtenido de: <http://www.skyscrapercenter.com/building/waterfront-place/3208>
- Council on Tall Buildings and Urban Habitat (2018). 300 North LaSalle. *The Skyscraper Center*. Obtenido de: <http://www.skyscrapercenter.com/building/300-north-lasalle/1009>
- De Leon, E. (2015). One Wilson Square Pre Selling near La Salle Greenhills. [Blog]. Obtenido de: <http://onewilsonsquarefederalland.blogspot.com/2015/01/one-wilson-square-pre-selling-for-sale.html>
- Engel, H. (2013). *Structure Systems*. Ostfildern: Hatje Cantz
- Federal Land Properties (2018). One Wilson Square. Recuperado de: <http://www.federalproperties.net/one-wilson-square.html>

Fernández, A. (2015). Planeamiento urbano y producción de vivienda en el Perú. *Procesos Urbanos En Acción ¿Desarrollo De Ciudades Para Todos?*, 3(1), 71-73. Obtenido de:

<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A5e759d59-68b8-47db-b1bb-ee63ce123110>

Ho, G. (2016). The Evolution of Outrigger System in Tall Buildings. *International Journal Of High-Rise Buildings*, 5(1), 21-30. Obtenido de: <http://global.ctbuh.org/resources/papers/download/2736-the-evolution-of-outrigger-system-in-tall-buildings.pdf>.

INEI (2018). *Perú: crecimiento y distribución de la población, 2017 primeros resultados*. Lima. Obtenido de: [https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1530/libro.pdf](https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1530/libro.pdf)

INEI (2017). *Encuesta nacional de programas presupuestales 2011-2016*. Lima, pp.181-184. Obtenido de: [https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1442/libro.pdf](https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1442/libro.pdf)

Krunal, M., Dhruvi, D. (2015). Optimum Outrigger Location In Outrigger Structural System For High Rise Building. *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 2(5), 266-275. Obtenido de:

[http://www.ijaerd.co.in/papers/finished\\_papers/OPTIMUM%20OUTRIGGER%20LOCATION%20IN%20OUTRIGGER%20STRUCTURAL%20SYSTEM%20FOR%20HIGH%20RISE%20BUILDING-55417.pdf](http://www.ijaerd.co.in/papers/finished_papers/OPTIMUM%20OUTRIGGER%20LOCATION%20IN%20OUTRIGGER%20STRUCTURAL%20SYSTEM%20FOR%20HIGH%20RISE%20BUILDING-55417.pdf)

Lee, D. (24 de abril de 2014) Hitachi to build 'world's fastest' lift in China. *BBC News*. Obtenido de: <https://www.bbc.com/news/technology-27111923>.

Manohar, S., Madhekar, S. (2015). *Seismic Design of RC Buildings. Theory and Practice*. Nueva Delhi: Springer.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2006). *Norma E.020 Cargas*. Lima, Perú: El Ministerio

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2018). *Norma E.030 Diseño Sismorresistente*. Lima, Perú: El Ministerio

Moehle, J. (2015). *Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings*. Nueva York: McGraw-Hill.

Park, R. & Paulay, T. (1988). *Estructuras de concreto reforzado*. México D.F.: Limusa

Rchitects (s.f.) One Wilson Square. Obtenido de: <http://www.rchitects.ph/projects/project/one-wilson-square/>

Serangello, T., Tomasetti, T., Callow, J. (2008). A Statement in Steel: The New York Times Building. *CTBUH 2008 8<sup>th</sup> World Congress*. Obtenido de: <http://global.ctbuh.org/resources/papers/download/1272-a-statement-in-steel-the-new-york-times-building.pdf>

31  
Smith, R. (2016). The Damped Outrigger - Design and Implementation. *International Journal Of High-Rise Buildings*, 5(1), 63-70. Obtenido de: <http://global.ctbuh.org/resources/papers/download/2740-the-damped-outrigger-design-and-implementation.pdf>.

88  
Sukesh, H., Suresh Chandra, H., & Lakshmi, P. (2017). Influence of Outrigger system in RC Structures for Different Seismic Zones. *International Research Journal Of Engineering And Technology (IRJET)*, 4(6), 1749-1752. Obtenido de: <https://www.irjet.net/archives/V4/i6/IRJET-V4I6566.pdf>

25  
Vargas, S. (3 de agosto de 2016). Lima sigue creciendo verticalmente: conozca los rascacielos en construcción. *Gestión*. Obtenido de: <https://gestion.pe/tu-dinero/inmobiliarias/lima-sigue-creciendo-verticalmente-conozca-rascacielos-construccion-111358>

21  
Zameeruddin, M., Sangle, K. (2016). Review on Recent developments in the performance-based seismic design of reinforced concrete structures. *Structures*, 6, 119-133. Obtenido de: [https://www.researchgate.net/publication/298426488\\_Review\\_on\\_Recent\\_Developments\\_in\\_the\\_Performance-Based\\_Seismic\\_Design\\_of\\_Reinforced\\_Concrete\\_Structures](https://www.researchgate.net/publication/298426488_Review_on_Recent_Developments_in_the_Performance-Based_Seismic_Design_of_Reinforced_Concrete_Structures).

## INFORME DE ORIGINALIDAD

11%

INDICE DE SIMILITUD

11%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL  
ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="http://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	5%
2	<a href="http://tesis.pucp.edu.pe">tesis.pucp.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
3	<a href="http://repositorio.ucv.edu.pe">repositorio.ucv.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1%
4	<a href="http://tesis.ucsm.edu.pe">tesis.ucsm.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1%
5	Submitted to Pontificia Universidad Catolica del Peru Trabajo del estudiante	<1%
6	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	<1%
7	<a href="http://www.slideshare.net">www.slideshare.net</a> Fuente de Internet	<1%
8	<a href="http://repositorio.ucsg.edu.ec">repositorio.ucsg.edu.ec</a> Fuente de Internet	<1%

9	<a href="https://repositorio.urp.edu.pe">repositorio.urp.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
10	Miranda, Domingo Jesus Panta. "Análisis y diseño De Nave Industrial De Concreto Armado Con Puente grua", Pontificia Universidad Católica del Perú - CENTRUM Católica (Peru), 2021 Publicación	<1 %
11	<a href="https://upc.aws.openrepository.com">upc.aws.openrepository.com</a> Fuente de Internet	<1 %
12	Submitted to Universidad Andina del Cusco Trabajo del estudiante	<1 %
13	Submitted to University of Hong Kong Trabajo del estudiante	<1 %
14	<a href="http://www.iosrjournals.org">www.iosrjournals.org</a> Fuente de Internet	<1 %
15	<a href="https://pdfcoffee.com">pdfcoffee.com</a> Fuente de Internet	<1 %
16	<a href="https://es.scribd.com">es.scribd.com</a> Fuente de Internet	<1 %
17	<a href="https://kth.diva-portal.org">kth.diva-portal.org</a> Fuente de Internet	<1 %
18	<a href="https://repositorio.usil.edu.pe">repositorio.usil.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %



19	<a href="http://es.slideshare.net">es.slideshare.net</a> Fuente de Internet	<1 %
20	<a href="http://repositorio.unap.edu.pe">repositorio.unap.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
21	<a href="http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es">informesdelaconstruccion.revistas.csic.es</a> Fuente de Internet	<1 %
22	Submitted to University of Derby Trabajo del estudiante	<1 %
23	<a href="http://patents.google.com">patents.google.com</a> Fuente de Internet	<1 %
24	<a href="http://repositorio.unesp.br">repositorio.unesp.br</a> Fuente de Internet	<1 %
25	<a href="http://vsip.info">vsip.info</a> Fuente de Internet	<1 %
26	<a href="http://repositorio.puce.edu.ec">repositorio.puce.edu.ec</a> Fuente de Internet	<1 %
27	<a href="http://repositorio.unc.edu.pe">repositorio.unc.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
28	<a href="http://repositorio.upse.edu.ec">repositorio.upse.edu.ec</a> Fuente de Internet	<1 %
29	Estrada Porras, Franz Emmanuel. "Estudio comparativo de dos alternativas para la ampliacion de un nivel de un modulo de aulas	<1 %

# existente.", Pontificia Universidad Catolica del Peru - CENTRUM Catolica (Peru), 2020

Publicación

30

[futur.upc.edu](http://futur.upc.edu)

Fuente de Internet

<1 %

31

[nvlpubs.nist.gov](http://nvlpubs.nist.gov)

Fuente de Internet

<1 %

32

[repositorio.udec.cl](http://repositorio.udec.cl)

Fuente de Internet

<1 %

33

[www.coursehero.com](http://www.coursehero.com)

Fuente de Internet

<1 %

34

[de.slideshare.net](http://de.slideshare.net)

Fuente de Internet

<1 %

35

[dspace.unitru.edu.pe](http://dspace.unitru.edu.pe)

Fuente de Internet

<1 %

36

[ribuni.uni.edu.ni](http://ribuni.uni.edu.ni)

Fuente de Internet

<1 %

37

[issuu.com](http://issuu.com)

Fuente de Internet

<1 %

38

[www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)

Fuente de Internet

<1 %

39

Submitted to Miami University of Ohio

Trabajo del estudiante

<1 %

40	Submitted to Universidad Tecnologica de los Andes Trabajo del estudiante	<1 %
41	blog.pucp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
42	idoc.pub Fuente de Internet	<1 %
43	qdoc.tips Fuente de Internet	<1 %
44	repositorio.unal.edu.co Fuente de Internet	<1 %
45	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
46	Submitted to Barcelona School of Management Trabajo del estudiante	<1 %
47	Submitted to Ho Chi Minh City Open University Trabajo del estudiante	<1 %
48	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	<1 %
49	cabierta.uchile.cl Fuente de Internet	<1 %
50	documents.mx	

Fuente de Internet

<1 %

51

[publicaciones.eafit.edu.co](http://publicaciones.eafit.edu.co)

Fuente de Internet

<1 %

52

[renati.sunedu.gob.pe](http://renati.sunedu.gob.pe)

Fuente de Internet

<1 %

53

[www.bbc.co.uk](http://www.bbc.co.uk)

Fuente de Internet

<1 %

54

Antonio García Barberá. "Study of the Degradation of New Lubricant Oil Formulations with the Design and Demands of Current and Future Engines", Universitat Politècnica de Valencia, 2022

Publicación

<1 %

55

[oa.upm.es](http://oa.upm.es)

Fuente de Internet

<1 %

56

[onewilsonsquarefederalland.blogspot.com](http://onewilsonsquarefederalland.blogspot.com)

Fuente de Internet

<1 %

57

[repositorio.usmp.edu.pe](http://repositorio.usmp.edu.pe)

Fuente de Internet

<1 %

58

[upcommons.upc.edu](http://upcommons.upc.edu)

Fuente de Internet

<1 %

59

[www.archdaily.pe](http://www.archdaily.pe)

Fuente de Internet

<1 %

60

Lopez Saucedo, Anthony Alexis. "Efecto del angulo de incidencia sismica en la respuesta no-lineal de edificaciones de concreto armado con sistema dual.", Pontificia Universidad Catolica del Peru - CENTRUM Catolica (Peru), 2020

Publicación

<1 %

61

Vargas Malebran, alvaro Ignacio. "Análisis no Lineal de Edificios de Muros de Hormigon Armado Mediante Beam-Truss Model.", Pontificia Universidad Catolica de Chile (Chile), 2020

Publicación

<1 %

62

[core.ac.uk](http://core.ac.uk)

Fuente de Internet

<1 %

63

[fr.slideshare.net](http://fr.slideshare.net)

Fuente de Internet

<1 %

64

[idus.us.es](http://idus.us.es)

Fuente de Internet

<1 %

65

[linguatoools.de](http://linguatoools.de)

Fuente de Internet

<1 %

66

[livrosdeamor.com.br](http://livrosdeamor.com.br)

Fuente de Internet

<1 %

67

[olst.ling.umontreal.ca](http://olst.ling.umontreal.ca)

Fuente de Internet

<1 %

68

Fuente de Internet

<1 %

69

[repositorio.unsa.edu.pe](https://repositorio.unsa.edu.pe)

Fuente de Internet

<1 %

70

[repositorio.uss.edu.pe](https://repositorio.uss.edu.pe)

Fuente de Internet

<1 %

71

[www.aciprensa.com](http://www.aciprensa.com)

Fuente de Internet

<1 %

72

[www.clubensayos.com](http://www.clubensayos.com)

Fuente de Internet

<1 %

73

[www.diva-portal.org](http://www.diva-portal.org)

Fuente de Internet

<1 %

74

[www.mimdes.gob.pe](http://www.mimdes.gob.pe)

Fuente de Internet

<1 %

75

[1library.co](http://1library.co)

Fuente de Internet

<1 %

76

Diaz Lopez, Oliver. "Tecnologia de Biorreactores de Membrana Como Tratamiento Terciario de Aguas Residuales Domesticas", Universidad de La Laguna (Canary Islands, Spain), 2022

Publicación

<1 %

77

Enciso Miranda, Fernando Ubaldo. "Diseno Comparativo de Edificacion de 7 Pisos Con Aislamiento de Base Utilizando Acero Grado

<1 %

# 60 y 75", Pontificia Universidad Catolica del Peru - CENTRUM Catolica (Peru), 2022

Publicación

---

78	Tintaya, Edwin Meza. "Evaluación del Desempeño Sísmico de un Edificio Aislado con Irregularidad Torsional", Pontificia Universidad Catolica del Peru - CENTRUM Catolica (Peru), 2022 Publicación	<1 %
79	<a href="http://bibl.nngasu.ru">bibl.nngasu.ru</a> Fuente de Internet	<1 %
80	<a href="http://docplayer.es">docplayer.es</a> Fuente de Internet	<1 %
81	<a href="http://doczz.es">doczz.es</a> Fuente de Internet	<1 %
82	<a href="http://repositorio.ug.edu.ec">repositorio.ug.edu.ec</a> Fuente de Internet	<1 %
83	<a href="http://repository.javeriana.edu.co">repository.javeriana.edu.co</a> Fuente de Internet	<1 %
84	<a href="http://reunir.unir.net">reunir.unir.net</a> Fuente de Internet	<1 %
85	<a href="http://silo.tips">silo.tips</a> Fuente de Internet	<1 %
86	<a href="http://www.fao.org">www.fao.org</a> Fuente de Internet	<1 %

---

87 "Diseño óptimo de núcleos de hormigón armado para edificios de planta libre", Pontificia Universidad Católica de Chile, 2013  $<1\%$   
Publicación

---

88 Preetha Vellaichamy, Vishalachi chakkaravarthi. "Effect of outrigger systems for tall buildings", Materials Today: Proceedings, 2022  $<1\%$   
Publicación

---

89 [dokumen.pub](#)  $<1\%$   
Fuente de Internet

---

Excluir citas  Apagado

Excluir bibliografía  Apagado

Excluir coincidencias  Apagado