

U N I V E R S I D A D D E C H I L E
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

CALIFICACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS ALTOS

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL
MENCIÓN: ESTRUCTURAS Y CONSTRUCCIÓN**

RICARDO ARTURO HENOCH INOSTROZA

**PROFESOR GUÍA:
TOMAS GUENDELMAN BEDRACK.**

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RENÉ LAGOS CONTRERAS
JORGE LINDENBERG BUSTOS

Santiago, Chile 2007

**RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: RICARDO HENOCH I.
FECHA: 16/10/2007
PROF. GUÍA: TOMAS GUENDELMAN B.**

“CALIFICACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS ALTOS”

Chile, como país sísmico, ha tenido éxito en la construcción de estructuras sismorresistentes, lo que ha permitido acuñar la expresión “Edificio Chileno”.

Para caracterizar el éxito de las estructuras sismorresistentes chilenas en los eventos registrados hasta 1985 se generó el Perfil Bío-Sísmico, realizado por Guendelman T., Guendelman M., Lindenberg J. en 1997 (3). Este estudio se orientó a indagar respecto a los rangos de ciertos parámetros de los edificios construidos en el país, que hacen que se comporten sin problemas frente a los sismos. Sin embargo, se realizó con la información disponible en esos momentos, que eran edificios de menos de 30 pisos.

En este Trabajo de Título se buscó analizar cómo se pueden relacionar estos parámetros con los que llegarían a poseer edificios altos (sobre 50 pisos o de altura superior a los 200 metros). Con este objetivo se midieron los parámetros del Perfil Bío-Sísmico original para este nuevo escenario y se agregaron los siguientes:

1. Cuociente entre la altura total versus el periodo con mayor aporte al corte.
2. Esbeltez.
3. Cuociente entre la altura total versus el periodo rotacional.
4. Densidad de muros.

Con una recopilación de información pública, tales como trabajos especializados, libros y páginas de Internet, se generaron modelos aproximados de 4 edificios altos, analizados con el software GT Strudl. Tales edificios son:

- Torre Jin Mao ubicada en Shanghái, China, con 88 pisos.
- Taipéi 101 ubicado en Taipéi, Taiwán, con 101 pisos.
- Torres Petronas ubicado en Kuala Lumpur, Malasia, con 88 pisos.
- Central Plaza ubicado en Hong Kong, China, con 78 pisos.

Se concluyó que los parámetros del perfil Bío-Sísmico original siguen teniendo validez para el caso de edificios de gran altura y califican exitosamente el comportamiento de estas estructuras.

Los nuevos parámetros propuestos complementan la información del perfil y se propone incluir algunos de ellos en un nuevo conjunto de indicadores.

ABSTRACT

BY: RICARDO HENOCH I.

DATE: 16/10/2007

PROFESSOR: TOMAS GUENDELMAN B.

“SEISMIC QUALIFICATION OF TALL BUILDINGS”

Chile is a seismic country and has a successful history in the construction of seismic resistant structures, which has allowed the expression of the “Chilean Building”.

In order to characterize the success of Chilean structures, in the events registered up to 1985, the Bío-Seismic Profile was created by Guendelman T., Guendelman M. and Lindenberg J. (3) in 1997. This investigation focused on searching ranges of certain parameters of the buildings constructed in Chile that make them behave in a “proper way” under seismic events. Nevertheless, the information available at the moment only considered buildings not higher than 30 floors.

This investigation analyzed how these parameters change in high-rise buildings (buildings with more than 50 floors or a higher than 200 meters). With this objective, the original parameters of the Bío-Seismic Profile were measured for this new scenario and the following were added:

- Ratio between overall height versus the period with greater contribution to base shear.
- Slenderness.
- Ratio between overall height versus the rotational period.
- Wall Density in reinforce concrete structures.

Using public information, such as specific paperwork, books and the internet, 4 high rise building models were generated and then analyzed with the GT Strudl software. These buildings are:

- Jin Mao Tower located in Shanghai, China, 88 floors.
- Taipei 101 located in Taipei, Taiwan, 101 floors.
- Petronas Towers located in Kuala Lumpur, Malaysia, 88 floors.
- Central Plaza located in Hong Kong, China, 78 floors.

It was concluded that the original parameters of the Bío-Seismic Profile continue to have legitimacy for tall buildings and they successfully describe the behavior of these structures.

The new parameters that were proposed complement the information of the profile and it is encourage to include some of them in a new set of indicators.

A Paz por su ayuda,
cariño y apoyo.

A mis padres y hermana por su
ejemplo y confianza.

AGRADECIMIENTOS.

Quiero agradecer a mi familia y a Paz por su constante apoyo y ayuda en la confección de este trabajo de título.

También quiero agradecer a mi profesor guía, don Tomas Guendelman así como a don Jorge Lindenberg por su constante ayuda y confianza en el desarrollo de este tema. A Carlos Thielemann por su asistencia con un sinfín de dudas resueltas con su ayuda sobre GT Strudl y a la gente de IEC por su apoyo.

A si también debo agradecer a Sebastián Heresi por su tiempo al explicarme detenidamente una gran cantidad de dudas y a enseñarme a operar los conceptos básicos de GT Strudl.

Además, debo agradecer a la gente del *CASE Center* del *Georgia Tech*, en específico a los profesores Leroy Emkin, Kenneth Will y Michael Swanger por la resolución de problemas con la utilización de su *software*, GT Strudl.

Al *Council on Tall Buildings and Urban Habitat*, en específico a Geri Kery por su ayuda en aclarar algunos conceptos y para la obtención de información de edificios altos.

Igualmente debo agradecer a don Ching-Chang Chang, ingeniero de *Evergreen Consulting Engineering* de Taiwán, por su ayuda en el esclarecimiento del diseño del Taipéi 101 para la generación de un mejor modelo.

TABLA DE CONTENIDO.

	Pág.
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.	1
I.1 Introducción.	1
I.2 Objetivos.	3
I.3 Metodología.	4
I.4 Organización de la memoria.	5
CAPÍTULO II: INFORMACIÓN RELEVANTE DE EDIFICIOS ALTOS.	7
II.1. Introducción.	7
II.2. Conceptos básicos de la resistencia estructural.	7
II.3. Solicitaciones sísmicas y edificios altos.	8
II.4. Diseño sísmico de edificios altos.	10
II.5. Sistemas de resistencia de esfuerzos laterales.	11
II.5.1. Estructuras de Acero.	11
II.5.2. Estructuras de hormigón armado.	12
II.5.3. Estructura compuesta.	13
CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DE INDICADORES.	14
III.1. Descripción de indicadores.	14
III.1.1. Indicadores del perfil Bío-Sísmico.	14
III.1.2. Nuevos indicadores.	18
CAPÍTULO IV: OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN DE EDIFICIOS ALTOS.	20
IV.1. Introducción.	20
IV.2. Información de edificios altos.	21
IV.2.1. La Torre Jin Mao.	21
IV.2.2. Taipéi 101.	25
IV.2.3. Las Torres Petronas.	29
IV.2.4. Central Plaza.	34
CAPÍTULO V: COMPROBACIÓN DE LOS RESULTADOS DE UN MODELO GENÉRICO EN GT STRUDL.	38
V.1. Introducción.	38
V.2. Coordenadas en GT Strudl.	38
V.3. Edificio genérico simétrico.	39
V.3.1. Características del edificio.	39
V.3.2. Espectro.	40

V.3.3. Generación de modelos.	41
V.4. Edificio genérico para caso de torsión.	43
V.4.1. Características del edificio.....	43
V.4.2. Espectro.....	43
V.4.3. Generación de modelos.	44
V.5. Resultados.....	45
V.5.1. Modelo simétrico.	45
V.5.2. Modelo a torsión.....	49
V.6. Conclusiones.....	53
CAPÍTULO VI: GENERACIÓN DE LOS MODELOS ESTRUCTURALES EN GT STRUDL.55	
VI.1. Introducción.	55
VI.2. Espectro de respuesta que se aplicó a los edificios.	55
VI.3. Generación de los modelos estructurales en GT Strudl.	58
VI.3.1. Modelo 1 basado en la Torre Jin Mao.....	58
VI.3.2. Modelo 2 basado en el Taipéi 101.	63
VI.3.3. Modelo 3 basado en las Torres Petronas.....	69
VI.3.4. Modelo 4 basado en el edificio Central Plaza.	74
CAPÍTULO VII: OBTENCIÓN DE PARÁMETROS DEL ANÁLISIS DE LOS MODELOS Y GENERACIÓN DE INDICADORES.	80
VII.1. Introducción.	80
VII.2. Indicadores del perfil Bío-Sísmico.....	81
VII.2.1. Indicadores de Rigidez.....	81
VII.2.2. Indicadores de Acoplamiento.	90
VII.2.3. Redundancia estructural y demanda de ductilidad.	97
VII.3. Nuevos indicadores.....	98
CAPÍTULO VIII: COMPARACIÓN DE LOS INDICADORES CON LOS RANGOS OBTENIDOS ANTERIORMENTE EN EL PERFIL BÍO-SÍSMICO PARA EDIFICIOS DE MENOS DE 50 PISOS.	107
VIII.1. Resultados.....	107
VIII.2. Rangos de los nuevos indicadores.	112
CAPÍTULO IX: CONCLUSIONES.....	114
IX.1. Conclusiones.....	114
ANEXO A. DETALLE DE LAS MASAS POR PISO DE LAS LOSAS.	117
ANEXO B. INFORMACIÓN ADJUNTA EN DVD.	126

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tabla resumen con los resultados del edificio Jin Mao.	24
Tabla 2. Resumen de las características de los modelos simétricos.	41
Tabla 3 Resumen de las características de los modelos torsionales.	44
Tabla 4. Primeros 10 periodos de los distintos modelos.	45
Tabla 5. Resultados de los distintos modelos.	48
Tabla 6. Detalle de los nodos, barras y elementos para los modelos.	48
Tabla 7. Primeros 10 periodos de los distintos modelos.	49
Tabla 8. Resultados de los modelos a torsión.	52
Tabla 9. Parámetros del espectro para suelo tipo II.	55
Tabla 10. Detalle de las constantes en las columnas.	58
Tabla 11. Detalle de las constantes en los muros y vigas.	59
Tabla 12. Detalles de las constantes en elementos de acero.	60
Tabla 13. Propiedades de elementos infinitamente rígidos.	60
Tabla 14. Distribución de secciones de las mega-columnas por pisos.	63
Tabla 15. Distribución de secciones de las sub-mega-columnas por pisos.	64
Tabla 16. Detalles de las columnas CFT de las esquinas.	64
Tabla 17. Detalles de las columnas de la fachada.	64
Tabla 18. Detalles de las columnas internas.	64
Tabla 19. Detalles de las columnas esquineras del núcleo.	65
Tabla 20. Detalles de las columnas perimetrales del núcleo.	65
Tabla 21. Detalles de las columnas centrales del núcleo.	65
Tabla 22. Resumen de la distribución de las columnas y sus propiedades.	69
Tabla 23. Resumen de la distribución de las vigas y sus propiedades.	70
Tabla 24. Resumen de las propiedades geométricas y de los materiales de los muros.	70
Tabla 25. Características de las vigas y columnas de los pisos 38,39 y 40.	71
Tabla 26. Resumen de datos estadísticos de la medición del desplazamiento entrepiso en el centro de gravedad (todos los valores en ‰).	86
Tabla 27. Resumen de datos estadísticos de la medición del desplazamiento entrepiso en el centro de gravedad.	89
Tabla 28. Resumen de los números de ejes resistentes por edificio y dirección.	97
Tabla 29. Resumen de los datos estadísticos de la densidad de muros de los modelos.	104
Tabla 30. Resultados para los modelos 1 y 2.	105
Tabla 31. Resultados para los modelos 3 y 4.	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. (a) Resistencia al corte de un edificio, (b) quiebre de estructura por corte y (c) estiramiento excesivo por corte.....	8
Figura 2. (a) Resistencia de la flexión en un edificio, (b) volcamiento del edificio, (c) rotura de elementos resistentes por tensión o compresión y (d) estiramiento excesivo fuera de los límites elásticos.....	8
Figura 3. A la izquierda una pagoda china y a la derecha la torre Jin Mao una pagoda del siglo XXI.....	21
Figura 4. Planta tipo zona oficinas.....	22
Figura 5. Planta tipo zona hotel (atrium).	22
Figura 6. Sección de la Torre Jin Mao.....	23
Figura 7. El bambú es la fuente de inspiración del Taipéi 101.....	25
Figura 8. Detalle de una planta tipo.....	26
Figura 9. Sección del Taipéi 101.....	27
Figura 10. Amortiguador de masa sintonizada.....	28
Figura 11. Las Torres Petronas.....	29
Figura 12. Planta de estructura de un piso tipo.....	30
Figura 13. Detalle de la zona de traspaso de esfuerzos.....	31
Figura 14. Una mezquita, una de las formas inspiradoras de Las Torres Petronas (al fondo).....	32
Figura 15. Detalles de la investigación de Mohamad et al (1995).....	33
Figura 16. Izquierda un foto aérea del Central Plaza, a la derecha una elevación indicando las distintas zonas.....	34
Figura 17. Planta del 2 ^o piso, se pueden apreciar las columnas circulares (perímetro) y los muros del núcleo.....	35
Figura 18. Planta tipo del piso 26, se puede ver la disminución de muros en el núcleo así como el cambio al marco de columnas cuadradas.....	36
Figura 19. Detalle de la zona de transferencia.....	37
Figura 20. Planta del edificio genérico simétrico.....	39
Figura 21. Espectro utilizado.....	40
Figura 22. Ejemplos de algunos de los modelos realizados.....	42
Figura 23. Grafico de los 10 periodos de los modelos.....	45
Figura 24. Detalle de los modos 4 al 10.....	46
Figura 25. Grafico de los desplazamientos máximos.....	46
Figura 26. Grafico del corte basal.....	47
Figura 27. Grafico del momento basal.....	47
Figura 28. Grafico de los 10 periodos de los modelos.....	49
Figura 29. Detalle de los modos 4 al 10.....	50
Figura 30. Grafico de los desplazamientos máximos.....	50
Figura 31. Grafico del corte basal.....	51
Figura 32. Grafico del momento basal.....	51
Figura 33. Espectro de diseño.....	56
Figura 34. Comparación de los espectros.....	56

Figura 35. Esquemas del Modelo realizado en GT Strudl. a. Perspectiva del modelo completo, b. detalle del enrejado superior, c. detalle del enrejado del medio, d. detalle del enrejado inferior.	61
Figura 36. Especificación de los elementos estructurales del edificio.	62
Figura 37. Secciones y perspectivas del modelo 2 basado en el Taipéi 101. (a) Perspectiva del modelo, (b) sección del modelo, (c) Detalle de los últimos pisos, (d) detalle de una sección típica y (e) detalle de la base del edificio.	68
Figura 38. Detalle de la zona de trasferencias del modelo 3 basado en las Torres Petronas.	71
Figura 39. A la izquierda sección XY, al medio sección ZY y a la derecha una perspectiva del modelo 3 basado en las Torres Petronas.	73
Figura 40. Detalle de la base del modelo 4, donde se ubican las columnas circulares.	75
Figura 41. Detalle de una sección del modelo 4 en la zona del marco con columnas cuadradas, se aprecia una disminución de los muros del núcleo.	76
Figura 42. Destalle de la zona de transferencia de esfuerzos. Se puede ver la losa, la viga y el cambio de columnas circulares de la base a cuadradas.	77
Figura 43. Perspectiva del modelo 4 basado en el Central Plaza.	79
Figura 44. Gráfico de los resultados obtenidos para los modelos para el parámetro H/T.	81
Figura 45. Gráfico del número de casos en el parámetro H/T.	81
Figura 46. Grafico de los resultados de los modelos para el parámetro del efecto P- Δ	82
Figura 47. Gráfico del número de casos en el parámetro del efecto P- Δ	82
Figura 48. Gráfico de los resultados de los modelos para el parámetro del desplazamiento total nivel superior.	83
Figura 49. Gráfico del número de casos en el parámetro del desplazamiento total del nivel superior.	83
Figura 50. Gráficos resumen de los desplazamientos entrepiso del modelo de la torre Jin Mao.	84
Figura 51. Gráficos resumen de los desplazamientos entrepiso del modelo del Taipéi 101.	84
Figura 52. Gráficos resumen de los desplazamientos entrepiso del modelo de las torres Petronas.	85
Figura 53. Gráficos resumen de los desplazamientos entrepiso del modelo del Central Plaza. ..	85
Figura 54. Gráfico del número de casos en el parámetro desplazamiento entre pisos en el centro de gravedad.	85
Figura 55. Gráfico estadístico de los desplazamientos entrepisos en el centro de gravedad obtenidos para cada edificio.	86
Figura 56. Gráficos resumen de los desplazamientos entrepiso en puntos extremos del modelo de la torre Jin Mao.	87
Figura 57. Gráficos resumen de los desplazamientos entrepiso en puntos extremos del modelo del Taipéi 101.	87
Figura 58. Gráficos resumen de los desplazamientos entrepiso en puntos extremos del modelo de las torres Petronas.	88
Figura 59. Gráficos resumen de los desplazamientos entrepiso en puntos extremos del modelo del Central Plaza.	88
Figura 60. Gráfico del número de casos en el parámetro desplazamiento entre pisos en puntos extremos.	88
Figura 61. Gráfico estadístico de los desplazamientos entrepisos en un punto externo obtenidos para cada edificio.	89

Figura 62. Gráfico de los resultados de los modelos para el parámetro de acoplamiento de los periodos traslacionales.....	90
Figura 63. Gráfico del número de casos en el parámetro T_z/T_x	90
Figura 64. Gráfico de los resultados de los modelos para el parámetro de acoplamiento de los modos rotacional y traslacional.	91
Figura 65. Gráfico del número de casos en el parámetro T_{rot} / T_{tras}	91
Figura 66. Gráfico de los resultados de los modelos para el parámetro de acoplamientos de masa rotacional acoplada y masa traslacional directa.....	92
Figura 67. Gráfico del número de casos en el parámetro de acoplamiento de masas acoplada y directa.....	92
Figura 68. Gráfico de los resultados de los modelos para el acoplamiento torsional.	93
Figura 69. Gráfico del número de casos en el parámetro de la excentricidad dinámica versus el radio de giro.....	93
Figura 70. Gráfico de los resultados de los modelos para el parámetro del acoplamiento entre masas traslacionales acoplada y directa.	94
Figura 71. Gráfico del número de casos en el parámetro del acoplamiento de masas traslacionales.....	94
Figura 72. Gráfico de los resultados de los modelos para el parámetro de acoplamiento del corte basal.....	95
Figura 73. Gráfico del número de casos en el parámetro acoplamiento del corte basal.	95
Figura 74. Gráfico de los resultados de los modelos para el parámetro de acoplamiento de los momentos volcantes.	96
Figura 75. Gráfico del número de casos en el parámetro acoplamiento del momento volcante.....	96
Figura 76. Gráfico de los resultados de los modelos para el parámetro de H/T ordenado por corte basal.	98
Figura 77. Gráfico del número de casos en el parámetro de H/T ordenado por corte basal.	98
Figura 78. Gráfico de los resultados de los modelos para el parámetro de esbeltez.	99
Figura 79. Gráfico del número de casos en el parámetro de la esbeltez.	99
Figura 80. Grafico de los resultados de los modelos obtenidos para el parámetro de H / T_{ROT}	100
Figura 81. Gráfico del número de casos en el parámetro de H/T rotacional.....	100
Figura 82. Grafico de la densidad local del modelo de la Torre Jin Mao.	101
Figura 83. Grafico de la densidad de muros local del modelo de las Torres Petronas.	102
Figura 84. Grafico de la densidad de muros local del modelo de las Torres Petronas.	102
Figura 85. Grafico de la densidad de muros local del modelo del Central Plaza.	103
Figura 86. Grafico de la densidad de muros local del modelo del Central Plaza.	103
Figura 87. Gráfico del número de casos en el parámetro de la densidad de muros global.	104
Figura 88. Gráfico del número de casos en el parámetro de la densidad de muros basal.....	104

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.

I.1 Introducción.

La pirámide de Giza, en Egipto, con sus 146 metros de altura, una base de 231 metros de largo y más de 5.9 millones de toneladas de material, fue la estructura más alta del mundo por cerca de 4000 años. (Wikipedia, 13)

Hoy en día el edificio más alto según el Consejo de Edificios Altos y Hábitat Urbano (*Council on Tall Buildings and Urban Habitat*, en adelante CTBUH) es el Taipéi 101 con sus 101 pisos, 509 metros de altura hasta la antena, 64 metros de base y un uso en cantidades monumentales de de acero y hormigón. Sin embargo, no podrá ostentar este título por mucho tiempo: el Burj Dubái ya sobrepasó ésta altura, pero se encuentra en construcción, por lo que no será declarado el edificio más alto hasta su utilización.

Actualmente existen cada vez más proyectos de construcción de grandes edificaciones para lograr satisfacer la alta demanda de espacio que poseen ciertas zonas o sencillamente para promover turismo y demostrar el gran crecimiento de ciertos países (especialmente en Asia). Esto se explica principalmente por el crecimiento económico y demográfico que tienen las nuevas metrópolis.

Chile no se ha quedado atrás. Actualmente se encuentran en construcción dos megaproyectos de edificios por sobre los 50 pisos, en uno de los barrios de Santiago con más demanda de oficinas del país.

No cabe duda que la ingeniería chilena ha tenido éxito en la construcción de estructuras sismorresistentes, ya que continuamente el país se ve enfrentado a movimientos sísmicos y a pesar de esto, la cantidad de daños debido al colapso de edificios es muy baja.

Para caracterizar este fenómeno chileno se generó el Perfil Bío-Sísmico, realizado por Guendelman T., Guendelman M., Lindenberg J. en 1997 (3). Éste buscó saber cuáles son las características o parámetros de mayor importancia que poseen los edificios construidos en el país, que hacen que se comporten sin problemas frente a los sismos. Sin embargo, este estudio posee una limitante: se basó en edificios de menos de 30, salvo los casos de la torre Telefónica y el edificio Marriott.

Lo que queda ahora es analizar cómo se pueden relacionar estos parámetros con los que llegarían a poseer los nuevos edificios altos, no sólo por la altura que poseen, sino también por el comportamiento dinámico que adoptan.

Existen otros países con alta sismicidad que construyen rascacielos desde hace años (como por ejemplo EE.UU., Japón, Taiwán, etc.). Alguno de estos edificios altos o “rascacielos” han soportado embates de sismos y terremotos y algunos se emplazan en zonas donde los vientos llegan a generar importantes cargas, sin embargo, las logran soportar continuando en servicio hasta el día de hoy.

Es esta evidencia la que nos enseñará cuáles son las características que deben cumplir estructuras como éstas y que parámetros se deberían medir si estas estructuras se encontraran en el país.

Por estos motivos se busca comparar y determinar que parámetros del Perfil Bío-Sísmico anterior son útiles bajo este nuevo escenario con edificios que superan los 50 pisos y establecer nuevos indicadores que ayuden a calificar los futuros rascacielos que se construyan en Chile.

I.2 Objetivos.

El objetivo principal de esta memoria es analizar y obtener parámetros indicadores de comportamiento de edificios altos frente a cargas sísmicas.

Para conseguir esto se desprenden una serie de objetivos más específicos que son:

- Modelar 4 edificios altos ya existentes en el mundo.
- Realizar el análisis y rescate de datos de los distintos edificios con el software GTStrudl.
- Revisar las variaciones que puedan existir con el Perfil Bío-Sísmico realizado para edificios más bajos.
- Determinar nuevos parámetros que indiquen el comportamiento de edificios altos.

I.3 Metodología.

Para llevar a cabo este trabajo se requirió recopilar la mayor cantidad de información de edificios altos ubicados en países de gran riesgo sísmico o sometidos a fuertes cargas de viento.

Se definió como edificios altos todos aquellos que superen los 50 pisos o tengan más de 200 metros de altura.

Con la recopilación de información pública, tales como trabajos especializados, libros y páginas de Internet se generaron los modelos aproximados correspondientes, con la ayuda del software GT Strudl.

Bajo estas características los edificios elegidos, que fueron modelados, son:

- La torre Jin Mao ubicada en Shanghái, China, con 88 pisos.
- El Taipéi 101 ubicado en Taipéi, Taiwán, con 101 pisos.
- Las torres Petronas ubicado en Kuala Lumpur, Malasia, con 88 pisos.
- El Central Plaza ubicado en Hong Kong, China, con 78 pisos.

Luego de generar los modelos correspondientes y validarlos según los datos obtenidos, se determinaron los parámetros utilizados en el Perfil Bío-Sísmico como son:

- Períodos modales.
- Desplazamientos del nivel superior.
- Desplazamientos entrepisos. (en el centro de gravedad y al extremo)
- Masa equivalente traslacionales y rotacionales acopladas.
- Corte basal directo y acoplado.
- Momento volcante basal directo y acoplado.
- Momento torsor basal.
- Momento debido al efecto P- Δ .
- Etc.

También se estudiaron nuevos parámetros relevantes para calificar estas estructuras.

Todos los edificios se probaron sísmicamente con el mismo espectro. Éste es el de Newmark & Hall que se presenta en la norma NCh2745.Of03 sección 8.4 (11).

A partir de esta información, se compararon todos los resultados entregados por los modelos de los edificios sometidos al espectro de respuesta antes mencionado, con el fin de analizar los parámetros que más influyen en la respuesta sísmica, para posteriormente calificar los edificios. Además, se compararon los resultados obtenidos con los del estudio del Perfil Bío-Sísmico.

Finalmente, se concluyó sobre los indicadores, discriminando entre los que posean mayor utilidad, para así generar un conjunto de indicadores sísmicos para edificios altos en Chile.

I.4 Organización de la memoria.

Capítulo I: Introducción.

Incluye un resumen del trabajo a realizar y la motivación que llevaron al desarrollo de esta memoria. Además, de los objetivos y la metodología utilizada.

Capítulo II: Información relevante de estructuras altas.

En este capítulo se acumuló toda la información de los edificios altos que ayude a la obtención de nuevos indicadores y que otorgue un conocimiento previo del comportamiento de estas estructuras para su correcta calificación.

Capítulo III: Descripción de indicadores.

Se explicó todos los indicadores utilizados en este trabajo.

Capítulo IV: Información de edificios altos.

En este capítulo se reunió la información sobre los edificios escogidos según las características anteriormente señaladas y que fueron modelados en GT Strudl.

Capítulo V: Comprobación de los resultados de un modelo genérico en GTStrudl.

En esta sección se detalló el proceso de comprobación de los modelos generados en GTStrudl para un edificio genérico versus los resultados obtenidos de programas ya consolidados en empresas de ingeniería.

Capítulo VI: Generación de modelos estructurales en GTStrudl.

Aquí se detalla la generación de los distintos modelos y los supuestos utilizados para su correcta representación.

Capítulo VII: Obtención de parámetros del análisis de los modelos y generación de indicadores.

Tal como su título lo indica, se registraron los parámetros que genera el análisis computacional y se calcularon los indicadores a utilizar.

Capítulo VIII: Comparación de los indicadores con los obtenidos anteriormente en el Perfil Bío-Sísmico para edificios de menos de 50 pisos.

Con los resultados anteriores, más los obtenidos en el Perfil Bío-Sísmico, se realizó una comparación de los indicadores comunes para determinar las diferencias que existen.

Capítulo IX: Conclusiones.

Contiene la discusión final de los indicadores y las conclusiones generales de este tema de memoria.

CAPÍTULO II: INFORMACIÓN RELEVANTE DE EDIFICIOS ALTOS.

II.1. Introducción.

Desde la antigüedad el hombre dirige su mirada a las alturas. Es un deseo primitivo que encuentra evidencia en civilizaciones tan antiguas como la egipcia con sus pirámides, los mayas con sus templos escalonados, los indios con sus palacios y torres o relatos bíblicos tan antiguos como la Torre de Babel. Estas estructuras que apuntaban al cielo servían como monumentos, muestras de poder y riquezas.

Hoy en día muchos de estos objetivos prevalecen. Todavía se quiere demostrar a través de estas estructuras poder y riqueza, pero se requiere a la vez entregar utilidad y espacios habitables para los seres humanos, todo esto bajo las reglas del mercado de bienes raíces. Fue el arquitecto Cass Gilbert que una vez definió un edificio alto como una “máquina para hacer rendir el terreno” (“a machine that makes the land pay”).

Si bien los objetivos de estabilidad son casi los mismos que en las estructuras antiguas, son los usos, los materiales y los métodos los que más han cambiado. En estructuras antiguas se usaban grandes elementos sólidos, que ocupan gran parte del espacio para levantarse sobre el nivel de suelo a alturas considerables. En la actualidad la densidad de aquellos elementos claves para la resistencia y la estabilidad han disminuido notablemente. Existe una necesidad de espacio, por lo que estos elementos resistentes deben poseer tamaños óptimos que ahorren y otorguen mayores áreas para oficinas, departamentos, etc.

Según el CTBUH (2), un edificio alto no se define por su altura o por el número de pisos. El criterio importante a considerar es si el diseño se vio o no influenciado por algún aspecto de su altura. Un edificio alto, es un edificio, en el cual su altura influencia fuertemente la planificación, el diseño, la construcción, y su uso final. Es un edificio en el que su altura crea condiciones diferentes con respecto a los otros edificios “comunes” de una cierta región o en un periodo de tiempo.

Además, la arquitectura ha pasado a jugar un rol fundamental en el proceso de crear edificios útiles que a su vez sean verdaderos monumentos. Las formas y el espacio ya no son recursos de los que dispone el ingeniero para solucionar los problemas de estabilidad y resistencia, sino que son limitantes y éste debe saber optimizarlos y mejorarlos bajo estos nuevos límites.

II.2. Conceptos básicos de la resistencia estructural.

Como es mencionado por Taranath (5), una viga empotrada en el suelo es la forma más fácil de representar un edificio alto. Aquí la viga debe de resistir una serie de esfuerzos laterales debido al viento que choca contra ella o al movimiento sísmico de suelo. Estos tienden a doblar y empujar la estructura transformándose principalmente en dos tipos de esfuerzos sobre la

estructura: el corte y la flexión. Por lo tanto, una estructura debe tener elementos resistentes que toleren estos dos tipos de esfuerzos.

Para el caso del corte la estructura no debe quebrarse por corte, ni estirarse más allá de los límites elásticos de sus elementos.

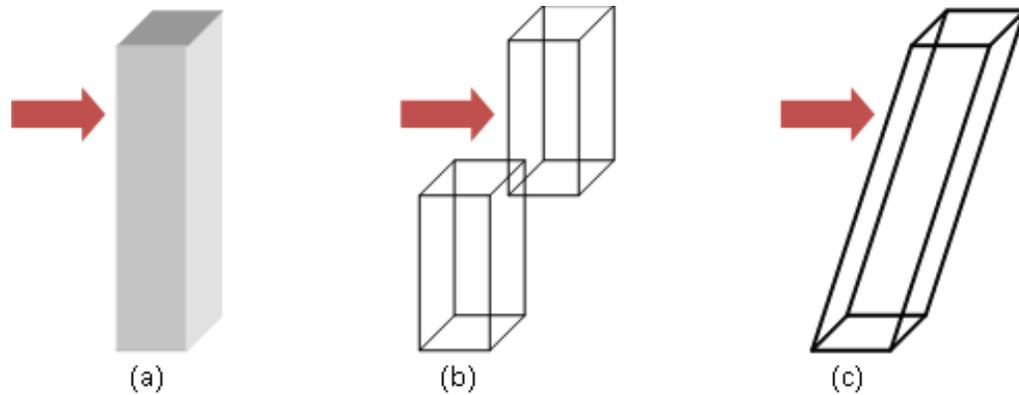


Figura 1. (a) Resistencia al corte de un edificio, (b) quiebre de estructura por corte y (c) estiramiento excesivo por corte.

De forma parecida en el caso de la flexión, la estructura no debe volcarse por el efecto combinado de fuerzas laterales y gravitacionales (Efecto $p-\Delta$). No deben quebrarse los elementos resistentes debido a los esfuerzos axiales que surgen, y el estiramiento no debe superar los límites de recuperación elástica de los materiales. En el caso de zonas sísmicas el edificio no debe perder la capacidad de transmitir los esfuerzos verticales.

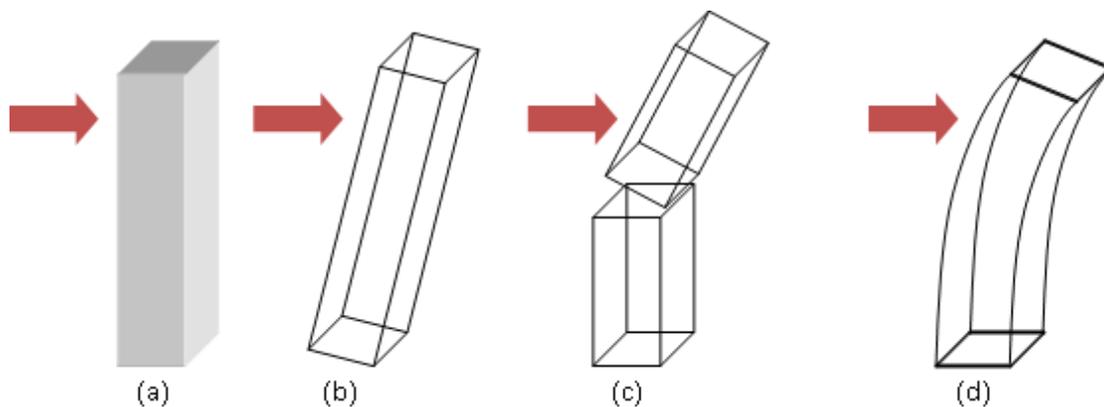


Figura 2. (a) Resistencia de la flexión en un edificio, (b) volcamiento del edificio, (c) rotura de elementos resistentes por tensión o compresión y (d) estiramiento excesivo fuera de los límites elásticos.

Con la correcta elección de los elementos que deben resistir los esfuerzos anteriormente descritos, viene una tercera parte: que la estructura sea confortable para el uso previsto y para sus ocupantes (aceleraciones excesivas, mareos, etc.).

II.3. Solicitaciones sísmicas y edificios altos.

Normalmente, en el diseño de edificios altos, las cargas por viento son las que controlan el diseño de la mayoría de los elementos estructurales que soportan cargas laterales. Sin embargo,

los países de alta actividad sísmica, como es el caso de Chile, tienen que obligatoriamente revisar y hasta diseñar elementos especiales para satisfacer la demanda de esfuerzos de las sollicitaciones sísmicas.

La naturaleza de las sollicitaciones sísmicas se materializa a través de fuerzas inerciales debidas a la masa inherente del edificio y las aceleraciones que se transmiten a través de la vibración de suelo y la estructura. Esto hace que en los edificios altos, junto con aumentar la altura, también se aumenta la masa que participa de este fenómeno, lo que a su vez aumenta las fuerzas inerciales. También los elementos estructurales verticales como columnas y muros pueden colapsar debido a efectos secundarios que se suman a los esfuerzos que normalmente soportan. Estos efectos secundarios tienen que ver con el efecto $p-\Delta$ sobre la estructura, a mayor fuerza vertical, mayores desplazamientos, por lo tanto mayor será el efecto $p-\Delta$.

Otro aspecto importante a considerar es que los edificios altos por lo general poseen periodos fundamentales mayores a los de edificios normales. Esto hace que las aceleraciones que posee un fenómeno sísmico tenga dos efectos: si es de corta duración, las aceleraciones no van a afectar mayormente al edificio; pero si este es prolongado, puede existir una amplificación del efecto mientras más cercano este al periodo natural de la estructura. Aquí también influye la interacción suelo-estructura ya que va a depender de cómo se hicieron las fundaciones y del tipo de suelo que existe bajo éstas, para determinar la influencia del movimiento sobre la estructura.

Si bien los eventos sísmicos severos suceden con menor frecuencia que el viento, estos poseen consecuencias devastadoras si no se toman las medidas previsoras pertinentes. Es necesario tener un control sobre los desplazamientos que suceden en la estructura para evitar daños en elementos no estructurales como los tabiques, muros cortina, etc. como los artículos que existen dentro de las oficinas por no mencionar las vidas de las personas que utilizan y habitan estos edificios.

El desplazamiento entrepisos es un elemento muy importante a ser controlado ya que ayuda a cumplir con los objetivos anteriores. Si bien la norma chilena cumple con esto controlando desde hace años el desplazamiento entrepisos para todo tipo de estructuras, en el caso de normas y códigos extranjeros sólo se plantean límites de esfuerzos sobre elementos estructurales, los que pueden no ser exitosos en proteger a los ocupantes o los elementos no estructurales.

II.4. Diseño sísmico de edificios altos.

Los edificios altos, como cualquier estructura, van a estar sujetos a un planteamiento previo, es decir, que solución estructural usar para poder resistir los esfuerzos. Dependiendo de la cantidad de pisos o altura que se desee alcanzar van a existir diversas soluciones estructurales. También dependiendo de la región en que se construye existen ciertos materiales que poseen mayor o menor disponibilidad.

Principalmente en una estructura alta se debe buscar una serie de elementos claves que faciliten el flujo de esfuerzos, agilicen la construcción, minimicen los costos, etc.

El principal es la simetría. Un edificio alto debe ser preferentemente simétrico tanto en planta como en elevación. Esto sirve para evitar efectos inducidos debido a excentricidades de la rigidez en ciertas zonas, con el objeto de evitar las aperturas en losas o muros de manera desordenada, además de buscar la continuidad de ciertos elementos principales.

Los sistemas estructurales que resisten los esfuerzos laterales deben poseer controles en sus desplazamientos relativos entrepisos así como de esfuerzos en sus elementos para evitar fallas frágiles.

Un edificio estructurado en base a marcos tendrá deformaciones mucho más grandes entrepisos, por lo que se debe asegurar que, si bien es estructuralmente seguro, también lo sea económicamente debido a los daños que puede causar a elementos no estructurales.

Por otro lado, un edificio estructurado en base a muro de corte o un marco con riostras es mucho más rígido que un marco espacial. Esto hace que las deformaciones producidas sean mucho más pequeñas, por ende, causando menos daño. También, se debe considerar que aperturas excesivas pueden afectar su comportamiento. Además, es necesario tener cuidado con el suelo bajo estos elementos. Ya que si es muy blando puede provocar deformaciones diferenciales que causarían daños en el muro.

Es necesario que los diafragmas de la estructura (losas o techos) posean la suficiente resistencia para transmitir el corte o flexión, según sea lo requerido, al sistema que resiste los esfuerzos laterales. Aperturas mal localizadas o mal reforzadas pueden causar fallas.

En general, es necesario ver el sistema estructural como un todo, no individualmente como muros, losas, columnas y vigas. El verlo como un sistema integrado que va a sufrir grandes esfuerzos, algunos más allá de su rango elástico, y que éstos pueden hacer fallar ciertas partes del sistema. Sin embargo, deben existir otros elementos (redundantes) que estarán dispuestos a soportar la redistribución de esfuerzos y que ayudaran a la estabilidad y seguridad del edificio.

II.5. Sistemas de resistencia de esfuerzos laterales.

A grandes rasgos actualmente podemos separar los sistemas de resistencia de esfuerzos laterales según los materiales utilizados (Stafford, B. y Coull, A. (1), CTBUH (2), Bungale Taranath (5)). Estos son:

- Estructura de acero.
- Estructura de hormigón armado.
- Estructura compuesta.

II.5.1. Estructuras de Acero.

Las estructuras de acero han sido por largo tiempo las más utilizadas a la hora de construir edificios altos. Esto se debe a sus especiales características estructurales que hacen del acero un material dúctil, liviano y extremadamente flexible a las diversas formas de los edificios de ayer y de hoy.

Existen diversos tipos de soluciones estructurales de acero utilizadas en distintos tipos de edificios. Algunas de ellas son:

- Marcos rígidos.
- Marcos con riostras.
- Sistema de riostra escalonado.
- Riostras excéntricas.
- Sistemas interactivos de riostras y marcos.
- Riostras internas y perimetrales (*Outrigger and belt truss*).
- Sistema de marco tubular.
- Sistema de tubo con riostras.

La utilización de estos sistemas dependerá de los requerimientos arquitectónicos y de sollicitaciones que tenga la estructura. También es muy común la utilización de muchas de estas soluciones en un mismo sistema resistente.

II.5.2. Estructuras de hormigón armado.

El hormigón armado, al igual que el acero, posee un variado grupo de sistemas diseñados para resistir los esfuerzos laterales. El hormigón armado ha ido adquiriendo mayor participación en el escenario de los edificios altos debido a sus bajos costos asociados a la construcción y las altas resistencias que se pueden obtener con hormigones de última generación.

Si bien la forma de construcción del hormigón es in situ, principalmente, los sistemas resistentes de fuerzas laterales son muy parecidos a los expuestos para el caso de acero. Algunos de ellos son:

- Columna y losa actuando como marco.
- Muros y losa.
- Muros, losa y columnas.
- Muros interconectados por vigas o losas.
- Marcos rígidos.
- Tubo perimetral tipo marco espaciado.
- Núcleo de muros de corte.
- Sistema marco núcleo de muros.
- Marco tubular.
- Tubo con diagonales exteriores.
- Sistemas mixtos.

II.5.3. Estructura compuesta.

Hoy en día no se puede pensar en un edificio construido íntegramente de un solo material. Esto, junto con ingeniosas formas para hacer interactuar el acero con el hormigón, utilizando los sistemas estructurales presentados anteriormente, ha dado pie a una utilización compuesta de estos materiales.

Desde las losas, vigas, columnas hasta los muros y riostras pueden ser transformados con la utilización compuesta de hormigón y perfiles de acero.

Uno de los casos más interesantes es el de las mega-columnas del Taipéi 101 donde éstas se encuentran conformadas por un perfil tipo cajón de grandes dimensiones (2,4 x 3,0 metros en la base) que difícilmente se podría realizar sólo con acero debido a sus altos costos. Esta columna es llenada en su interior con hormigón armado otorgándole toda la resistencia a compresión del hormigón y el confinamiento de acero le otorga ductilidad más allá de lo que tendría normalmente, haciendo de la mega-columna una pieza estructural única.

Otro caso más masivo es el de las losas tipo *deck* que unen la resistencia de las planchas de acero con una losa de hormigón más delgada de lo normal. Esto aumenta la rapidez de la construcción y elimina la necesidad de moldaje para la losa.

También las vigas pueden ser configuradas de manera compuesta, introduciendo perfiles de acero a la viga de hormigón armado lo que le otorgará mayor resistencia.

Asimismo, los muros de corte logran adquirir nueva resistencia al dejar perfiles metálicos, por ejemplo marcos con riostras, dentro de éstos.

Esta gama de posibilidades de elementos compuestos origina una serie de sistemas compuestos para resistir esfuerzos laterales. Algunos de éstos son:

- Sistemas con muros de corte en el núcleo (compuesto).
- Sistemas con núcleo de muros (hormigón armado) y marco (acero).
- Sistemas de tubo (compuesto).
- Sistemas verticales mixtos (muros y marcos superpuestos, etc.).
- Mega-marcos con mega-columnas.

CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DE INDICADORES.

III.1. Descripción de indicadores.

Los indicadores utilizados en los distintos modelos de edificios se dividen en dos grupos: los que se heredan del perfil Bío-Sísmico y los nuevos propuestos, para calificar mejor el comportamiento de los edificios altos.

III.1.1. Indicadores del perfil Bío-Sísmico.

III.1.1.1. Indicadores de Rigidez

1. Altura total / periodo primer modo traslacional:

$$\frac{H}{T}$$

Este indicador representa un muy buen estimador de la rigidez de un edificio. Sin embargo, del uso de éste indicador se desprende una discusión extra, sobre que periodo usar. Tradicionalmente se utiliza el modo con mayor masa traslacional, pero éste es sólo un tipo de ordenamiento. También los modos se pueden ordenar por magnitud, por participación en el corte basal, por energía, etc.

El ordenar los modos según estas diferentes condiciones va a incidir en los rangos de calificación de este parámetro de rigidez traslacional de la estructura.

En el caso de este parámetro se continúa determinando con el periodo de mayor masa traslacional y se incluye como un nuevo candidato a parámetro un indicador utilizando el periodo con mayor aporte al corte basal de la estructura.

2. Efecto P- Δ :

$$\frac{M_{P-\Delta}}{M_{Basal}}$$

Se debe notar que su utilización como indicador de rigidez se ve reducida debido a que en la práctica el control de los desplazamientos es restringido por la norma chilena. Sin embargo, puede ser importante para el caso de edificios altos.

3. Desplazamiento del nivel superior:

$$1000 \cdot \frac{\delta}{H}$$

La norma chilena si bien no restringe este parámetro, sí lo hace con los desplazamientos de entrepiso (NCh433.Of96, 12). Pero se ha observado que en muchas normas extranjeras se restringe este parámetro o se usa como punto de control del comportamiento de la estructura.

4. Desplazamiento máximo entrepiso en centro de gravedad:

$$1000 \cdot \frac{\delta_{\text{centro_gravedad}}}{h}$$

Esta limitación se ve controlada en la norma chilena NCh433.Of96 (12), por lo que los edificios chilenos se ven obligados a cumplirla. Sin embargo, las distintas formas de estructurar los edificios altos reflejarán si algo de esta filosofía existe en su diseño.

5. Desplazamiento adicional máximo entrepiso en puntos extremos:

$$1000 \cdot \frac{\delta_{\text{extremo}}}{h}$$

Debido a las formas de estructurar los edificios altos, en las que generalmente existen dos zonas resistentes a los esfuerzos (el núcleo y el perímetro de la planta), los desplazamientos generados en los extremos pueden ser muy distintos a los del centro de gravedad. Esto se explica porque al utilizar el desplazamiento en el centro de gravedad no se considera los efectos de la rotación de la planta, que sí son importantes en puntos extremos. En éstos, los efectos de las rotaciones pueden aumentar o disminuir considerablemente los desplazamientos. Este parámetro permite controlar los desplazamientos en los elementos perimetrales.

III.1.1.2. Indicadores de Acoplamiento

6. Periodo rotacional / Periodo traslacional:

$$\frac{T_{\text{rotacional}}}{T_{\text{traslacional}}}$$

Como está señalado en el perfil Bío-Sísmico de Guendelman et al (3), lo recomendable para las estructuras es que la razón entre los periodos traslacional y rotacional con respecto a un eje vertical se aleje de la unidad. Esto debido al fenómeno

llamado sintonía modal, que puede provocar amplificaciones dinámicas en la respuesta de la estructura.

7. Masa equivalente rotacional acoplada / Masa equivalente traslacional directa:

$$\frac{M_{\text{rot_acoplada}}}{M_{\text{tras_directa}}}$$

Ayuda a complementar las características de acoplamiento que pudiesen existir. Se calcula a partir de la razón entre la masa equivalente rotacional que se produce en el modo de más importancia traslacional y la masa traslacional directa de ese modo.

8. Excentricidad Dinámica / Radio de giro basal:

$$\frac{\left(\frac{M_{\text{torsor_basal}}}{Q_{\text{basal}}} \right)}{r_{\text{basal}}}$$

Esta es otra forma de calificar el acoplamiento dinámico. Se calcula como el cociente entre la excentricidad dinámica y el radio de giro basal. A su vez, la excentricidad dinámica se calcula como el momento torsor basal dividido en el corte basal. Por otra parte, el radio de giro es igual a la raíz cuadrada de la inercia rotacional de la planta de la estructura.

9. Masa equivalente traslacional acoplada / Masa equivalente traslacional directa:

$$\frac{M_{\text{tras_acoplada}}}{M_{\text{tras_directa}}}$$

Del mismo modo que el punto 7, busca relacionar de otra forma el grado de acoplamiento de la estructura relacionando la masa equivalente traslacional acoplada con la directa.

10. Corte basal acoplado / Corte basal directo:

$$\frac{Q_{\text{basal_acoplado}}}{Q_{\text{basal_directo}}}$$

En este caso se relaciona el corte basal acoplado, es decir, el corte basal producido en la dirección perpendicular a la dirección de aplicación del sismo en el modelo, versus el corte basal que va en la misma dirección, es decir, directo.

11. Momento volcante basal acoplado / Momento volcante basal directo:

$$\frac{M_{\text{volcante_acoplado}}}{M_{\text{volcante_directo}}}$$

Al igual que el punto anterior se buscan relacionar los acoplamientos que se producen en la estructura entre los esfuerzos acoplados contra los directos, en este caso, del momento volcante basal.

III.1.1.3. Indicadores de Redundancia Estructural y Demanda de Ductilidad.

12. Número de elementos estructurales en la resistencia sísmica:

Este parámetro calificara cualitativamente la redundancia estructural que posee un edificio. Esto es especialmente importante cuando las sollicitaciones sísmicas llevan a la estructura al incursionar en el rango no lineal redistribuyendo los esfuerzos en la estructura.

Su valor será calculado de la siguiente manera: va ser igual al número de elementos basales que logren acumular el 90% del corte basal y/o aquellos elementos cuyo corte sea mayor al 10% del corte basal.

13. Factor de Reducción Espectral Efectivo:

Como menciona Guendelman et al (3), el Factor de Modificación de Respuesta es un concepto actualmente aceptado en todo el mundo, que ayuda a generar un sismo de diseño para el análisis lineal de una estructura.

En Chile la norma establece que el diseño se debe obtener de un análisis sísmico dinámico, con un espectro elástico reducido por el factor R^* . Éste está en función del Factor de Modificación de Respuesta y el periodo de mayor masa traslacional. Pero a su vez estos resultados deben modificarse según el corte basal, amplificándolos si el corte basal es menor al corte basal mínimo, o reduciéndolos, si fuese superior al corte basal máximo. Además, la acción sísmica debe amplificarse por 1.4 según el método de factores de carga y resistencia para el diseño de la estructura. Todo esto permitió definir un Factor de Reducción Espectral Efectivo R^{**} , que es:

$$R^{**} = \frac{R^*}{1.4 \cdot f_{\min} \cdot f_{\max}}$$

Donde:

R^* : factor de reducción de la aceleración espectral.
 f_{\min} : factor de amplificación por corte basal mínimo.
 f_{\max} : factor de reducción por corte basal máximo.

III.1.2. Nuevos indicadores.

1. Altura total / Periodo ordenado por aporte al corte basal:

$$\frac{H}{T_{OxCB}}$$

Se busco ver la influencia que tiene el ordenamiento de los periodos modales de la estructura como indicadores de la rigidez. Por esto se ordenaron los periodos modales de cada edificio según su aporte al corte basal.

2. Esbeltez:

$$\frac{H}{B}$$

Se define como la razón entre la altura del edificio y el ancho de la base. El ancho de la base B, se define como el contorno de la planta que encierra a todos los elementos estructurales definidos en el parámetro 12 del perfil Bío-Sísmico.

Este parámetro geométrico del edificio puede darnos una idea a priori del comportamiento que va a tener la estructura, ya que se ve relacionado con la estabilidad.

3. Relación altura total / periodo primer modo rotacional:

$$\frac{H}{T_{rotacional}}$$

Se buscó observar el comportamiento de este valor en los distintos edificios altos ya que la torsión en estructuras de este tipo puede ser un factor relevante a considerar.

4. Densidad de muros:

Se define como la superficie utilizada por muros y columnas resistentes en una dirección dada dividido por la superficie del piso que ocupan.

En el comentario de la norma NCh433.Of96 (12) se plantea un rango “saludable” de densidad de muros del orden del 2% a 3% en cada dirección, esto debido a la experiencia chilena con edificios estructurados en base a muros y que han soportado los embates de los sismos recientes.

Este parámetro solo se calculara en edificios con elementos estructurales de hormigón armado.

Sera interesante observar el valor de este parámetro en edificios altos debido a que la gran mayoría de los edificios posee reducciones del área a medida que este va

alcanzando mayores alturas, lo que hace cambiar la superficie de piso. Además las características geométricas de los elementos estructurales van variando también en altura, disminuyendo los anchos de los muros o las secciones de las columnas.

Es por esto que se decidió calcular tres densidades:

- a) **Densidad de muros local:** Se detallara una densidad por piso lo que dará cuenta de cómo varia este parámetro en altura.
- b) **Densidad de muros global:** Se promediara las densidades de muro locales para determinar un valor característico de la estructura. Las densidades locales que se consideraran serán aquellas que superen el 1% para no castigar el valor basal de este parámetro.
- c) **Densidad de muros basal:** Sera interesante observar cual es el valor de este parámetro en la base que es donde se transmiten los esfuerzos a la fundación.

CAPÍTULO IV: OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN DE EDIFICIOS ALTOS.

IV.1. Introducción.

Actualmente, en el mundo, existen muchos de edificios que caen en la categoría impuesta por esta memoria como edificios altos. Luego, fue necesario acotar los edificios candidatos a ser modelados. Con el fin que este estudio tenga información vigente a largo plazo para la realidad nacional, se consideró elegir los candidatos entre los diez edificios más altos del mundo. Además, los edificios deben estar ubicados en zonas atractivas desde el punto de vista de la investigación, es decir, zonas con actividad sísmica y/o zonas con vientos intensos, o poseer características estructurales interesantes desde el punto de vista de la ingeniería.

Dada estas características se escogieron los siguientes 4 edificios:

- 1) La Torre Jin Mao, Shanghái.
- 2) El Taipéi 101, Taipéi.
- 3) Torres Petronas, Kuala Lumpur.
- 4) Central Plaza, Hong Kong.

En este capítulo se describen estos edificios otorgando datos generales como específicos respecto a su estructura. Así también, se entrega información relevante respecto a resultados de análisis previos publicados que ayudaron a calibrar los modelos aproximados.

IV.2. Información de edificios altos.

IV.2.1. La Torre Jin Mao.

IV.2.1.1. Detalles de la estructura.

La Torre Jin Mao se ubica en Shanghái, China. Este proyecto concentra cerca de 280.000 m² de espacio para oficinas, un hotel y tiendas de comercio (Wikipedia, 14). El edificio inició su construcción en 1994 y fue terminado en 1998. Tanto la arquitectura como el diseño estructural estuvo a cargo de la oficina Skidmore, Owings & Merrill.

El proyecto consiste en un edificio de 88 pisos útiles (la altura hasta este piso es de 366 metros) más una antena que eleva su altura hasta los 421 metros, siendo el quinto edificio más alto del mundo. El espacio es utilizado por oficinas en los 50 primeros pisos, un hotel en los 38 pisos siguientes y un gran estacionamiento en 3 pisos subterráneos.

Según la investigación de Korista, Sarkisian y Abdelrazaq (4) el edificio se encuentra diseñado, tanto estructural como arquitectónicamente, respetando la antigua tradición China del feng-shui utilizando repetitivamente el número 8 como base de un sin número de elementos. El edificio posee 88 pisos utilizables, 8 mega-columnas de hormigón armado y acero, el centro está ocupado por muros de corte que se reparten formando un octágono, posee 8 columnas de acero para soportar cargas gravitacionales, etc. Además la forma de este edificio se inspira en las pagodas chinas, un tipo de construcción muy tradicional. (Ver figura 3)



Figura 3. A la izquierda una pagoda china y a la derecha la torre Jin Mao una pagoda del siglo XXI.

El conjunto de elementos estructurales del edificio para las cargas laterales de viento y sismo, para las que fue diseñado según Korista et al (4), está compuesta por:

- **Mega-columnas.** 8 mega-columnas de hormigón armado con acero estructural que van desde el subterráneo hasta el piso 88. Están compuestas de un 1% de refuerzo de acero

para el armado y entre 1% y 2% de acero estructural. El tipo de hormigón va variando según la altura, desde un hormigón de alta capacidad C60 ($R_{28}=60$ MPa) que parte en la base hasta el piso 31, luego pasa a un C50 hasta el piso 64 y llega a un C40 utilizado hasta el último piso.

- **Núcleo de muros de hormigón armado.** Estos poseen dos disposiciones típicas que se repiten en altura:
 - o Piso -3 al 53: esta sección la conforman 8 muros de hormigón armado con forma de T (aproximada) y que en planta logran el efecto de un octágono. El interior de este octágono es el que alberga los distintos elevadores y shafts de los pisos de oficina. (Ver figura 4)

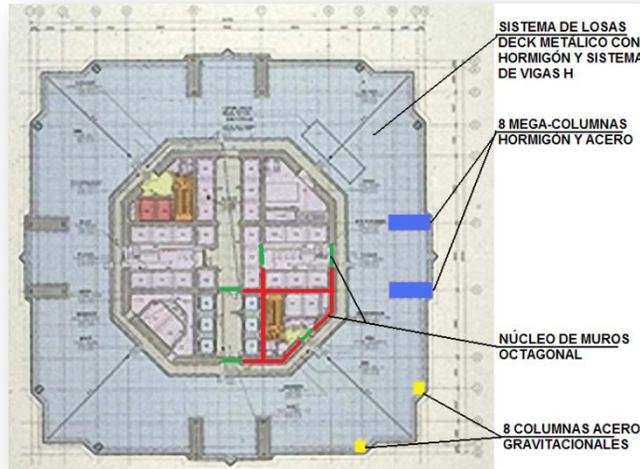


Figura 4. Planta tipo zona oficinas.

- o Piso 54 al 88: esta parte la conforma sólo el octágono de muros de hormigón armado, dejando un espacio libre en el medio o atrium. Cabe señalar que si bien el atrium se ubica en el interior del octágono, no utiliza toda el área. Toda esta zona es la utilizada por el hotel que posee el edificio (Figura 5).

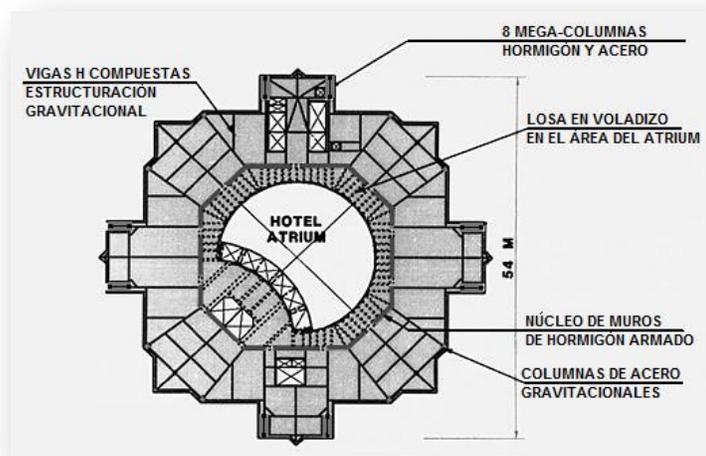


Figura 5. Planta tipo zona hotel (atrium).

Los muros varían sus espesores desde los 850mm partiendo de la base hasta el piso 17, 750mm hasta el piso 31, 700mm hasta el piso 55, 650mm hasta el piso 64 y 450mm en los últimos pisos. La distribución del concreto utilizado en cada una de estas partes sigue la misma variación que el caso de las mega-columnas.

- **Riostras de acero (*Outrigger Truss*)**. En tres niveles de la estructura se ubican riostras de acero de dos pisos de altura que unen las mega-columnas con el núcleo de muros. Esto hace que la estructura funcione para cargas laterales como un sistema de 3 mega-marcos superpuestos. (Ver figura 6)
- **Enrejado superior de acero (*Cap Truss*)**. Este enrejado que aumenta el número de pisos a 93 funciona como un “techo” mecánico que une el trabajo de las columnas frente a cargas laterales. (Ver figura 6)

Adicionalmente a estos elementos el edificio cuenta con una piscina en el piso 57 que actúa como un disipador pasivo de energía. También los pernos de las uniones de los enrejados están hechos para disipar energía al corte.



Figura 6. Sección de la Torre Jin Mao.

IV.2.1.2. Datos del comportamiento.

Según la investigación de Korista et al (4) el periodo fundamental de la estructura es alrededor de los 6.0 segundos. Según Taranath (5) el edificio posee un periodo de 5.7 segundos en las direcciones traslacionales y 2.5 segundos en el modo rotacional.

Korista (4) también menciona los resultados del análisis sísmico de la estructura que son resumidos en la siguiente tabla.

Tabla 1. Tabla resumen con los resultados del edificio Jin Mao.

Criterio de diseño Método de análisis	Corte Basal [kN]	Desplazamiento de nivel superior	Desplazamiento entrepiso
Análisis Dinámico usando espectro de respuesta (Código de diseño sísmico de Shanghái)	23940	H/1928	h/1928
Análisis Dinámico Tiempo Historia (Código de diseño sísmico de Shanghái)	25403	H/1476	h/1476
Análisis Dinámico usando espectro de respuesta (Sismo con 63% de probabilidad de ocurrencia en 50 años)	15000	H/4170	h/4166

IV.2.2. Taipéi 101.

IV.2.2.1. Detalles de la estructura.

El Taipéi 101 se encuentra ubicado en el distrito de Hsinyi en la ciudad de Taipéi, capital de Taiwán. La construcción comenzó en enero de 1998 y terminó en diciembre de 2004. El edificio tuvo su primera prueba de resistencia en marzo del 2002 cuando un terremoto de 6.8 grados en escala Richter azotó la ciudad y produjo la muerte de 7 personas debido a la caída de dos grúas desde el piso 56, el último hasta ese momento. (Wikipedia, 15)

La arquitectura del edificio estuvo a cargo de la oficina de C. Y. Lee y el diseño estructural estuvo en las manos de la oficina de ingeniería de Taiwán, Evergreen Engineering y la oficina americana Thornton Tomasetti.

Así como la Torre Jin Mao, el Taipéi 101 se inspira en la tradición oriental del feng-shui. Nuevamente el número 8 aquí es un actor principal, ya que 8 son las mega-columnas, 8 las sub-mega-columnas, hay 8 secciones de 8 pisos que se repiten desde el piso 27, etc., un sinnúmero de detalles estructurales como arquitectónicos. También cabe destacar que la figura del Taipéi 101 se inspira en la forma de una caña de bambú. (ver figura 7)



Figura 7. El bambú es la fuente de inspiración del Taipéi 101.

El edificio posee 509 metros de altura hasta la cúspide de la torre de comunicaciones, que posee en la parte superior. Sin embargo, su altura hasta el último piso, el 101, es de 438 metros, convirtiéndolo en el edificio más alto del mundo en la actualidad. El espacio es utilizado principalmente por oficinas (desde el 7º piso al 84º). Los pisos inferiores son utilizados por tiendas comerciales (1º al 4º piso) y un gimnasio (del 5º al 6º piso). En los pisos 86 y 88 se ubican restaurantes y miradores turísticos en los niveles 89, 91 y 101. Entre el piso 92 y el 100 posee instalaciones de comunicación.

Debido a que Taipéi se encuentra en una zona sísmicamente activa y que además es azotada regularmente por tifones, exigió que la forma de diseñar esta obra fuera un gran reto a la ingeniería en cuanto a sus sistemas estructurales. El detalle de estos según la investigación de Shieh, Chang, Jong (9) es:

- **Mega-Columnas.** 8 Mega-Columnas CFT (*Concrete Filled Tube*: tubo de acero lleno de concreto) hasta el piso 62, ya que desde ese piso hacia arriba dejan de estar llenas de hormigón. Las dimensiones de estas varían desde los 2,4 x 3,0 metros en la base hasta llegar a 1,6 x 2,0 metros en los últimos pisos.
- **Sub-Mega-Columnas.** 8 Sub-Mega-Columnas CFT que llegan hasta el piso 26.
- **Columnas de las esquinas.** 8 Columnas CFT en las esquinas del edificio hasta el piso 26.
- **Núcleo del edificio.** 16 Columnas CFT con riostras entre ellas que conforman el núcleo del edificio. Estas llegan hasta el piso 62 como columnas CFT para seguir desde este piso hacia arriba con secciones de acero tipo cajón.

Para ver una distribución en planta de todos los elementos descritos anteriormente ver figura 8.

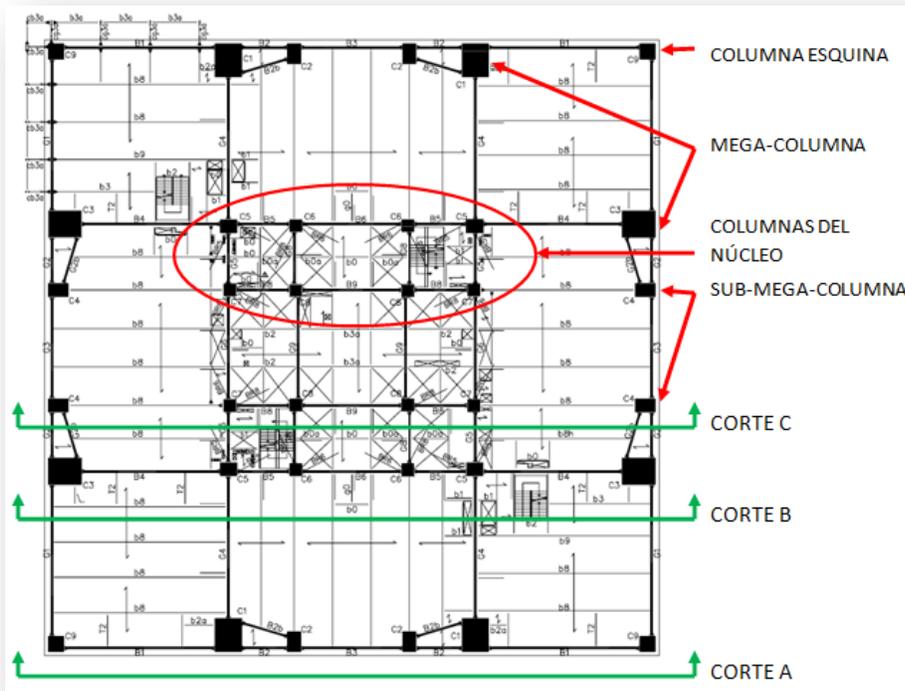


Figura 8. Detalle de una planta tipo.

- **Marco especial para resistencia del momento o SMRF (*Special Moment Resisting Frame*).** Este sistema se ubica en todo el perímetro uniendo las columnas creando una grilla, siguiendo la forma exterior de la torre. Cada 8 pisos las cargas son transmitidas desde el SMRF a las Mega-Columnas.
- **Riostras del núcleo.** Entre las columnas del núcleo se ubica un sistema de riostras y vigas. Estos varían entre diagonales y riostras tipo chevron dependiendo de la ubicación de entradas a la zona de elevadores y puertas.

- **Muro de hormigón armado.** Desde el subterráneo hasta el piso 8 la zona que comprende el núcleo del edificio posee muros de corte de hormigón armado dejando las riostras de acero adentro del hormigón.
- **Sistemas de riostras de acero.** Para unir el núcleo al perímetro se ubican 11 riostras tipo “*Outrigger Truss*” 6 de ellos de un piso de altura y 5 de dos pisos de altura. También se agrega a este sistema otro tipo de riostras perimetral tipo “*Belt truss*”. Para ver los elementos descritos anteriormente (SMRF al Sistema de riostras de acero) ver figura 9.

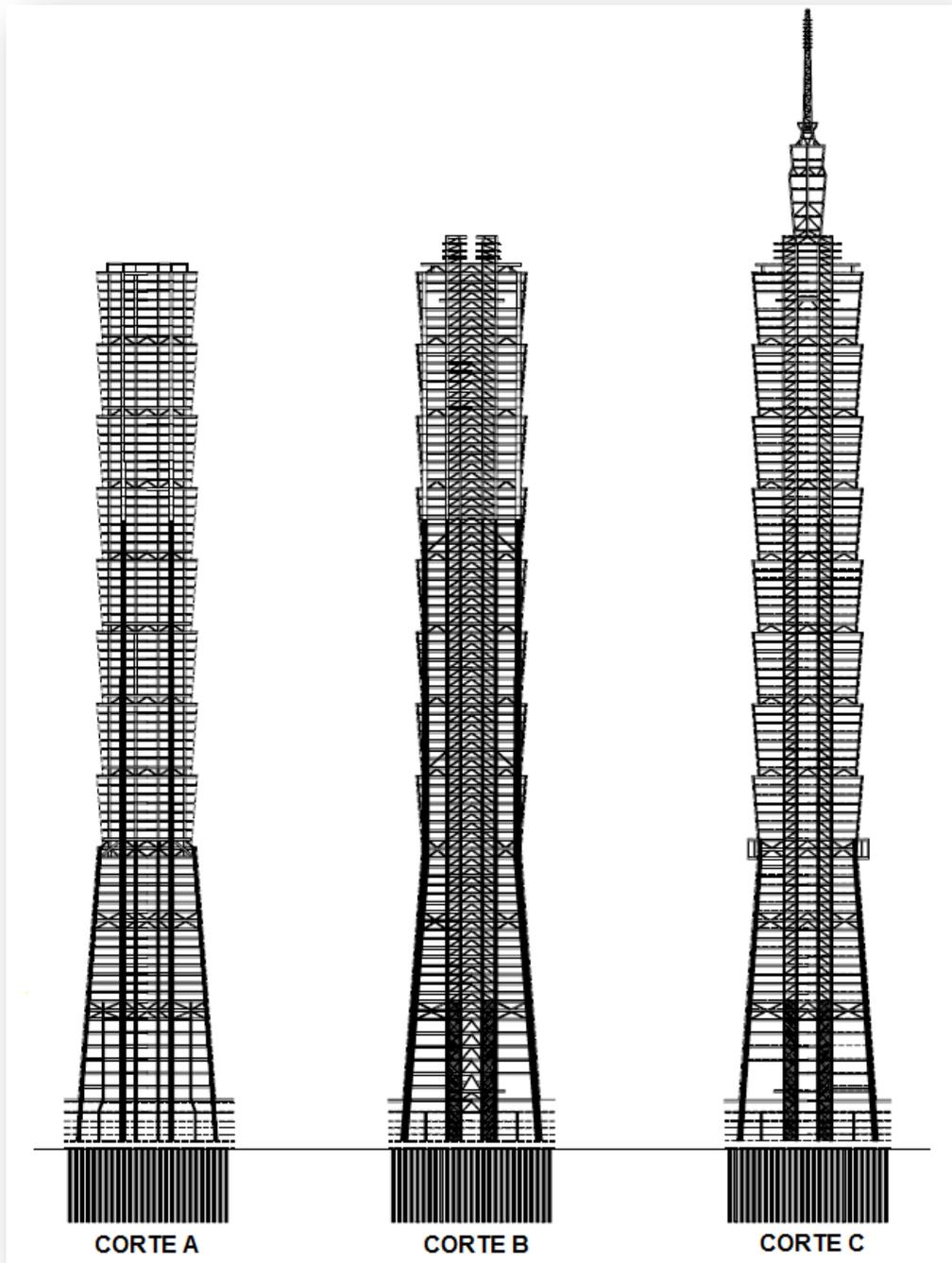


Figura 9. Sección del Taipéi 101.

Además de estos sistemas estructurales el edificio posee el amortiguador de masa sintonizada más grande del mundo. Pesa 662 toneladas, se encuentra colgado desde el piso 92 hasta el piso 88 y se encuentra visible para el público. (Ver figura 10)



Figura 10. Amortiguador de masa sintonizada.

Todos los elementos que utilizan hormigón, según Shieh et al (9), usan un hormigón de alta resistencia de 10.000 psi. Esto se traduciría como un hormigón C70 ($f_c' = 70$ MPa) aunque se menciona que la resistencia de este sigue aumentando (12.000 psi) pero se utilizará el primer valor para no favorecer tanto el comportamiento del edificio.

IV.2.2.2. Datos del comportamiento.

El periodo del primer modo traslacional es aproximadamente de 7 segundos según el Ingeniero Ching-Chang Chang de la empresa Evergreen Engineering.

Además la estructura está diseñada para un desplazamiento entre piso menor al $h/100$ desde el 91º piso hacia abajo.

IV.2.3. Las Torres Petronas.

IV.2.3.1. Detalles de la estructura.

Las Torres Petronas se ubican en la ciudad de Kuala Lumpur, capital de Malasia, como estructuras principales de un gran complejo llamado "*Kuala Lumpur City Center*" (ver figura 11). El complejo está compuesto por dos edificios gemelos (las torres) que se levantan 452 metros de altura y fueron los edificios más altos del mundo calificados por el CTBUH hasta el 2004. (Wikipedia, 16)

Su construcción empezó el año 1992 y terminó el año 1998. La arquitectura fue diseñada por el prestigioso arquitecto Cesar Pelli y la ingeniería estructural estuvo en manos de Thornton Tomasetti y la oficina de Malasia de Rahnill Bersekutu Sdn Bhd.

Cada edificio posee 218.000 metros cuadrados para oficinas repartidos en 88 pisos. En los pisos 41 y 42 se encuentra un centro de distribución de ascensores llamado "*Sky Lobby*" que es donde además se encuentra su famoso puente que conecta ambas estructuras.

Con una altura de 375 metros hasta el piso 88 y 452 metros hasta la antena, son los segundos edificios más altos del mundo actualmente.



Figura 11. Las Torres Petronas.

Si bien la zona no es activa sísmicamente, posee un clima tropical. Esto junto con los requerimientos arquitectónicos otorgó a la estructura, según la investigación de Mohamad, Choon, Azam y Tong (8) y Abada (10) las siguientes características:

- **16 Columnas de hormigón armado.** Estas columnas forman parte de un marco tubular que rodea el núcleo en forma circular. Las columnas están unidas unas a otras por vigas de hormigón armado en todos los pisos. El hormigón utilizado es de alta resistencia, partiendo con un C80 en la base pasando por un C60 y llegando a un C40 en los pisos superiores. El diámetro de las columnas se inicia con 2.4 metros pero este va disminuyendo a medida que el edificio va adquiriendo altura. En los pisos superiores las columnas se empiezan a inclinar hacia el interior y ya en los últimos pisos estas columnas de hormigón armado se transforman en columnas de acero.
- **Núcleo de muros de hormigón armado.** En el centro de cada torre se ubica un núcleo de muros de hormigón armado de 23x23 metros aproximados. Un detalle de estos muros se puede ver en la figura 11. Los muros que componen este núcleo poseen espesores que van desde los 750 mm. hasta los 350 mm. pero los muros más gruesos varían en espesor o van desapareciendo en altura. Esto, con el objetivo de otorgarle más espacio a los pisos superiores que no necesitan tanta resistencia. (ver figura 12)

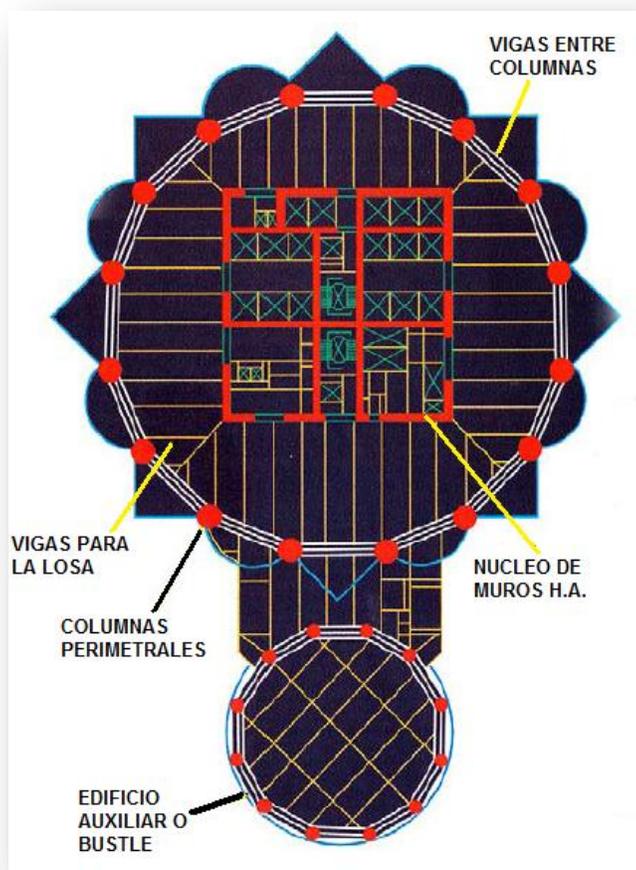


Figura 12. Planta de estructura de un piso tipo.

- **Vigas de traspaso de esfuerzo (Outrigger Beams).** Entre el piso 38 y el 40 se ubica un sistema de vigas que traspasa los esfuerzos desde el anillo de columnas al núcleo de muros, otorgándole mayor rigidez a la estructura. Las vigas poseen grandes dimensiones (1.4 metros de altura) y una columna intermedia que las une entre los pisos para otorgarle mayor estabilidad. Este sistema está conformado por 4 líneas de vigas que se unen a 4 esquinas de los muros de hormigón armado del núcleo. (Ver figura 13)

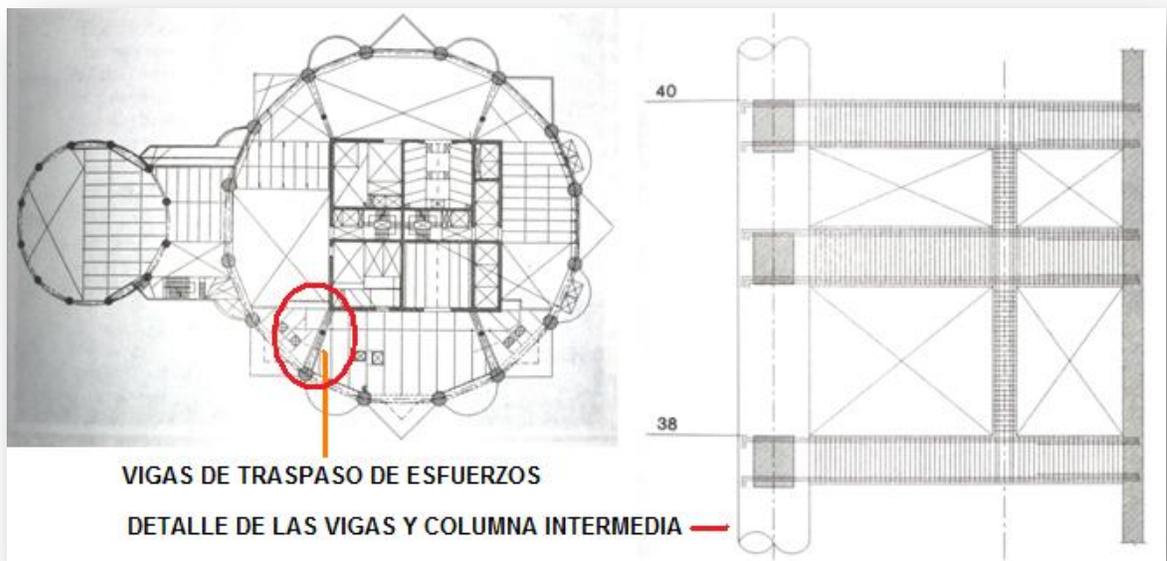


Figura 13. Detalle de la zona de traspaso de esfuerzos.

- **“Bustle” o edificio talón.** La estructura de las torres también está conformada por otro edificio que llega hasta el piso 41, compuesta por un anillo de columnas de hormigón armado unido por vigas del mismo material que parten con un diámetro de 1.4 metros hasta llegar a 1.2 metros en los pisos superiores. Esta estructura está unida por vigas a las columnas correspondientes de la estructura principal, las columnas del “bustle” que se conectan con el edificio mayor poseen un diámetro superior al del resto de las columnas. Este espacio extra sirve para aumentar el área útil destinada a oficinas.

Las torres Petronas están enclavadas en una nación islámica como es Malasia, por esto se encargó que el diseño estuviera inspirado en figuras y monumentos islámicos como son la cruz de 8 puntas y los minaretes de las mezquitas. (Ver figura 14)



Figura 14. Una mezquita, una de las formas inspiradoras de Las Torres Petronas (al fondo).

IV.2.3.2. Datos del comportamiento.

Según la investigación presentada por Mohamad et al (8), esta estructura posee unos periodos de los primeros modos traslacionales de 9 segundos aproximadamente. El tercer modo que es rotacional posee un periodo de 6 segundos aproximadamente. Las formas modales se pueden observar en las siguientes figuras:

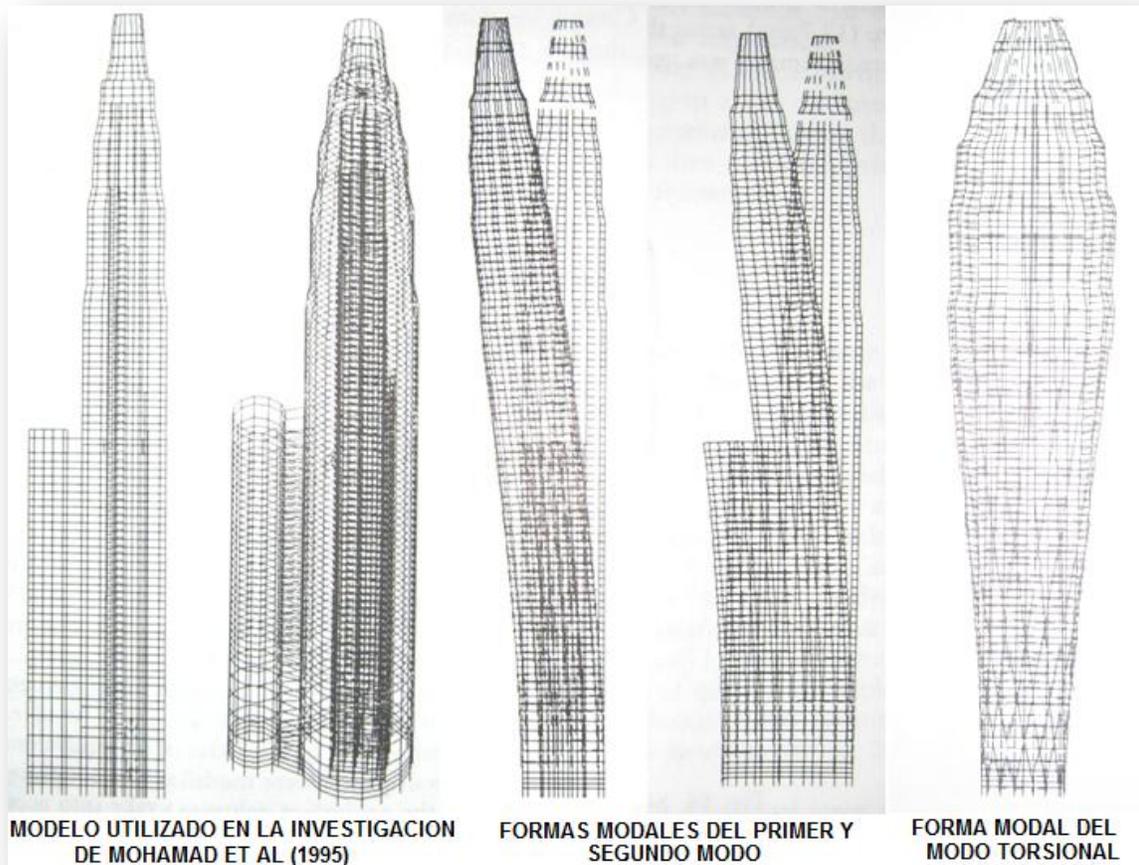


Figura 15. Detalles de la investigación de Mohamad et al (1995).

La estructura está diseñada para un desplazamiento del último piso útil menor a $H/560$. Para el caso de las torres Petronas este desplazamiento tiene el valor límite de 0.67 metros.

IV.2.4. Central Plaza.

IV.2.4.1. Detalles de la estructura.

El Central Plaza se encuentra en la zona de Wan Chai en la ciudad de Hong Kong, China. Este edificio de 374 metros de altura consta de tres secciones: la primera es la base de la torre a la cual corresponden los primeros 30.5 metros de altura, la sección de oficinas de la torre que corresponden a otros 235.4 metros de altura y la parte superior que consiste en pisos mecánicos y un mástil de más de 60 metros. (Ver figura16)

Su rápida construcción comenzó el año 1989 y terminó el 1992 siendo el rascacielos de hormigón armado más alto de Asia. Título que claramente dejó de ostentar debido al rápido crecimiento que ha tenido la zona. Pero actualmente está dentro de los 10 edificios más altos del mundo.

La arquitectura estuvo a cargo de la firma Dennis Lau & Ng Chun Man Architects & Engineers Ltd. Y la ingeniería estructural estuvo a cargo de la empresa Ove Arup & Partners Hong Kong Ltd.

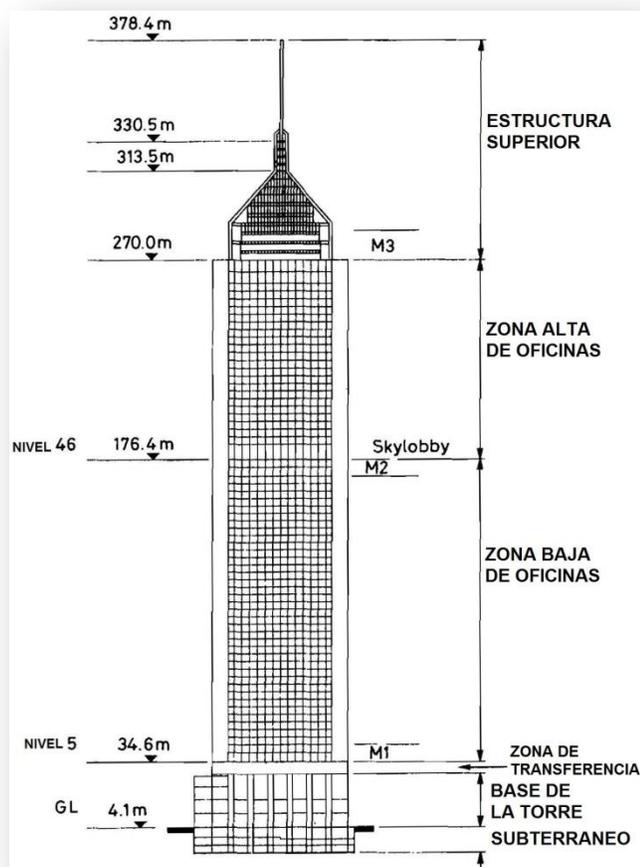


Figura 16. Izquierda un foto aérea del Central Plaza, a la derecha una elevación indicando las distintas zonas.

Este edificio de 78 pisos posee una planta de forma triangular para así favorecer las vistas de las oficinas hacia la bahía. Su estructura se divide en dos zonas. La primera antes mencionada está compuesta por columnas circulares espaciadas cada 9,2 metros para así favorecer el espacio interior de la entrada generando grandes espacios públicos. En esta zona es el núcleo de muros de hormigón armado el que resiste todo el corte que se produce por las fuerzas laterales. La segunda zona está compuesta por 39 columnas cuadradas más pequeñas que van desde los 1,7 metros en los primeros pisos, hasta transformarse en columnas rectangulares en los pisos finales, separadas a 9.6 metros. Todas estas columnas están unidas por grandes vigas que forman una fachada que funciona como marco resistente al momento. En el centro de la estructura se mantienen los muros de hormigón en cuanto a su espesor pero muchos de ellos van desapareciendo a medida que el edificio aumenta su altura. El detalle de la estructura, según la investigación de Ayres y Macarthur (7), se explica a continuación:

- **Columnas de la base.** En los primeros 30 metros de la estructura existen 24 columnas de hormigón armado con un diámetro de 3,0 metros. La distribución de las columnas es como se observa en la figura 16. Hay que destacar que estas columnas no poseen vigas entre ellas hasta el piso 3 que es la zona de transferencia de cargas. (ver figura 17)
- **Núcleo de muros de hormigón armado.** El núcleo está compuesto por una serie de muros de hormigón armado que se dividen en tres grupos paralelos a cada una de las fachadas del edificio. Estos sirven para distribuir los ascensores y escaleras necesarios para el edificio así como *shafts* y zonas de servicio. El espesor de los muros varía según la ubicación que estos posean pero se presenta una distribución en planta en la figura 17 y 18. Además en el núcleo se ubica una gran columna de hormigón armado de 3,5 metros de diámetro que varía en altura hasta llegar a los 1,5 en el piso 75. Cabe destacar que en la parte inferior de la torre (la base) el núcleo está hecho para resistir el 100% de los esfuerzos de corte que presentase la estructura, no así en la parte superior donde su participación no pasa del 10%.

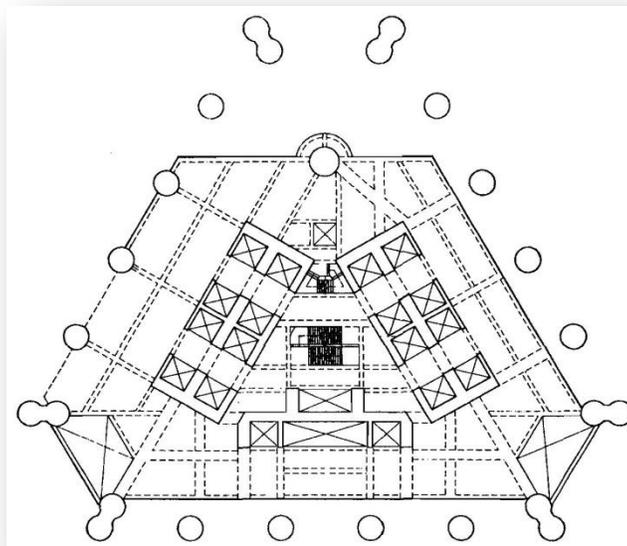


Figura 17. Planta del 2º piso, se pueden apreciar las columnas circulares (perímetro) y los muros del núcleo.

- **Columnas de la torre.** Para el resto de la estructura hasta el piso 70 se ubican en la fachada columnas que varían sus dimensiones así como su distribución a medida que aumentan los pisos. En la primera parte hasta el piso 26 las columnas son cuadradas con 1,7 metros de lado y separadas a 4,6 metros de sus centros. Luego continúan hasta el piso 63 pero con un lado de 1,5 metros, para rematar hasta el piso 69 con una disminución de la mitad de uno de sus lados quedando de 1,5 x 0,75 metros separadas por 9.2 metros de sus centros. Estas se encuentran unidas una a otra en cada piso por vigas de hormigón armado de 1,1 metros de altura. Este sistema conforma un marco resistente al momento que soporta la mayoría de las cargas laterales de la estructura para la parte superior. (Ver figura 18 para distribución en planta de columnas cuadradas)

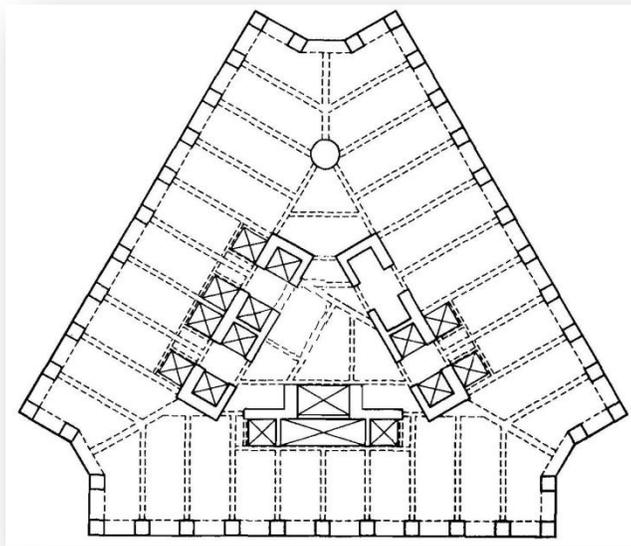


Figura 18. Planta tipo del piso 26, se puede ver la disminución de muros en el núcleo así como el cambio al marco de columnas cuadradas.

- **Zona de transferencia de esfuerzos.** Esta zona está compuesta por una gran viga de 5,5 metros de altura por 2,8 metros de ancho que va desde el piso 3 hasta más allá del piso 4. Esta gran viga sirve para transmitir todos los esfuerzos del marco superior al sistema de columnas inferior que es mucho más flexible y que solo resiste cargas laterales. Todos los esfuerzos de corte son transmitidos a través de una losa de 1,0 metro de espesor que se ubica en el tercer piso. Para asegurar una transferencia de esfuerzos en ese lugar todas las losas se dejan con apoyos deslizantes desde el 7º piso hasta el 1er subterráneo salvo en el 3º piso donde se ubica esta gran losa. (Ver figura 19 para detalle de la zona de transferencia)

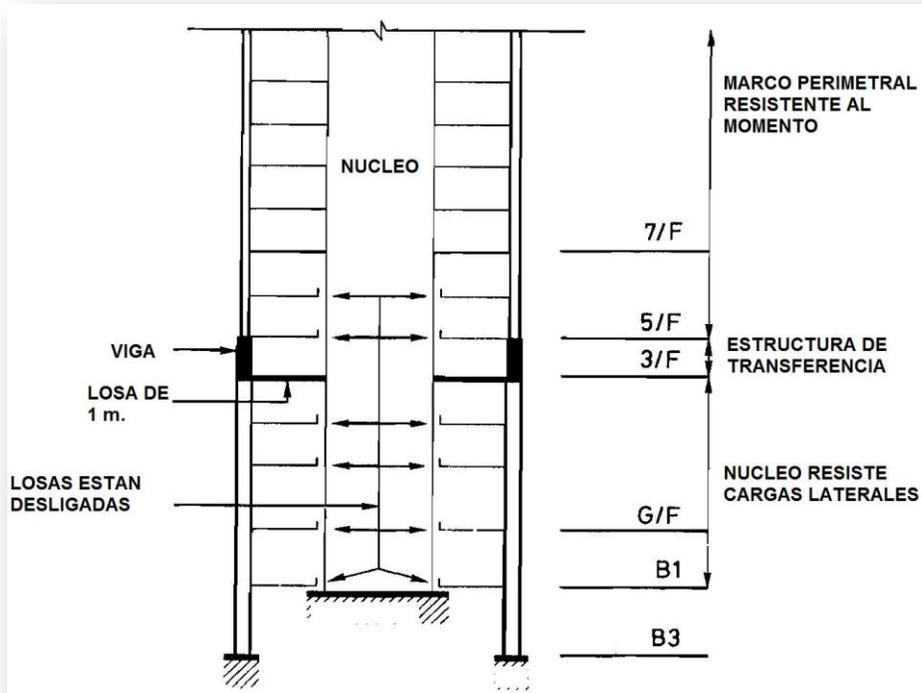


Figura 19. Detalle de la zona de transferencia.

Como parte de la estructura además hay que destacar el eficiente uso de la altura típica de pisos que en este edificio llega a ser de 3,6 metros para dejar una altura útil para las oficinas de 2,6 a 2,7 metros. Esto se logró luego de un gran planeamiento de los servicios para poder optimizar la ubicación de todos los elementos y no necesitar de pisos más altos.

IV.2.4.2. Datos del comportamiento.

Según una investigación publicada por el CTBUH (2) la estructura está diseñada para un desplazamiento máximo de 400 mm. en el piso 75 para un viento con un periodo de retorno de 50 años.

CAPÍTULO V: COMPROBACIÓN DE LOS RESULTADOS DE UN MODELO GENÉRICO EN GT STRUDL.

V.1. Introducción.

La modelación de edificios a través de un software es un proceso muy delicado. Esto debido a que los programas computacionales que se utilizan poseen ciertos supuestos en su programación y distintas “formas de programar”, que si son desconocidas por la persona que realiza el modelo puede resultar en un modelo correcto visualmente, pero que estructuralmente no tendrá el comportamiento real que se desea simular.

Uno de los programas más utilizados en ingeniería estructural es el GT STRUDL, cuyas siglas provienen de *Georgia Tech Structural Design Language*. Su uso abarca el análisis y diseño de estructuras industriales, civiles, hidráulicas, nucleares, etc.

El programa original llamado STRUDL fue creado a finales de 1960 en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), luego éste migro, a comienzos de 1975, al Instituto de Tecnología de Georgia para transformarse en lo que se conoce hoy en día como GT STRUDL.

Este software está siendo constantemente auditado y cumple con las rigurosas normas que lo certifican para el análisis y diseño de un sinfín de estructuras. Pero independiente de todo este largo historial fue necesario corroborar que la metodología de programación que se utilizaría otorgaría resultados que representaran a la estructura real.

Por esta razón se requirió inicialmente realizar un modelo genérico para probar los distintos métodos que ofrece el programa GT Strudl para modelar estructuras. Los resultados conseguidos en los diversos modelos fueron comparados con los obtenidos de un programa confiable, que se utiliza por empresas de ingeniería en la actualidad.

Como programa comparativo se escogió el de la oficina de revisión estructural IEC Ingeniería S.A., el cual ha sido utilizado para la revisión de estructuras en Chile por más de 40 años. Este programa se basa en el método de rigidez.

A través de los distintos modos de programación de un edificio genérico en GT Strudl se buscará encontrar una estructura de programación general que otorgue resultados confiables.

V.2. Coordenadas en GT Strudl.

Es importante mencionar que el sistema de ejes coordenados en GT Strudl es distinto al que un usuario normal podría estar acostumbrado.

Aquí las dirección **Y** es la que se encuentra perpendicular al plano traslacional descrito por las direcciones **X** y **Z**. Esta es la notación que se uso para todos los resultados de la memoria por lo que es importante tener presente que cuando se hable de cualquier resultado en la dirección **Z**, es una dirección horizontal.

V.3. Edificio genérico simétrico.

V.3.1. Características del edificio.

El edificio genérico que se modeló fue una estructura de 40 pisos con 5 muros de hormigón, 4 de ellos orientados en dirección X y uno solo en la dirección Z. La distribución en planta se puede ver en la siguiente figura:

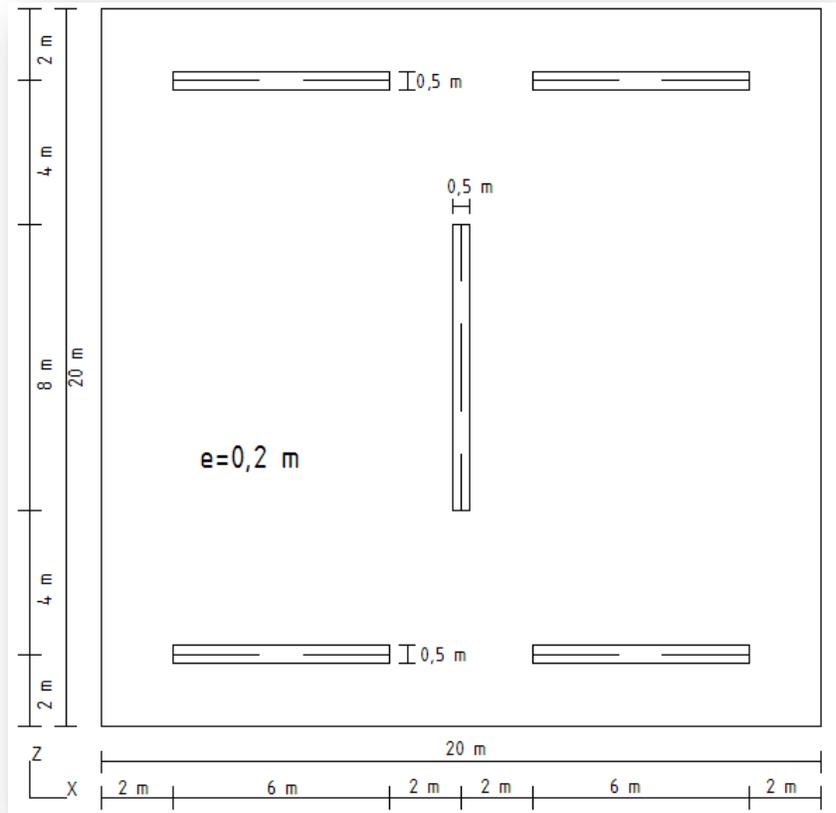


Figura 20. Planta del edificio genérico simétrico.

La altura entrepisos es de 3 metros y las propiedades del hormigón son las definidas por defecto en el programa GT Strudl:

$$E = 2530000[T / m^2]$$

$$G = 1010000[T / m^2]$$

De todos los modelos realizados se busco obtener como mínimo:

- 50 modos de la estructura con sus 50 periodos correspondientes aunque solo se compararan los 10 más importantes.
- El corte basal en X e Y combinado en CQC.
- El momento basal en X e Y combinado con CQC.
- Los desplazamientos superiores combinados en CQC.

V.3.2. Espectro.

Los modelos fueron analizados utilizando un espectro de la norma NCh433.Of96 con las siguientes características:

$$I = 1,0$$

$$A_0 = 0,3 \cdot g$$

$$R^* = 7$$

Suelo tipo II

$$T_0 = 0,30[s]$$

$$p = 1,50$$

$$g = 9,8[m/s^2]$$

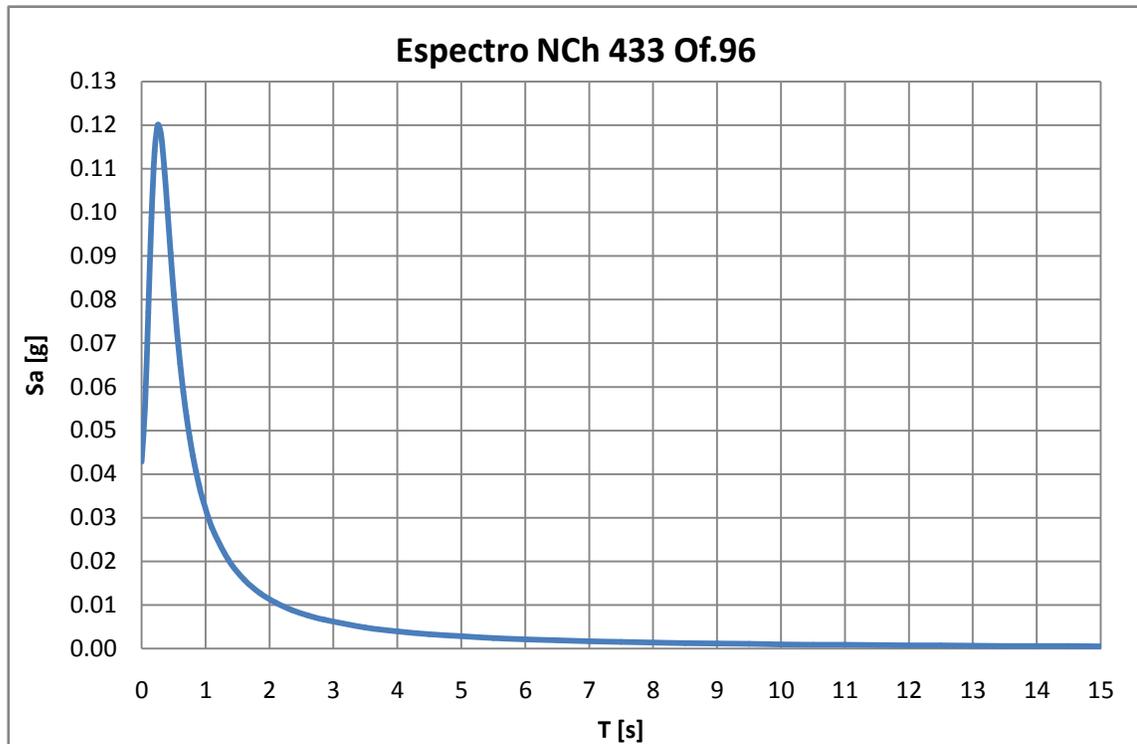


Figura 21. Espectro utilizado.

V.3.3. Generación de modelos.

El modelo realizado con el programa de IEC corresponde a un modelo de barras al cual se le asignan las propiedades geométricas a las barras así como los centros de gravedad y las masas que participan en la estructura. La losa se modela sólo como un diafragma rígido.

Los modelos realizados con el programa GT Strudl son presentados en la siguiente tabla resumen:

Tabla 2. Resumen de las características de los modelos simétricos.

MODELOS	ED01BARRA1	ED01BARRA2	ED01RIGSOLID1	ED01RIGSOLID2	ED01RIGSOLID3	ED01RIGSOLID4	ED01RIGSOLID5	ED01RIGSOLID6	ED01RIGSOLID1EF	ED01RIGSOLID2EF	ED01LOSA1	ED01LOSA2	ED01LOSA3	ED01LOSA4
Muros modelados con barras	X	X												
Muros modelados con elementos finitos			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Elemento finito usado SBHQ6			X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
Elemento finito usado IPQL												X		
1 elementos finitos entrepisos							X	X						
2 elementos finitos entrepisos			X	X	X	X					X	X	X	X
Mínimos elementos finitos a lo largo								X						
Elementos finitos de 1x1 m. (Malla fina)									X	X				
Losa modelada con diafragma	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
Losa modelada con elementos finitos											X	X	X	X
Elemento finito usado PSRR											X	X		
Elemento finito usado SBHQ6													X	
Elemento finito usado IPQL														X
Nudo central del diafragma externo	X		X	X			X	X	X	X				
Nudo central del diafragma interno		X			X	X								
Diafragma en X y Z	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
Masa de muros calculada por programa	X		X		X		X	X	X		X	X	X	X
Masa de muros asignada manualmente		X		X		X				X				
Masa de losa calculada por programa											X	X	X	X
Masa de losa asignada manualmente	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				

En la figura 22 se presentan algunos de estos modelos gráficamente.

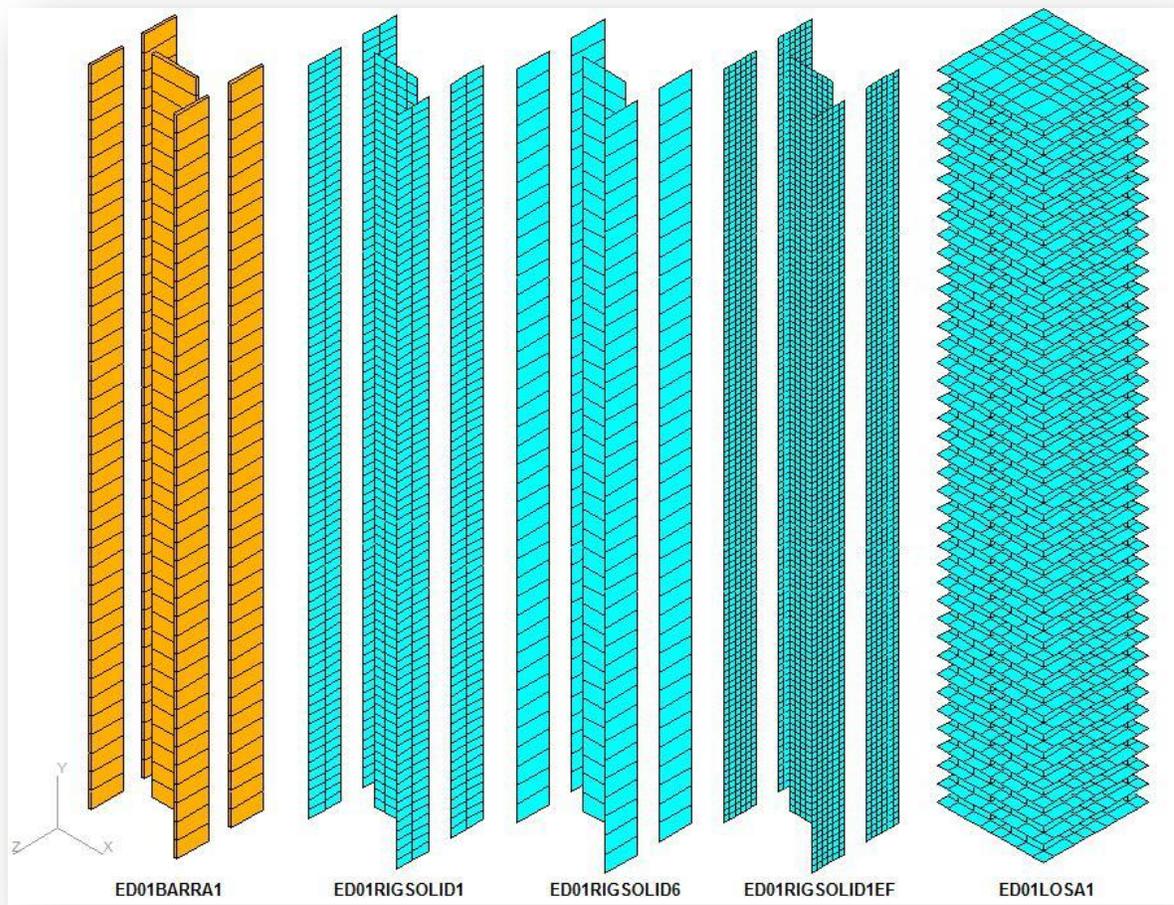


Figura 22. Ejemplos de algunos de los modelos realizados.

V.4. Edificio genérico para caso de torsión.

V.4.1. Características del edificio.

Además de estos modelos se realizó un estudio aparte del caso a torsión debido a que el edificio genérico es simétrico. Para esto se modificó la geometría de toda una línea de muros los que se ensancharon para llegar a 1,5 metros de ancho.

En este nuevo caso se rescataron los mismos resultados requeridos anteriormente.

Adicionalmente en algunos casos (ED01BARRA3T y ED01BARRA5T) se tuvieron que realizar modificaciones a las dimensiones geométricas de los muros. Esto se efectuó de esta manera ya que debido a las grandes dimensiones de los muros poseen resistencias considerables en la dirección “débil”. Por lo que se cambió el espesor por un valor fijo (0,1 metros) y se varió el largo de los muros para mantener constantes las propiedades inerciales en la dirección fuerte de los muros y así eliminar su rigidez en la dirección débil.

V.4.2. Espectro.

El espectro que se utilizó en este caso es el mismo que en el anterior.

V.4.3. Generación de modelos.

El modelo realizado con el programa de IEC posee las mismas características que el realizado con anterioridad pero ahora se varía en ancho de la línea de muros elegida además del centro de gravedad y la inercia rotacional. Un resumen de las características de los modelos realizados en GT Strudl para el caso torsional se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 3 Resumen de las características de los modelos torsionales.

MODELOS	ED01BARRA1T	ED01BARRA2T	ED01BARRA2AT	ED01BARRA3T	ED01BARRA4T	ED01BARRA5T	ED01RIGSOLID1T	ED01RIGSOLID2T	ED01RIGSOLID3T	ED01RIGSOLID4T	ED01RIGSOLID5T	ED01LOSA1T
Muros modelados con barras	X	X	X	X	X	X						
Dimensiones de los muros cambiadas para mantener inercia en el eje principal y disminuir efectos de resistencia en dirección "débil"				X		X						
Barras fueron liberadas de la resistencia al momento en el eje X local (se busco evitar esfuerzos de torsión en muros)					X	X						
Muros modelados con elementos finitos							X	X	X	X	X	X
Elemento finito usado SBHQ6							X	X	X	X	X	X
2 elementos finitos entrepisos							X	X	X	X	X	X
Losa modelada con diafragma	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Losa modelada con elementos finitos												X
Elemento finito usado PSRR												X
Nudo central del diafragma externo	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Nudo central en el centro geométrico	X	X		X			X	X				
Nudo central en el centro de masas			X		X	X			X	X	X	
Diafragma desplazamientos en X y Z y rotaciones en Z	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
El diafragma se definió solo para los nudos centrales de elementos finitos de los muros, esto busco evitar resistencia torsional de los muros											X	
Masa de muros calculada por programa	X						X		X		X	X
Masa de muros asignada manualmente		X	X	X	X	X		X		X		
Masa de losa calculada por programa												X
Masa de losa asignada manualmente	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	

V.5. Resultados.

V.5.1. Modelo simétrico.

Los resultados del modelo simétrico son los siguientes:

Tabla 4. Primeros 10 periodos de los distintos modelos.

MODO	IEC	B1	B2	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5	RS6	RSEF1	RSEF2	L1	L2	L3	L4
1	10.11	9.89	10.01	9.80	9.92	9.80	9.92	9.56	9.70	9.81	9.93	9.85	8.90	6.63	9.85
2	7.82	7.64	7.73	7.60	7.69	7.60	7.69	7.37	7.63	7.58	7.67	7.63	7.55	5.86	7.63
3	7.72	6.83	6.84	5.26	5.18	5.26	5.18	5.18	5.34	5.23	5.18	5.35	7.28	4.73	5.36
4	1.63	1.60	1.62	1.59	1.60	1.59	1.60	1.55	1.57	1.59	1.61	1.59	1.44	1.43	1.59
5	1.26	1.23	1.24	1.22	1.23	1.22	1.23	1.19	1.23	1.22	1.23	1.23	1.22	1.16	1.23
6	1.25	1.22	1.22	1.14	1.12	1.14	1.12	1.11	1.16	1.13	1.12	1.16	1.17	1.10	1.16
7	0.60	0.59	0.59	0.58	0.58	0.58	0.58	0.56	0.57	0.58	0.59	0.58	0.53	0.56	0.58
8	0.45	0.45	0.45	0.44	0.45	0.44	0.45	0.43	0.49	0.44	0.45	0.45	0.44	0.44	0.45
9	0.45	0.45	0.45	0.44	0.43	0.44	0.43	0.43	0.45	0.44	0.43	0.44	0.42	0.43	0.44
10	0.31	0.31	0.31	0.30	0.31	0.30	0.31	0.30	0.30	0.31	0.31	0.31	0.28	0.30	0.31

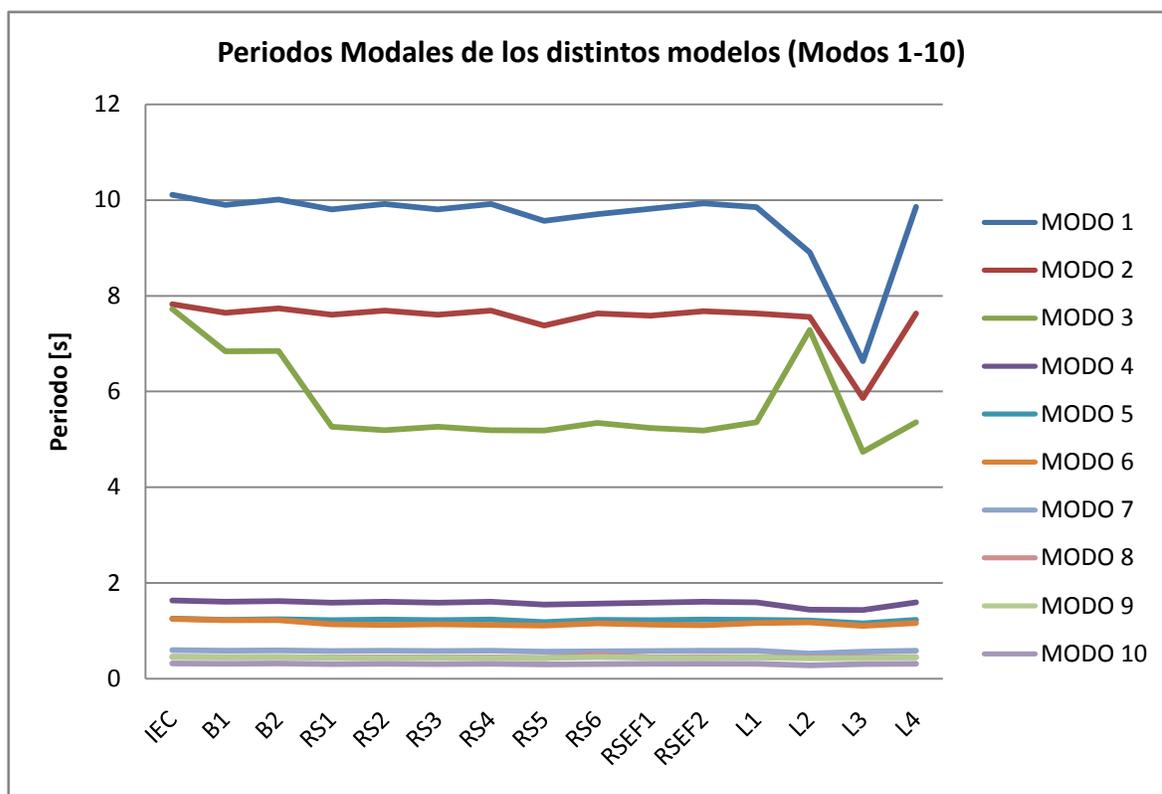


Figura 23. Grafico de los 10 periodos de los modelos.

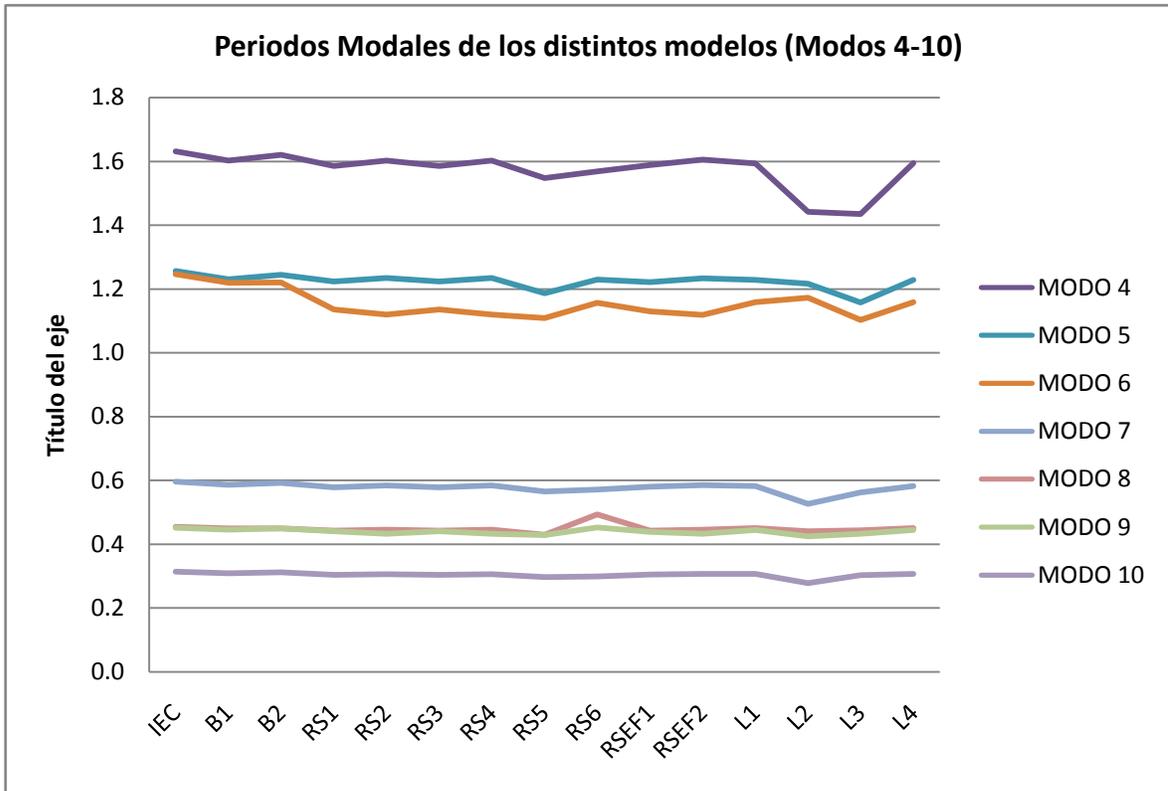


Figura 24. Detalle de los modos 4 al 10.

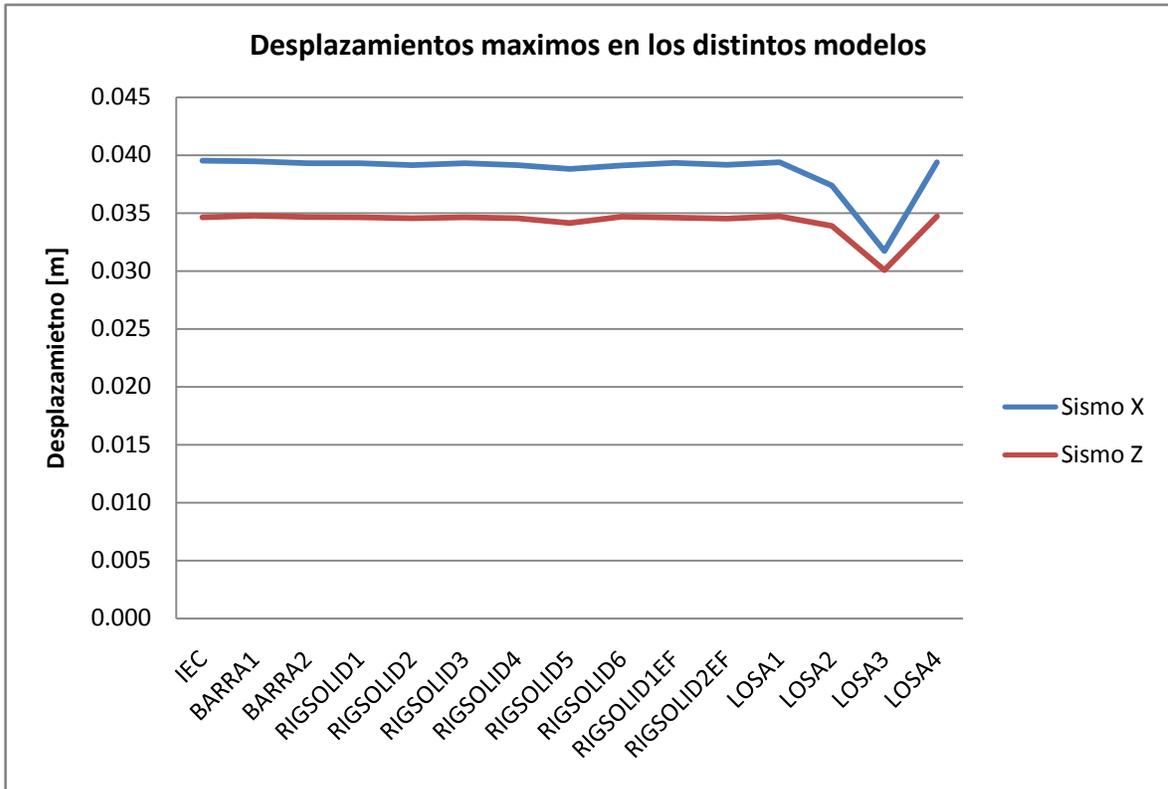


Figura 25. Grafico de los desplazamientos máximos.

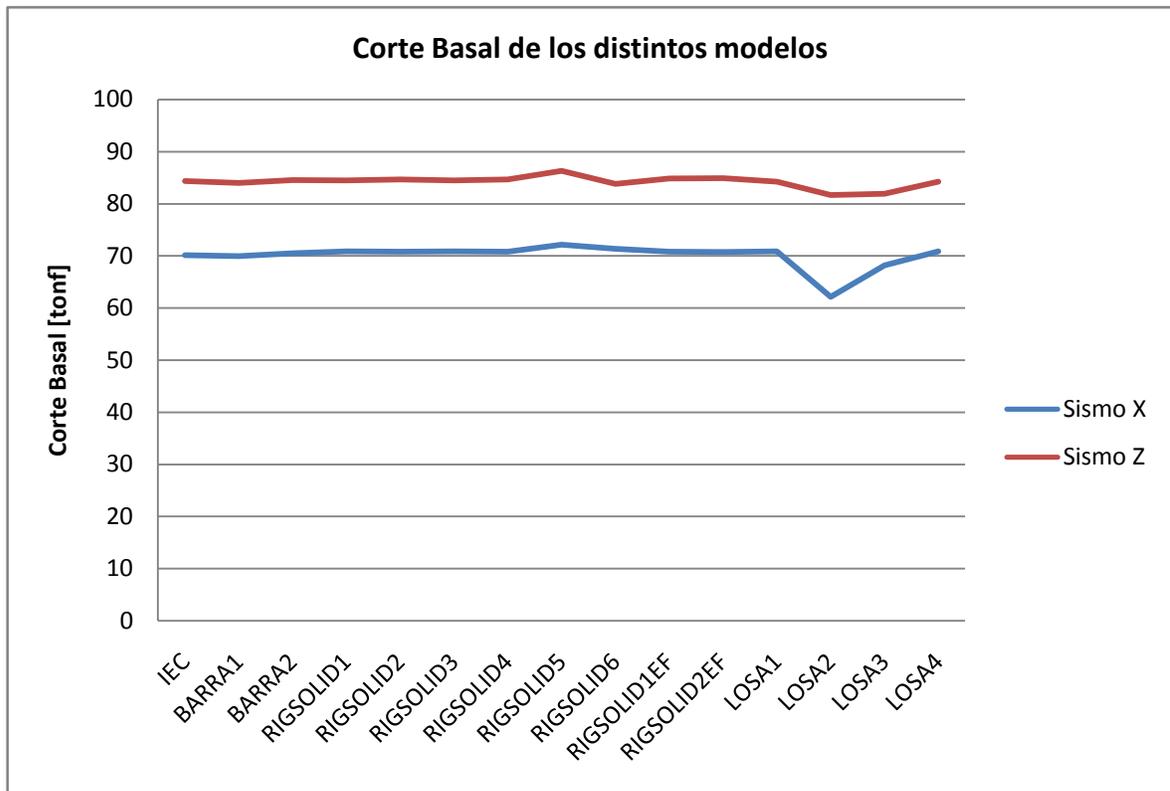


Figura 26. Grafico del corte basal.

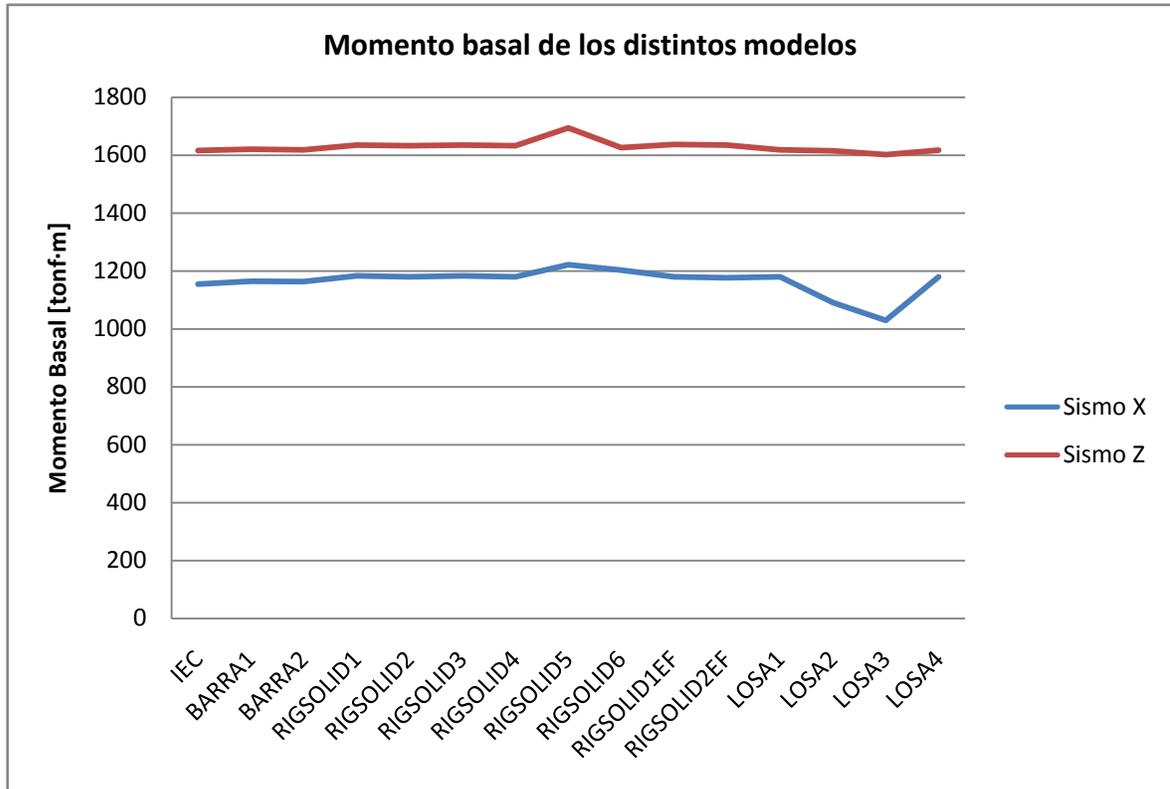


Figura 27. Grafico del momento basal.

Tabla 5. Resultados de los distintos modelos.

	Desplazamiento		Corte Basal		Momento Basal	
	Sismo X	Sismo Z	Sismo X	Sismo Z	Sismo X	Sismo Z
	X	Z	X	Z	X	Z
IEC	0.0395	0.0346	70.16	84.37	1154.21	1616.13
BARRA1	0.0395	0.0348	69.94	83.99	1164.64	1621.08
BARRA2	0.0393	0.0347	70.51	84.54	1163.44	1618.36
RIGSOLID1	0.0393	0.0346	70.87	84.49	1182.78	1634.62
RIGSOLID2	0.0392	0.0346	70.80	84.63	1179.40	1633.34
RIGSOLID3	0.0393	0.0346	70.87	84.49	1182.78	1634.62
RIGSOLID4	0.0392	0.0346	70.80	84.63	1179.41	1633.34
RIGSOLID5	0.0388	0.0341	72.16	86.31	1221.51	1694.43
RIGSOLID6	0.0391	0.0347	71.37	83.78	1202.53	1626.41
RIGSOLID1EF	0.0393	0.0346	70.83	84.86	1179.62	1637.65
RIGSOLID2EF	0.0392	0.0345	70.73	84.87	1176.50	1635.58
LOSA1	0.0394	0.0347	70.85	84.24	1179.54	1618.20
LOSA2	0.0374	0.0339	62.14	81.64	1091.09	1615.09
LOSA3	0.0317	0.0301	68.16	81.90	1029.13	1602.14
LOSA4	0.0394	0.0347	70.86	84.19	1179.26	1617.92

Tabla 6. Detalle de los nodos, barras y elementos para los modelos.

	JOINTS	MEMBERS	ELEMENTS
MODELO IEC	200	200	0
ED01BARRA1	245	240	0
ED01BARRA2	205	240	0
ED01RIGSOLID1	1417	40	960
ED01RIGSOLID2	1417	40	960
ED01RIGSOLID3	1377	40	960
ED01RIGSOLID4	1377	40	960
ED01RIGSOLID5	737	40	480
ED01RIGSOLID6	491	40	240
ED01RIGSOLID1EF	4517	40	3840
ED01RIGSOLID2EF	4517	40	3840
ED01LOSA1	4001	0	3584
ED01LOSA2	4001	0	3584
ED01LOSA3	4001	0	3584
ED01LOSA4	4001	0	3584

V.5.2. Modelo a torsión.

Los resultados para el caso de los modelos de torsión son:

Tabla 7. Primeros 10 periodos de los distintos modelos.

MODO	IEC	RS1T	RS2T	RS3T	RS4T	RS5T	RS6T	L1T	B1T	B2T	B2AT	B3T	B4T	B5T
1	11.810	10.671	10.832	10.671	10.835	10.749	10.912	10.725	10.777	10.939	10.939	11.862	10.939	11.862
2	8.417	6.368	6.530	6.306	6.411	7.154	7.610	6.345	6.509	6.602	6.455	9.351	8.217	8.333
3	6.106	2.745	2.670	2.670	2.713	6.002	5.960	2.689	2.948	2.903	2.963	5.424	6.072	6.127
4	1.913	1.723	1.747	1.723	1.747	1.736	1.760	1.732	1.742	1.767	1.767	1.973	1.767	1.973
5	1.338	1.079	1.134	1.029	1.052	1.224	1.299	1.045	1.157	1.167	1.069	1.535	1.321	1.363
6	0.980	0.741	0.702	0.749	0.757	0.981	0.972	0.751	0.741	0.736	0.804	0.909	0.977	1.025
7	0.699	0.627	0.635	0.627	0.635	0.632	0.639	0.630	0.635	0.643	0.643	0.748	0.643	0.748
8	0.484	0.435	0.461	0.393	0.408	0.448	0.474	0.407	0.475	0.476	0.420	0.569	0.478	0.505
9	0.368	0.328	0.331	0.334	0.331	0.357	0.351	0.330	0.333	0.337	0.390	0.412	0.353	0.412
10	0.354	0.313	0.292	0.328	0.330	0.331	0.334	0.329	0.300	0.299	0.369	0.348	0.337	0.392

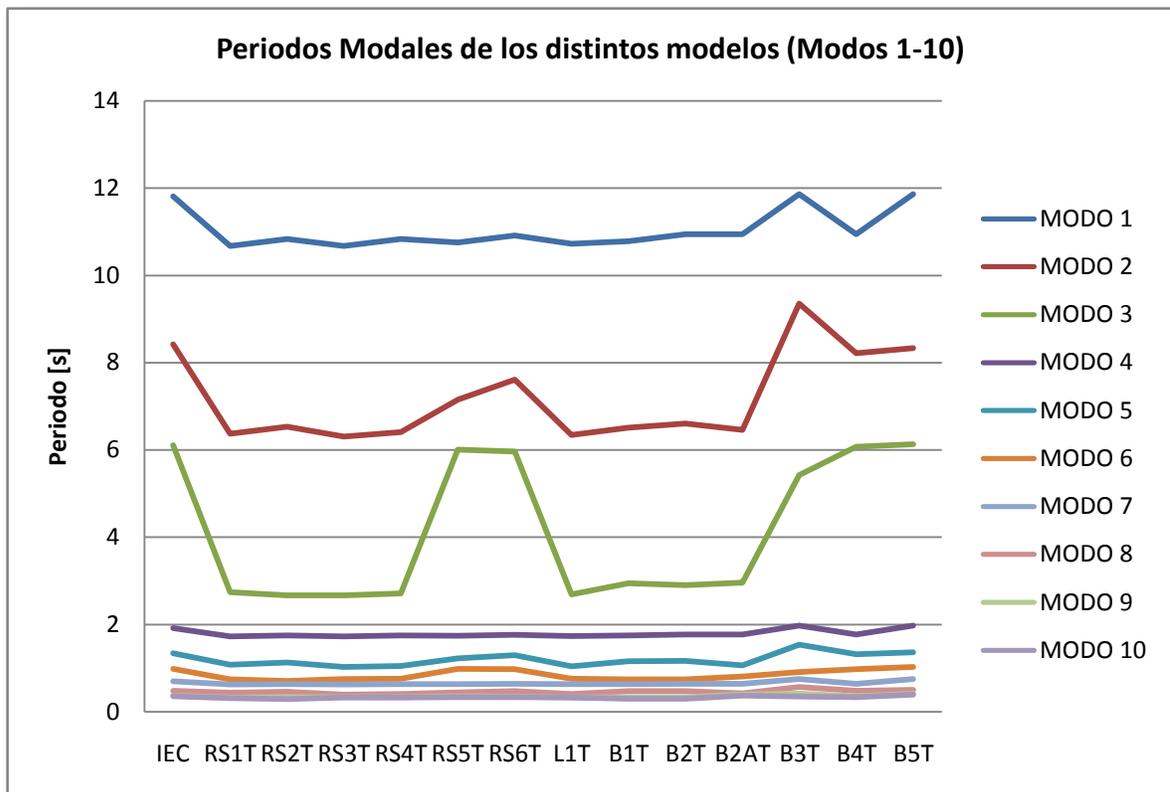


Figura 28. Grafico de los 10 periodos de los modelos.

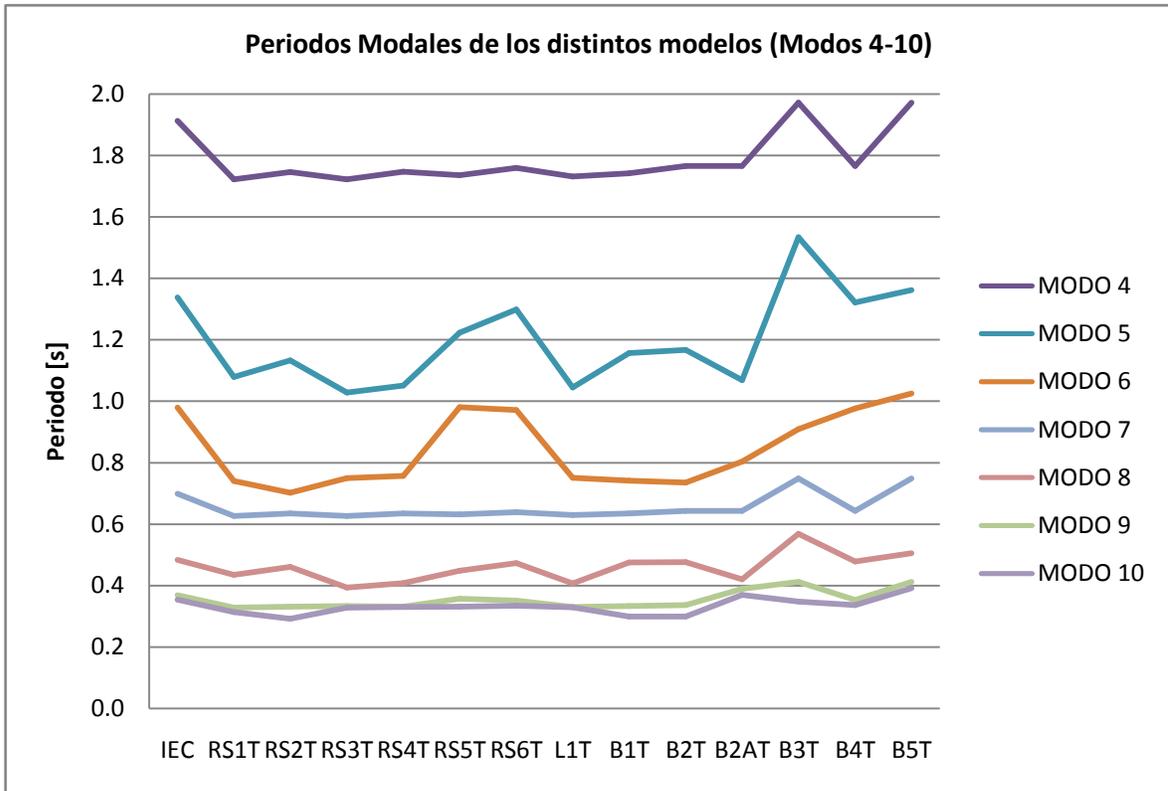


Figura 29. Detalle de los modos 4 al 10.

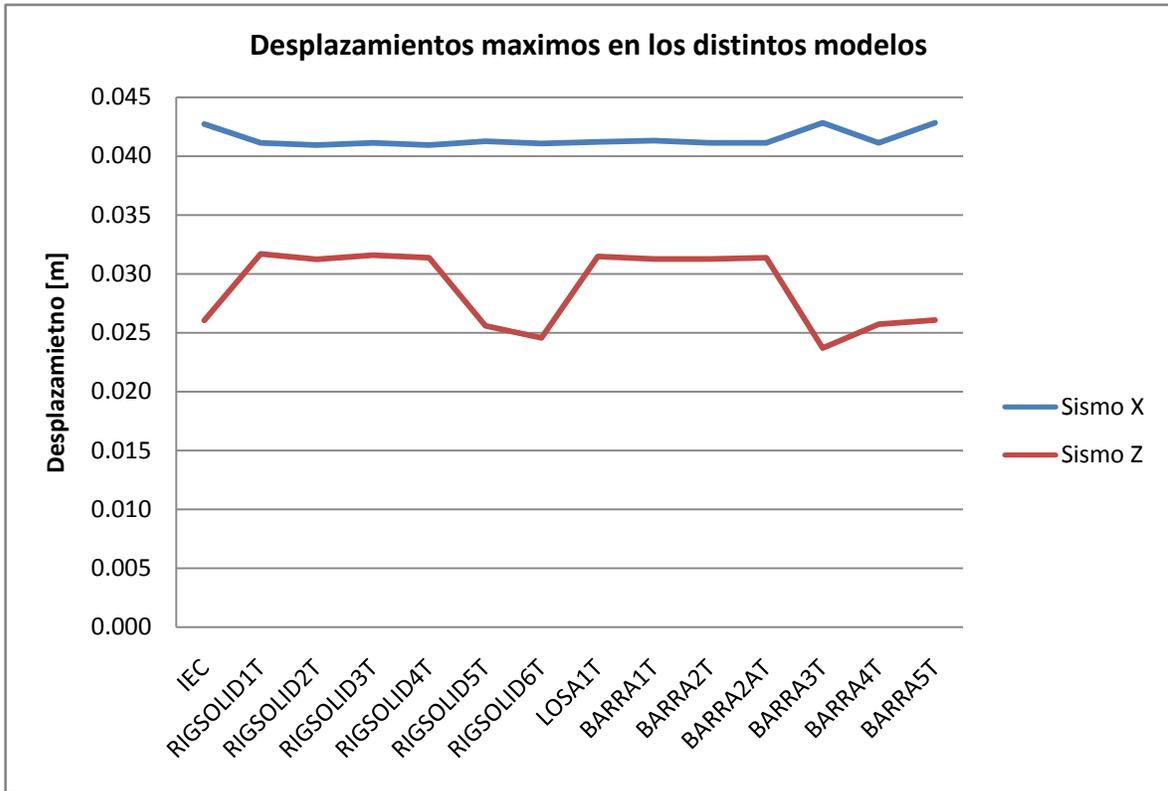


Figura 30. Grafico de los desplazamientos máximos.

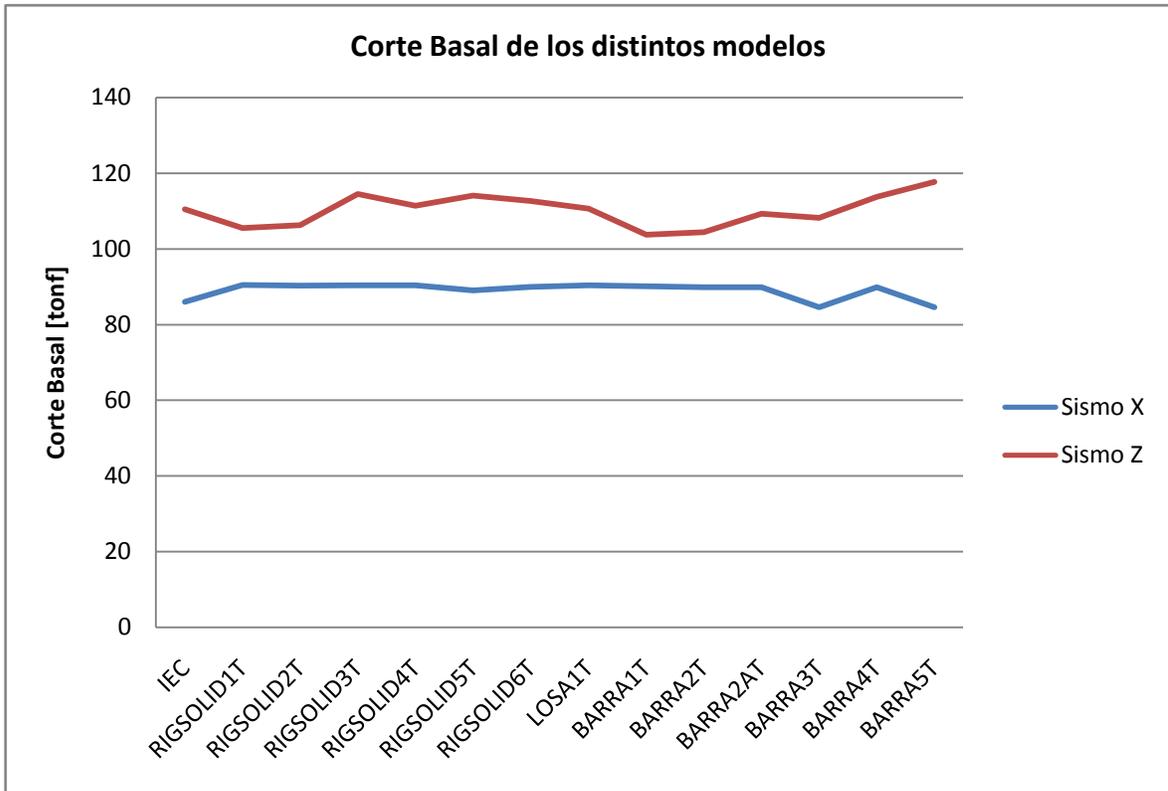


Figura 31. Grafico del corte basal.

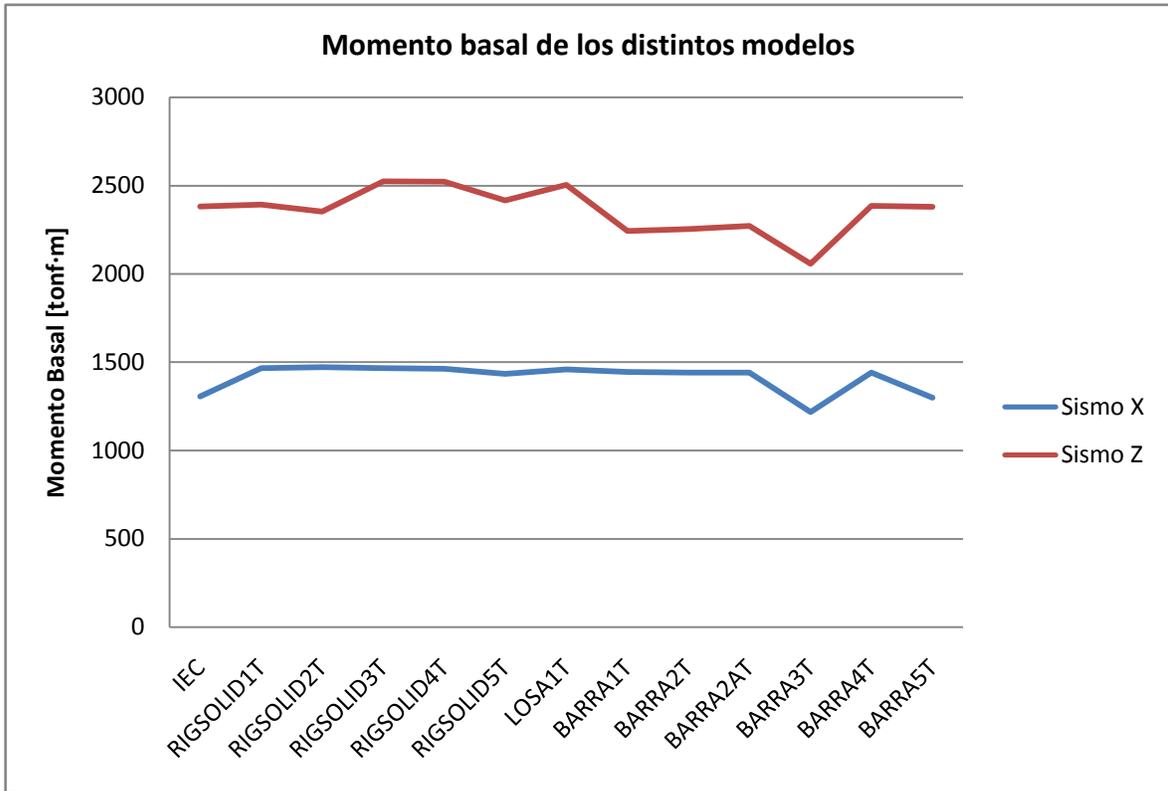


Figura 32. Grafico del momento basal.

Tabla 8. Resultados de los modelos a torsión.

	Desplazamiento CQC		Corte Basal		Momento Basal	
	Sismo X	Sismo Z	Sismo X	Sismo Z	Sismo X	Sismo Z
	X	Z	X	Z	X	Z
IEC	0.0427	0.0260	86.04	110.48	1306.02	2380.66
RIGSOLID1T	0.0411	0.0317	90.49	105.50	1465.69	2391.92
RIGSOLID2T	0.0409	0.0312	90.30	106.26	1471.11	2352.12
RIGSOLID3T	0.0411	0.0316	90.42	114.52	1465.65	2523.10
RIGSOLID4T	0.0409	0.0314	90.41	111.40	1462.06	2520.78
RIGSOLID5T	0.0413	0.0256	89.03	114.10	1433.66	2414.96
LOSA1T	0.0412	0.0315	90.37	110.61	1458.69	2502.63
BARRA1T	0.0413	0.0313	90.18	103.72	1444.93	2241.30
BARRA2T	0.0411	0.0313	89.93	104.41	1440.02	2253.66
BARRA2AT	0.0411	0.0314	89.94	109.32	1441.16	2271.52
BARRA3T	0.0428	0.0237	84.56	108.21	1217.50	2056.43
BARRA4T	0.0411	0.0257	89.94	113.78	1440.02	2384.00
BARRA5T	0.0428	0.0261	84.56	117.72	1297.74	2378.11

V.6. Conclusiones.

En el caso de los modelos simétricos se puede observar que los modelos de barras poseen resultados casi idénticos a los del modelo de IEC, las únicas diferencias que se aprecian son en el tercer periodo que es torsional.

Lo mismo sucede en los modelos con elementos finitos RIGSOLID1, RIGSOLID2, RIGSOLID3 y RIGSOLID4.

También se puede concluir que las diferencias entre asignar toda la masa de manera externa versus asignar solo la masa de la losa y que el programa calcule la masa de los demás elementos son despreciables.

Lo mismo podemos decir de la diferencias entre crear un nodo maestro para el diafragma siendo este externo y utilizar un nodo de los mismos elementos. Esta diferencia nula nos ayudará en el caso de edificios más complicados que no posean elementos concurrentes en el centro de la estructura.

En el caso de los modelos RIGSOLID5 y RIGSOLID6 estos poseen mallas de elementos finitos mucho menos finas que hacen que sus resultados se alejen más de los obtenidos en IEC, pero cabe destacar que estos resultados son bastante cercanos y claramente podrían servir para hacer un estudio de un pre diseño de una estructura. Esto se puede deber a que los elementos finitos utilizados SBQH6 son bastante eficaces.

Por otro lado los modelos RIGSOLID1EF y RIGSOLID2EF, que poseen mallas de elementos finitos mucho más finas (elementos de 1 metro por 1 metro), tienen resultados similares a los de RIGSOLID1, RIGSOLID2, RIGSOLID3 y RIGSOLID4. Claro que esto posee un costo mayor para el proceso.

Sin embargo en el caso de los modelos tipo LOSA tenemos más variedad de resultados.

Los modelos LOSA1 y LOSA4 poseen resultados que se ajustan a los valores obtenidos en IEC, no así los otros modelos. Estos poseen grandes diferencias en los periodos, desplazamientos, corte basal y momento basal (en el caso del modelo LOSA3 no se calculó el momento basal debido a las grandes diferencias apreciadas).

En el caso del modelo LOSA2 las diferencias se atribuyen al uso de elementos tipo IPQL en los muros. Este tipo de elementos posee sólo 2 grados de libertad en cada nudo, lo que simplifica demasiado el comportamiento de los muros que también trabajan a flexión. Sería interesante ver si con una malla más fina estas diferencias disminuyen.

Para el caso del modelo LOSA3 se utilizaron elementos tipo SBHQ6 para la losa. Este le otorga propiedades resistentes a la flexión en todos los sentidos lo que rigidiza el modelo en demasía.

Revisando ahora los modelos a torsión vemos otro escenario. Ya desde el caso de los modelos simétricos se observaban diferencias en los periodos de los modos torsionales y claramente en el caso de los modelos a torsión aumentaron estas diferencias con respecto al

modelo de IEC. En los modelos 1 y 2 de todos los tipos distan bastante de los resultados entregados por el modelo de IEC.

Estas diferencias encontradas se deben a que tanto los elementos barra como los elementos finitos en GT Strudl incluyen la rigidez a torsión. Esto se comprobó al eliminar esta resistencia de los elementos tipo barra o al definir el diafragma solo en los nudos centrales de los muros con elementos finitos. Estas variaciones que eliminaban la resistencia torsión de los muros dejaron en evidencia que el programa incluye esta resistencia por defecto.

Si bien la rigidez torsional existe en los elementos es posible de despreciar en estructuras de hormigón armado debido a que estos no van a poseer mayor resistencia y el hormigón rápidamente va a entrar en fase 2 perdiendo la mayoría de su resistencia inicial. El análisis sísmico debe considerar la situación de diseño donde claramente esos elementos no van a ser diseñados a torsión.

Podemos ver que esto es incluido en el ACI 318-05 donde se indica que: *“En el caso de torsión de compatibilidad, la rigidez a torsión con frecuencia puede no tomarse en consideración.”*

También se observó que el programa incluye en la resistencia general de la estructura la rigidez transversal de los elementos. Esta rigidez que si bien existe en cada elemento estructural de un edificio va a ser irrelevante para el diseño ya que en elementos como muros la dirección de trabajo es una, la principal. Esto se comprobó variando el espesor de los muros a 0,1 metro y se varió el largo de estos de manera que la inercia en la dirección fuerte se mantuviera intacta con respecto a la geometría original.

Se realizaron modelos mejorados para cada caso (barras y elementos finitos) en los que se trató de eliminar la rigidez a torsión, eliminar la resistencia transversal y se mejoró la precisión de la ubicación del centro donde se aplicaban las masas (esto debido a que los muros que inducen la torsión son exageradamente anchos). Esto radicó en mejores resultados que se acercan a los de los obtenidos por IEC. Estos son los casos de los modelos RIGSOLID5T, RIGSOLID6T, BARRA4T y BARRA5T en los que se aplicaron estas soluciones.

Es por esto que podemos decir que las formas de modelar en GT Strudl que utilicen tanto elementos tipo barras como elementos finitos ofrecen resultados confiables y dentro de lo esperado con estructuras reales que se hayan modelado con otros programas de cálculo estructural.

CAPÍTULO VI: GENERACIÓN DE LOS MODELOS ESTRUCTURALES EN GT STRUDL.

VI.1. Introducción.

En esta parte se detalló la confección de los modelos aproximados de los edificios altos expuestos en el capítulo IV.

Cada modelo posee distintas características geométricas y de elementos que los hacen únicos, pero el esquema general utilizado para su programación en GT Strudl es el determinado en el capítulo anterior luego de corroborar que se obtuvieran resultados coherentes. También fue importante en la modelación la correcta elección de qué elementos modelar.

Además se tomó en consideración los parámetros utilizados para validar el modelo, es decir, periodos o desplazamientos obtenidos anteriormente en otras investigaciones. Todo esto ayudó a que los modelos aproximados posean características lo más cercanas posibles a los verdaderos edificios de manera que los resultados sean los más certeros para su posterior clasificación.

VI.2. Espectro de respuesta que se aplicó a los edificios.

Como se menciona en la metodología de esta memoria el espectro a utilizar en los edificios será el de la norma NCh2745.Of03 sección 8.4 (11). Esto es debido a que este espectro se encuentra calibrado para estructuras de periodos más largos ya que está hecha para edificios con aislación sísmica. Si bien los edificios que se modelaron no poseen aislación sísmica sí poseen periodos muy largos para la práctica en Chile lo que hace que el espectro de la norma NCh433.Of96 (12) no sea aplicable.

Según los parámetros del espectro de Newmark & Hall los valores para realizar este espectro en suelo tipo II (Zona Santiago) serían:

Tabla 9. Parámetros del espectro para suelo tipo II.

Suelo Tipo	T' _a [s]	T' _b [s]	T' _c [s]	T' _d [s]	T' _e [s]	α _A [cm/s ²]	α _V [cm/s ²]	α _D [cm/s ²]
II	0,03	0,20	0,54	2,00	10,00	1100	94	30

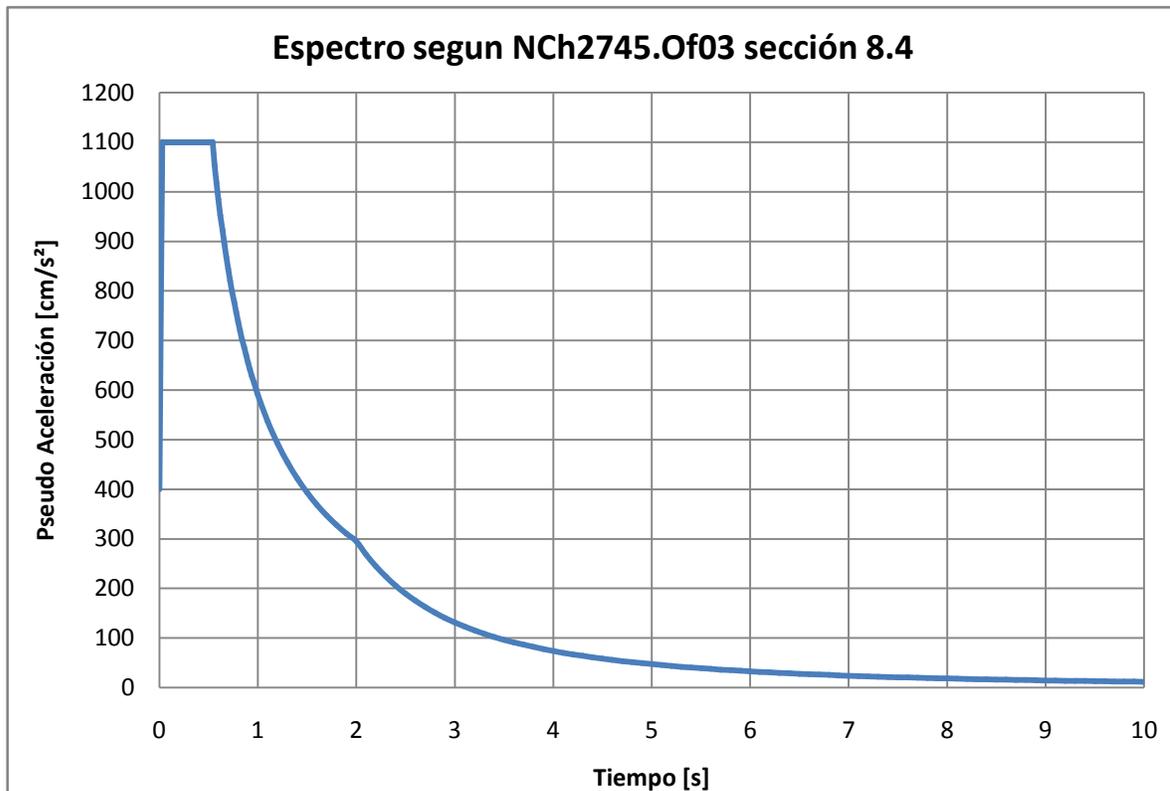


Figura 33. Espectro de diseño.

Si comparamos este espectro con el obtenido por la norma NCh433.Of96 (12) para suelo II con un factor de reducción igual a 1,0 obtendríamos lo siguiente:

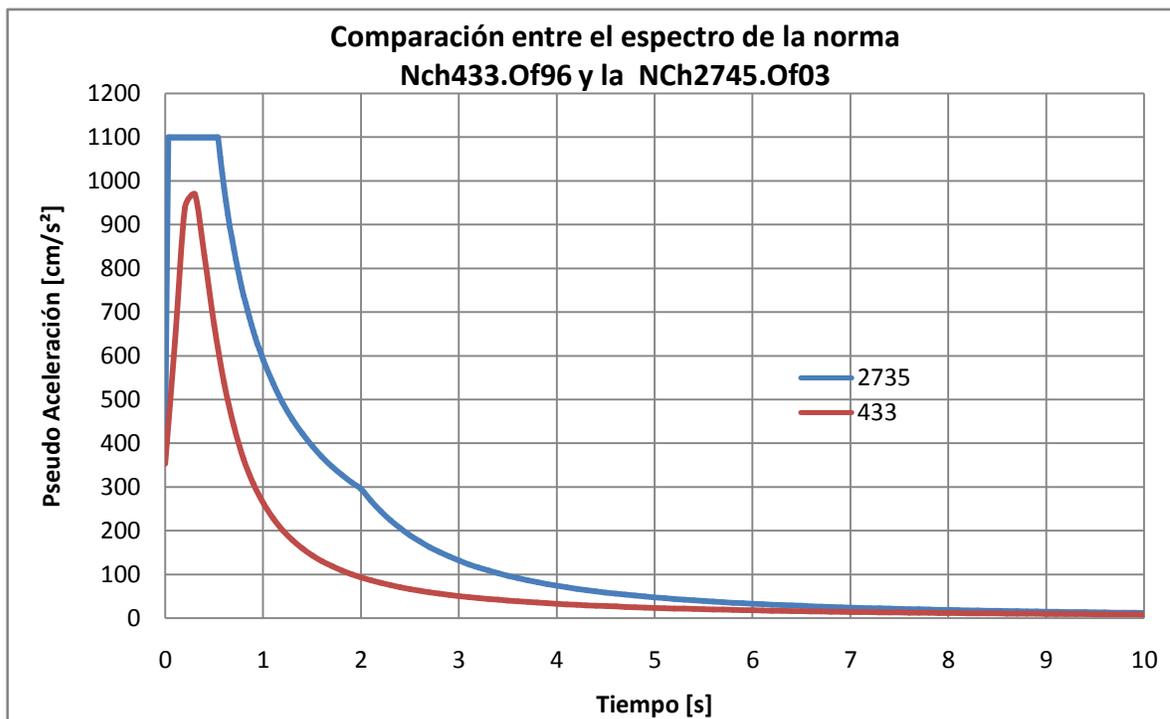


Figura 34. Comparación de los espectros.

Como se puede ver el espectro de la norma para edificios aislados envuelve a la curva del espectro de la norma NCh433.Of96 (12) por lo que nos encontramos sobreestimando los valores máximos de aceleración en la zona de periodos menores de 4 segundos para los que sería diseñado normalmente un edificio en Chile, pero para periodos mayores hay que recordar que la norma NCh433.Of96 (12) no es aplicable.

Si bien este espectro no fue el utilizado para diseñar realmente estos edificios, si nos dará una base para poder comparar los resultados que se obtengan en los distintos edificios en estudio.

VI.3. Generación de los modelos estructurales en GT Strudl.

VI.3.1. Modelo 1 basado en la Torre Jin Mao.

En el modelo 1 basado en la Torre Jin Mao utilizaron distintas opciones de GT Strudl para programarlo, las que se detallarán a continuación.

Las mega-columnas fueron modeladas con elementos tipo barras (*MEMBERS*) con uniones tipo marco (*SPACE FRAME*), es decir, uniendo los 6 grados de libertad de las barras. A estos elementos se les asignó una geometría prismática rectangular cuyas dimensiones variaban en altura. Desde la base al piso 31 las dimensiones de las mega-columnas eran de 1,5 x 5,0 metros. Luego hasta el piso 64 seguía con unas dimensiones de 1,5 x 4,5 metros para cambiar a 1,0 x 3,5 metros hasta el piso 88. (Ver figura 35 y 36)

Además a cada grupo de barras se le asignó una constante de elasticidad, un modulo de corte y una constante de Poisson por separado, quedando definidos 3 materiales. Estos 3 materiales consideran la distribución en altura de los tipos de concreto (ver figura 36) y el porcentaje que tiene de acero estructural la columna en sí, para poder determinar un modulo de elasticidad “compuesto” proporcionalmente por lo que corresponda de concreto y lo que corresponda de acero. Se entrega un resumen de estas propiedades entregadas a las barras:

Tabla 10. Detalle de las constantes en las columnas.

MATERIAL	PISOS	E KN/mm ²	G KN/mm ²	Poisson
MAT1	1 al 31	34.832	13.933	0.2
MAT2	31 al 64	38.235	15.294	0.2
MAT3	64 al 88	41.312	16.525	0.2

Los muros que están en el núcleo del edificio fueron modelados con elementos finitos (*ELEMENTS*). Estos poseen en su mayoría una geometría rectangular excepto en una zona intermedia en el piso 53 en que cambia la distribución de los muros.

Para el caso de los elementos finitos rectangulares se utilizaron elementos tipo ‘SBHQ6’ de 6 grados de libertad. En el caso de los elementos finitos triangulares se utilizó elementos tipo ‘SBHT6’ de 6 grados de libertad por nodo. El espesor de estos elementos fue de acuerdo a la variación que posee el espesor de los muros presentado anteriormente y que se puede apreciar en la figura 36.

Del mismo modo que las mega-columnas se tuvieron que asignar las constantes de elasticidad, modulo de corte y de Poisson. La distribución de estas propiedades se representa en la siguiente tabla:

Tabla 11. Detalle de las constantes en los muros y vigas.

MATERIAL	PISOS	fc' Mpa	E KN/mm ²	G
				KN/mm ²
MAT4	1 al 31	40	29.725	11.890
MAT5	31 al 64	50	33.234	13.294
MAT6	64 al 88	60	36.406	14.562

Se modelaron vigas entre los muros como elementos tipo barras con propiedades geométricas rectangulares y constantes de los materiales idénticos a los muros. Las propiedades geométricas de estas barras eran espesores iguales al de los muros y alto de viga de 800 mm.

Las riostras tipo “*Outrigger Truss*” fueron representadas por elementos tipo barras con uniones tipo enrejado espacial (*SPACE TRUSS*) que sólo transmiten esfuerzos axiales. A estos elementos se les asignó un tipo de perfil W36x798 hasta W36X650 (en las riostras superiores) que poseen un alma cercana al metro de ancho. Este tipo de perfiles es conocido como un *JUMBO SECTION* debido a sus grandes dimensiones. En este tipo de estructuras son cada vez más usados debido a las altas resistencias que poseen y a que con ellos se puede ahorrar mucho espacio que tendría que ocupar cualquier otro tipo de solución constructiva.(Ver figura 35)

También se incluyeron en el modelo 2 tipos de vigas que no fueron encontradas en la información libre que se disponía, fueron incluidas en otros modelos con estructuras similares y en fotos de la construcción de esta estructura. Estos son vigas que unen los extremos de las mega-columnas en la dirección “débil” y vigas que unen las mega-columnas y el núcleo de muros pero que no son parte del sistema de riostras.

Se pudo observar en fotos y otros modelos de edificios altos que comúnmente las mega-columnas se ven unidas por vigas en su parte “débil” para hacer que estas trabajen de manera conjunta en esta dirección se apoyen. Ahora bien, como no se pudo obtener información respecto a estas vigas se optó por incluir vigas como elementos en el modelo pero de dimensiones menores para que tuvieran solo un participación secundaria en la respuesta del modelo. Las vigas elegidas fueron los perfiles tipo W18x211 variando en altura hasta llegar a un W18x158. Estos perfiles fueron obtenidos de las tablas W-LRFD3 que posee GT Strudl y que son perfiles tipo W calculados con la LRFD, que poseen almas de aproximadamente 500 mm.

Respecto a las vigas que van desde las mega columnas al núcleo también se observaron en los casos antes mencionados ya que comúnmente estas vigas ayudan a soportar las grandes dimensiones de losas que existen entre el marco resistente y el núcleo. Estas sin duda ayudan a una transferencia de esfuerzos al núcleo de muros pero debido a que no se obtuvo mayor información respecto a este elemento se le asignó un perfil de acero tipo W27x307 que varía hasta un perfil tipo W27x217 de dimensiones “menores” para no sobre estimar su acción sobre la estructura. Hay que tener en cuenta que las dimensiones menores para edificios como esto corresponden a vigas de almas menores a los 700 mm. aproximadamente.

Las constantes para estos elementos son asignadas directamente por el programa, ya que se extraen de la base de datos de perfiles del programa. Estas propiedades son:

Tabla 12. Detalles de las constantes en elementos de acero.

Material	E KN/mm ²	G KN/mm ²	Poisson
Acero	199.948	75.842	0.3

Debido a las grandes dimensiones que poseen las columnas de esta estructura se debió optar por el uso de “cachos rígidos” para unir las vigas que conectan las mega-columnas con el núcleo de muros. Esto debido a que la simple unión desde el centro geométrico de la columna hasta el muro es una simplificación que castiga a la viga agregándole hasta más de 2 metros de longitud debido a las dimensiones de la mega-columna. Por lo que se crearon vigas tipo elemento (*ELEMENT*) con dimensiones adecuadas para representar una viga infinitamente rígida. Las dimensiones y propiedades son descritas en la siguiente tabla:

Tabla 13. Propiedades de elementos infinitamente rígidos.

AX m ²	AY m ²	AZ m ²	IX m ⁴	IY m ⁴	IZ m ⁴	E kN/mm ²	G kN/mm ²
10000	10000	10000	100000	100000	100000	5000	2000

La masa de esta estructura fue calculada de manera mixta, es decir, el programa calculó automáticamente la masa de los elementos finitos y de las barras para asignarlas a los nudos correspondientes y externamente se asignó la masa de las losas y sobrecargas presentes en la estructura. La masa “externa” fue asignada en todas las direcciones de acción que tendrían como si estuviera presente, es decir, en las siguientes direcciones de acción:

- Traslacionalmente en X, Y y Z.
- Rotacionalmente en Y.

La masa se asignó en un nudo “maestro” del diafragma rígido de cada piso, que se ubicaba en el centro de cada planta. Hay que mencionar que a todos los pisos que tuvieran las características de piso mecánico se asumía una sobre carga de 1 tonf/m² en vez de las 250 kgf/m² que normalmente se le aplica a los pisos de oficinas.

El detalle de las masas asignadas en cada nudo se puede ver en las tablas A.1 y A.2 del anexo A.

El diafragma rígido que se usó en este caso es el de ‘*RIGID PLANE*’ que enlaza los grados de libertad traslacionales en X y Z y el giro que se produce en Y. Este diafragma une todos los nudos del piso de las columnas y muros al nodo “maestro” que se ubica en el centro.

Los apoyos del edificio se modelaron como apoyos empotrados en todos los nudos de la base, que debería representar el comportamiento de la fundación que posee esta estructura.

El detalle del código que se utilizó para analizar este edificio en GT Strudl se encuentra en el anexo B bajo el nombre JINMAO_01_MODEL.GTI.

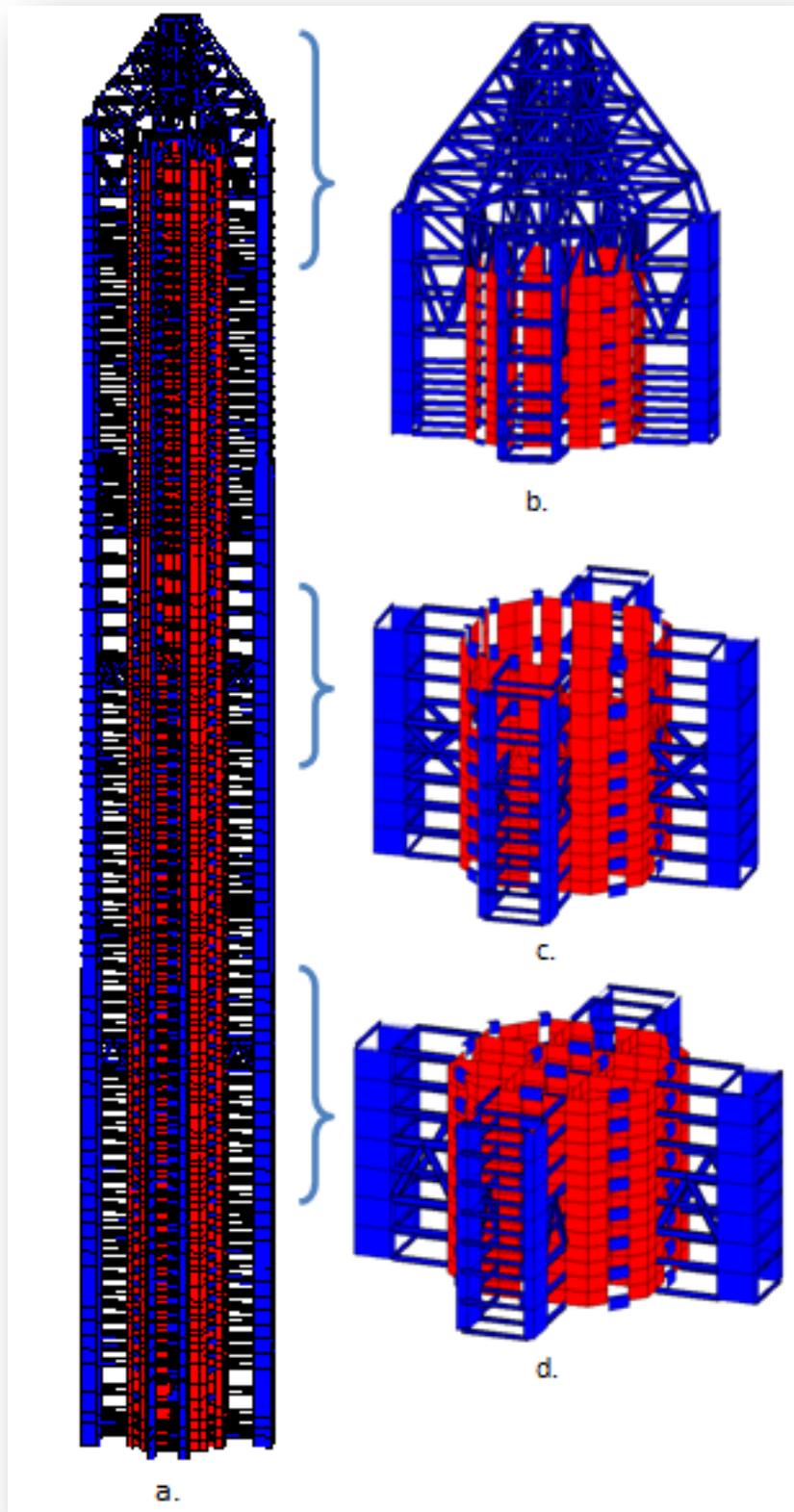


Figura 35. Esquemas del Modelo realizado en GT Strudl. a. Perspectiva del modelo completo, b. detalle del enrejado superior, c. detalle del enrejado del medio, d. detalle del enrejado inferior.

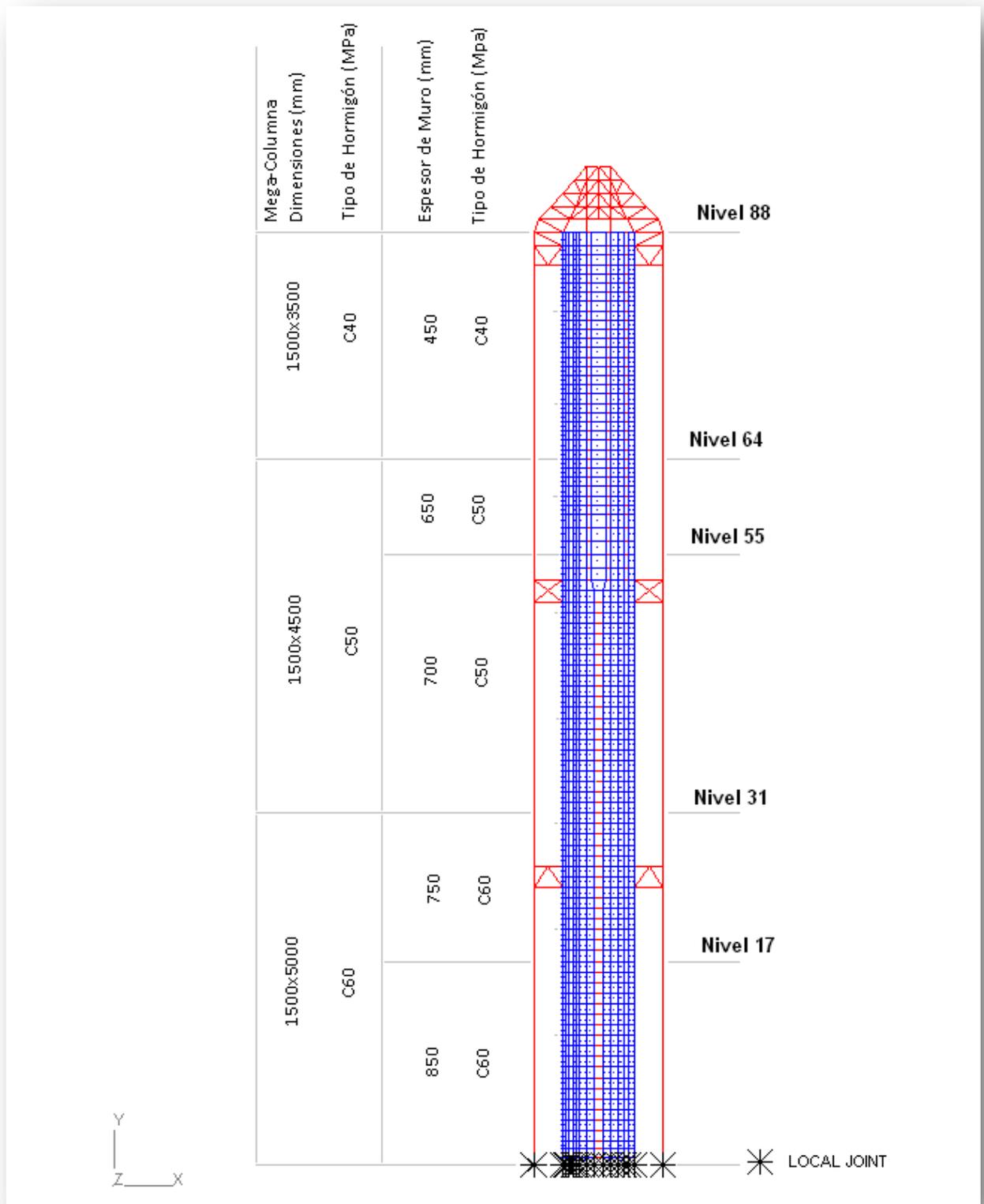


Figura 36. Especificación de los elementos estructurales del edificio.

VI.3.2. Modelo 2 basado en el Taipéi 101.

El modelo 2 basado en el Taipéi 101 posee una característica especial respecto a los otros modelos. Al ser una estructura principalmente de acero se utilizó un modelo principalmente compuesto de elementos tipo barras y muy pocos elementos finitos. (Ver figura 37)

Las mega-columnas de esta estructura fueron modeladas como elementos tipo barras prismáticas (*ELEMENTS*), las que iban desde la base hasta el piso 62 y eran del tipo CFT. Se les asignaron las dimensiones de una sección rectangular y para el siguiente tramo que llega hasta el piso 90 se asignaron las propiedades prismáticas (AX, AY, AZ, IX, IY, etc.).

De esta forma varían las propiedades de las constantes de estos elementos (E, G, etc.) ya que el primer tramo corresponde a unas columnas CFT cuyas propiedades fueron calculadas realizando una proporción entre el área de la columna y su proporción de acero y hormigón de alta resistencia, obteniéndose valores mejorados de la rigidez de tales mega-columnas. Esto no fue necesario para el otro tramo ya que está compuesto de elementos de acero. Un resumen de la distribución de secciones y materiales se puede ver en la siguiente tabla:

Tabla 14. Distribución de secciones de las mega-columnas por pisos.

Distribución por piso	Dimensiones	Tipo de sección	E kN/mm ²	G kN/mm ²
B5 – 37	2,4 x 3,0	Rectangular - CFT	56.505	22.602
37 – 45	2,4 x 2,8	Rectangular - CFT	57.082	22.833
45 – 53	2,2 x 2,6	Rectangular - CFT	58.671	23.468
53 – 62	2,0 x 2,4	Rectangular - CFT	60.545	24.218
62 – 69	2,0 x 2,4	Cajón – Acero	199.948	75.842
69 – 77	1,8 x 2,2	Cajón – Acero	199.948	75.842
77 – 85	1,6 x 2,0	Cajón – Acero	199.948	75.842
85 – 90	1,4 x 1,8	Cajón – Acero	199.948	75.842

Las sub-mega-columnas fueron modeladas de forma muy parecida. Aquí lo único que varía es la distribución por piso de las dimensiones de estas y que solo llegan como columnas CFT hasta el piso 27. Lo mismo sucede con las constantes de los elementos.

Un resumen de estos datos se presenta a continuación:

Tabla 15. Distribución de secciones de las sub-mega-columnas por pisos.

Distribución por piso	Dimensiones	Tipo de sección	E kN/mm ²	G kN/mm ²
B5 – 1	1,2 x 2,6	Rectangular - CFT	67.905	27.162
1 – 4	1,2 x 2,4	Rectangular - CFT	68.626	27.451
4 – 6	1,2 x 2,3	Rectangular - CFT	69.034	27.614
6 – 9	1,2 x 2,2	Rectangular - CFT	65.667	26.267
9 – 14	1,2 x 2,1	Rectangular - CFT	66.101	26.440
14 – 19	1,2 x 2,0	Rectangular - CFT	66.579	26.632
19 – 22	1,2 x 1,9	Rectangular - CFT	67.107	26.843
22 – 23	1,2 x 1,8	Rectangular - CFT	67.695	27.078
23 – 25	1,2 x 1,7	Rectangular - CFT	68.351	27.340
25 – 27	1,2 x 1,6	Rectangular - CFT	69.089	27.635

Las columnas de las esquinas, las columnas del núcleo, las columnas de la fachada y las columnas internas también son CFT y se encuentran modeladas de la misma manera que las anteriores, es decir, como elementos tipo prismáticos (*ELEMENT*). Las columnas de las esquinas solo llegan hasta el piso 26, las columnas de fachada solo llegan al 9º piso pero luego reaparecen en el piso 25 hasta el piso 90 como perfiles H (W-LRFD3) de acero, las columnas internas solo llegan hasta el 1^{er} subterráneo (B1) pero reaparecen entre el piso 90 y 91 como perfiles de acero y las columnas del núcleo llegan como CFT hasta el piso 62 y luego continúan hasta el piso 102 como sección cajón de acero. Un resumen de las propiedades tanto geométricas como de las constantes se presenta a continuación para cada tipo de columna.

Tabla 16. Detalles de las columnas CFT de las esquinas.

Distribución por piso	Dimensiones	Tipo de sección	E kN/mm ²	G kN/mm ²
B5 – 2	1,7 x 1,7	Rectangular - CFT	63.239	25.295
2 – 8	1,6 x 1,6	Rectangular - CFT	64.768	25.907
8 – 26	1,4 x 1,6	Rectangular - CFT	68.446	27.378

Tabla 17. Detalles de las columnas de la fachada.

Distribución por piso	Dimensiones	Tipo de sección	E kN/mm ²	G kN/mm ²
B5 – 9	0,9 x 0,9	Rectangular - CFT	78.007	31.203
25 – 50	W40X249	W-LRFD3 - Acero	199.948	75.842
50 – 90	W33X221	W-LRFD3 - Acero	199.948	75.842

Tabla 18. Detalles de las columnas internas.

Distribución por piso	Dimensiones	Tipo de sección	E kN/mm ²	G kN/mm ²
B5 – B1	1,7 x 1,7	Rectangular - CFT	63.239	25.295
90 – 91	W40X249	W-LRFD3 - Acero	199.948	75.842

Tabla 19. Detalles de las columnas esquineras del núcleo.

Distribución por piso	Dimensiones	Tipo de sección	E kN/mm ²	G kN/mm ²
B5 – 9	1,2 x 1,6	Rectangular - CFT	69.089	27.635
9 – 32	1,2 x 1,5	Rectangular - CFT	69.925	27.970
32 – 50	1,2 x 1,4	Rectangular - CFT	70.881	28.353
50 – 62	0,9 x 1,3	Rectangular - CFT	77.618	31.047
62 – 68	0,9 x 1,3	Cajón - Acero	199.948	75.842
68 – 74	0,8 x 1,2	Cajón - Acero	199.948	75.842
74 – 85	0,8 x 1,1	Cajón - Acero	199.948	75.842
85 – 95	0,8 x 1,0	Cajón - Acero	199.948	75.842

Tabla 20. Detalles de las columnas perimetrales del núcleo.

Distribución por piso	Dimensiones	Tipo de sección	E kN/mm ²	G kN/mm ²
B5 – 9	1,2 x 1,2	Rectangular - CFT	73.271	29.308
9 – 32	1,1 x 1,1	Rectangular - CFT	76.295	30.518
32 – 50	1,0 x 1,0	Rectangular - CFT	74.226	29.690
50 – 62	0,9 x 0,9	Rectangular - CFT	78.007	31.203
62 – 95	0,8 x 0,8	Cajón - Acero	199.948	75.842

Tabla 21. Detalles de las columnas centrales del núcleo.

Distribución por piso	Dimensiones	Tipo de sección	E kN/mm ²	G kN/mm ²
B5 – 9	1,2 x 1,2	Rectangular - CFT	73.271	29.308
9 – 32	1,1 x 1,1	Rectangular - CFT	76.295	30.518
32 – 62	1,0 x 1,0	Rectangular - CFT	74.226	29.690
62 – 68	0,9 x 0,9	Rectangular - CFT	78.007	31.203
68 – 102	0,8 x 0,8	Cajón - Acero	199.948	75.842

El marco especial resistente al momento (SMRF) fue modelado con una serie de columnas y vigas orientados según la geometría obtenida de la investigación de Shieh et al (2005). Estas vigas fueron modeladas con elementos tipo barra (*ELEMENT*) y uniones tipo marco (*FRAME*). Para las columnas entre los pisos 25 al 90 se utilizaron perfiles H (W-LRFD3) tipo W40X249 siguiendo con W33X221 en los pisos superiores.

En el caso de las vigas del SMRF se utilizaron diversos perfiles desde W44X335 para los niveles bajo el piso 27 hasta W36X230 para algunas partes de los pisos superiores.

Las vigas que unen las mega-columnas con el núcleo del edificio fueron modeladas utilizando perfiles W40X593 de forma típica así como un perfil W36X230 fue usado para unir las sub-mega-columnas con el núcleo.

También se usaron perfiles W40X593 para representar las vigas que unían las mega-columnas con las sub-mega-columnas en el interior de la estructura.

Para las riostras perimetrales (*Belt Truss*) se utilizaron distintos perfiles H siendo el más común el perfil W18X130.

En el caso de las riostras interiores (*Outrigger Truss*) se recurrió a perfiles un poco más pesados ya que estos van a ser los encargados de traspasar los esfuerzos de las mega columnas al núcleo por lo que se usaron perfiles W24X146 (típicamente).

También se debió modelar una serie de riostras interiores del núcleo que típicamente utilizaron perfiles tipo W16X100. Asimismo se utilizaron perfiles tipo W44X335 para modelar riostras en el plano o perfiles W36X230 para riostras para las zonas de transferencia que estaban ubicadas en los pisos mecánicos del edificio.

Un detalle de la utilización de todos estos perfiles se puede ver en el código del modelo que se encuentra en el anexo A.

Los únicos elementos finitos utilizados en este modelo se encuentran en los primeros pisos (B5 al 8º piso) y corresponden a muros del núcleo que fueron llenados con hormigón de alta resistencia pero dejando los perfiles de acero dentro del muro. Por lo que para modelar esto se dejaron los perfiles y se agregó un elemento finito triangular en el espacio que había entre las columnas, vigas y riostra de los muros del núcleo. El elemento finito triangular utilizado es un tipo 'SBHT6' de 6 grados de libertad en cada nudo. El espesor de estos elementos es de unos 600 mm y el hormigón utilizado es el mismo que el utilizado para llenar las columnas (alta resistencia) que es un C70.

En el modelo 2 basado en el Taipéi 101 también se utilizó el concepto de viga infinitamente rígida. Esta fue utilizada por las mismas razones que el modelo anterior, las columnas poseen dimensiones demasiado grandes lo que castiga el comportamiento de las vigas y riostras que unen éstas con el núcleo. Pero esta vez se utilizó otra herramienta de GT Strudl como es la definición de nudos esclavos.

Se definieron 2 ó 3 nudos por mega-columna (dependiendo del piso) los que eran unidos al nodo central de la mega-columna como unión rígida (*TYPE RIGID SOLID*), es decir, transmite los 6 grados de libertad al nodo central comportándose como un sólo elemento. Con esto se evita la definición de una serie de elementos y propiedades de vigas infinitamente rígidas que pueden tener algún costo sobre el programa debido a la cantidad de elementos que son.

La masa de este modelo fue calculada de manera mixta, de la misma forma que el modelo anterior. El programa calculó automáticamente la masa de los elementos finitos y de las barras para asignarlas a los nudos correspondientes y externamente se asigna la masa de las losas y sobrecargas presentes en la estructura. La masa "externa" fue asignada en todas las direcciones de acción que tendrían como si estuviera presente, es decir:

- Traslacionalmente en X, Y y Z.
- Rotacionalmente en Y.

La masa se asignó en un nudo "maestro" del diafragma rígido de cada piso, que se ubicaba en el centro de cada planta. Hay que mencionar que a todos los pisos que tuvieran las

características de piso mecánico se asumía una sobre carga de 1 tonf/m^2 en vez de las 250 kgf/m^2 que normalmente se le aplica a los pisos de oficinas.

El detalle de las masas asignadas en cada nudo se puede ver en las tablas A.3, A.4 y A.5 del anexo A.

El diafragma rígido que se usó en este caso es el de '*RIGID PLANE*' que enlaza los grados de libertad traslacionales en X y Z y el giro que se produce en Y. Este diafragma une todos los nudos de las columnas perimetrales y del núcleo al nodo "maestro" que se ubica en el centro, pero no a las mega-columnas y sub-mega-columnas. Esto se tuvo que realizar así ya que la definición previa de nudos esclavos que representen cachos infinitamente rígidos causa que el programa no pueda volver a redefinir el nodo "maestro" antiguo (que sería el del centro de la mega-columna) como nudo esclavo del nodo "maestro" central de la planta.

Pero esto no causa ningún problema ya que la transferencia de esfuerzos se realiza libremente a través de las vigas y riostras que llegan a las columnas.

Los apoyos del edificio se modelaron como apoyos empotrados en todos los nudos de la base, que debería representar el comportamiento de la fundación que posee esta estructura.

El detalle del código que se utilizó para analizar este edificio en GT Strudl se encuentra en el anexo B bajo el nombre TP101_01_MODEL.GTI.

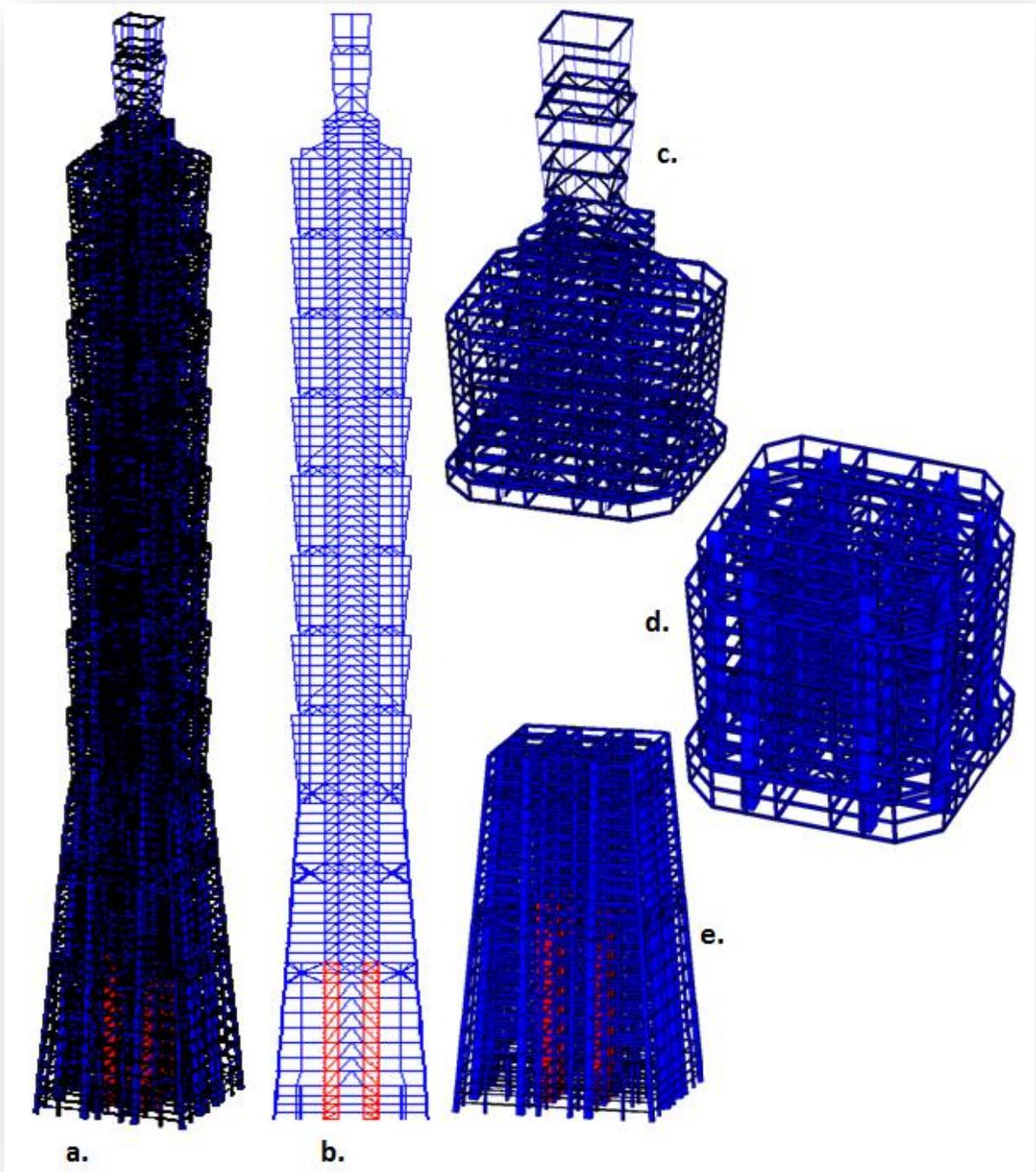


Figura 37. Secciones y perspectivas del modelo 2 basado en el Taipéi 101. (a) Perspectiva del modelo, (b) sección del modelo, (c) Detalle de los últimos pisos, (d) detalle de una sección típica y (e) detalle de la base del edificio.

VI.3.3. Modelo 3 basado en las Torres Petronas.

Este nuevo modelo presenta una configuración más parecida a la realizada en el modelo 1 basado en la torre Jin Mao. (Ver figura 39)

El modelo 3 basado en las Torres Petronas comprende dos series de elementos a utilizar: barras para columnas y vigas; y elementos finitos que representen los muros del núcleo. Además la estructura se separa en 4 elementos estructurales principales:

- Marco del edificio principal, formado por columnas y vigas.
- Marco del edificio auxiliar (*bustle*), formado por columnas y vigas.
- Núcleo de muros.
- Vigas que unen el edificio principal con el auxiliar (*bustle*) y vigas de la riostra de los pisos 38, 39 y 40.

Para las columnas de la torre principal y las de la torre auxiliar o "*bustle*" se utilizaron elementos tipo barra de sección circular llena ya que representan columnas circulares de hormigón armado. De la publicación de Mohamad et al (1995) se obtuvieron las distribuciones de hormigón para determinar sus constantes elásticas y dimensiones geométricas. La geometría fue obtenida a través de aproximaciones de los modelos a escala de esta publicación.

Las columnas de la torre central pasan a ser de acero en la parte superior desde el piso 84 reemplazando las columnas circulares de hormigón armado por perfiles H (W-LRFD3) tipo *JUMBO SECTIONS* ad-hoc al diámetro que viene de antes con un perfil W36x393, que posee un alma cercana al metro de ancho. También hay que mencionar que todas las columnas del marco auxiliar que están unidas a través de una viga con el marco principal poseen un diámetro mayor al del resto de las columnas aproximadamente 200 mm. para el primer tramo y 100 mm. para el segundo.

Un resumen con la distribución de las propiedades de las columnas en altura se muestra a continuación.

Tabla 22. Resumen de la distribución de las columnas y sus propiedades.

Pisos	Diámetro de las columnas [m]		Resistencia del hormigón [MPa]	E [kN/mm ²]	G [kN/mm ²]
	TORRE	AUXILIAR			
B4 – 4	2.4	1.4	80	40.703	16.281
4 – 20	2.1	1.2	80	40.703	16.281
20 – 38	2.1	1.2	60	34.856	13.942
38 – 50	1.8	1.2	60	34.856	13.942
50 – 61	1.5		60	34.856	13.942
61 – 70	1.5		40	27.806	11.122
70 – 84	1.2		40	27.806	11.122
84 – 88	W36x393		ACERO	199,948	75,842

Las vigas del marco principal y auxiliar estaban formadas por secciones variables de hormigón armado en el edificio real. En este modelo para simplificar la programación de la

estructura se optó por dejar la sección como rectangular continua pero se castigó el ancho que poseía la viga. En la estructura real la viga partía con un alto de 1150 mm. y disminuía hasta llegar a los 725 mm. Después seguía continúa por una cierta distancia y volvía a ensancharse a la altura anterior para conectarse con la columna. En este modelo aproximado se utilizó una altura continua de 800 mm.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de las propiedades geométricas y constantes de las vigas.

Tabla 23. Resumen de la distribución de las vigas y sus propiedades.

Pisos	TORRE		AUXILIAR		Resistencia del hormigón [MPa]	E [kN/mm ²]	G [kN/mm ²]
	Ancho [mm]	Alto [mm]	Ancho [mm]	Alto [mm]			
B4 – B1	1000	600	800	600	80	40.703	16.281
1 – 30	1000	800	800	800	80	40.703	16.281
31 – 41	1000	800	800	800	60	34.856	13.942
42 – 60	1000	800	800	800	60	34.856	13.942
60 – 84	1000	800	800	800	40	27.806	11.122

En cuanto a los muros del núcleo se utilizaron elementos finitos rectangulares tipo ‘SBHQ6’ de 6 grados de libertad.

Los muros iban disminuyendo en cantidad a medida que el edificio aumentaba sus pisos pero quedando 3 líneas de muros principales que llegan hasta el 84º piso. La distribución de que muros iban desapareciendo en que pisos fue obtenida de la publicación de Abada (2004) y la de Mohamad et al (1995).

Un detalle de los espesores de muro, dimensiones del núcleo y propiedades de los materiales es presentado en la siguiente tabla:

Tabla 24. Resumen de las propiedades geométricas y de los materiales de los muros.

Pisos	Dimensiones del Núcleo		Espesor Muro		Muro en zona ascensor		Resistencia del hormigón [MPa]	E [kN/mm ²]	G [kN/mm ²]
	N-S [mm]	E-O [mm]	Ext. [mm]	Int. [mm]	Ext. [mm]	Int. [mm]			
B4 – 20	22690	22810	750	350	450	350	80	40.703	16.281
20 – 30	22440	22310	500	350	450	350	80	40.703	16.281
30 – 40	22440	22310	500	350	450	350	60	34.856	13.942
40 – 60	19000	22310	500	350	450		60	34.856	13.942
60 – 84	18750	22310	350	350			40	27.806	11.122

Para el caso de las vigas que unen el marco principal con el auxiliar no se tenía mayor información por lo que se supuso un tamaño similar al de las vigas de la torre principal, sólo que con un poco más de altura debido a que los esfuerzos que estas vigas debían ser mayores. Es decir, las vigas hasta el 1er subterráneo poseen un ancho de 1000 mm. y un alto de 600 mm. y para el resto de los pisos hasta el 41 (que es donde llega el marco auxiliar) poseen 1000 mm. de

ancho y 1200 mm. de alto. Las constantes elásticas y de corte utilizadas poseen la misma distribución que las vigas de los marcos principal y auxiliar.

Para el caso de las vigas especiales de los pisos 38, 39 y 40 que funcionan como riostras del edificio transmiten gran parte de los esfuerzos hacia el núcleo de muros por lo que las dimensiones de estas son bastante considerables. Se puede apreciar en la figura 38 un detalle de estas vigas y la columna auxiliar que queda en el medio.

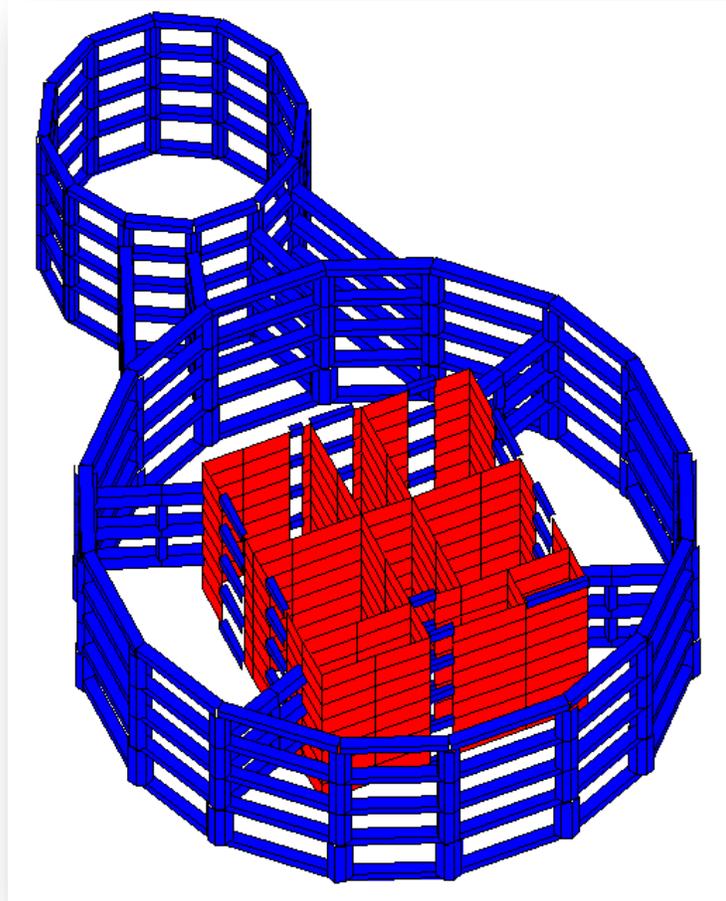


Figura 38. Detalle de la zona de trasferencias del modelo 3 basado en las Torres Petronas.

Las dimensiones de estas vigas y columnas son:

Tabla 25. Características de las vigas y columnas de los pisos 38,39 y 40.

Pisos	Ancho [mm]	Alto [mm]	Resistencia del hormigón [MPa]	E [kN/mm ²]	G [kN/mm ²]
38	1000	1400	60	34.856	13.942
39	1000	1700	60	34.856	13.942
40	1000	1400	60	34.856	13.942
Columna	700	700	60	34.856	13.942

La masa de este modelo fue calculada de manera mixta, de la misma forma que los modelos anteriores. El programa calculó automáticamente la masa de los elementos finitos y de las barras para asignarlas a los nudos correspondientes y externamente se asigna la masa de las losas y sobrecargas presentes en la estructura. La masa “externa” fue asignada en todas las direcciones de acción que tendrían como si estuviera presente, es decir:

- Traslacionalmente en X, Y y Z.
- Rotacionalmente en Y.

La masa se asignó en un nudo “maestro” del diafragma rígido de cada piso, que se ubicaba en el centro de cada planta. Hay que mencionar que a todos los pisos que tuvieran las características de piso mecánico se asumía una sobre carga de 1 tonf/m² en vez de las 250 kgf/m² que normalmente se le aplica a los pisos de oficinas.

El detalle de las masas asignadas en cada nudo se puede ver en las tablas A.6 y A.7 del anexo A.

El diafragma rígido que se usó en este caso es el de ‘*RIGID PLANE*’ que enlaza los grados de libertad traslacionales en X y Z y el giro que se produce en Y. Este diafragma une todos los nudos de las columnas perimetrales y del núcleo al nudo “maestro” que se ubica en el centro.

Los apoyos del edificio se modelaron como apoyos empotrados en todos los nudos de la base, que debería representar el comportamiento de la fundación que posee esta estructura.

El detalle del código que se utilizó para analizar este edificio en GT Strudl se encuentra en el anexo B bajo el nombre PT_01_MODEL.GTI.

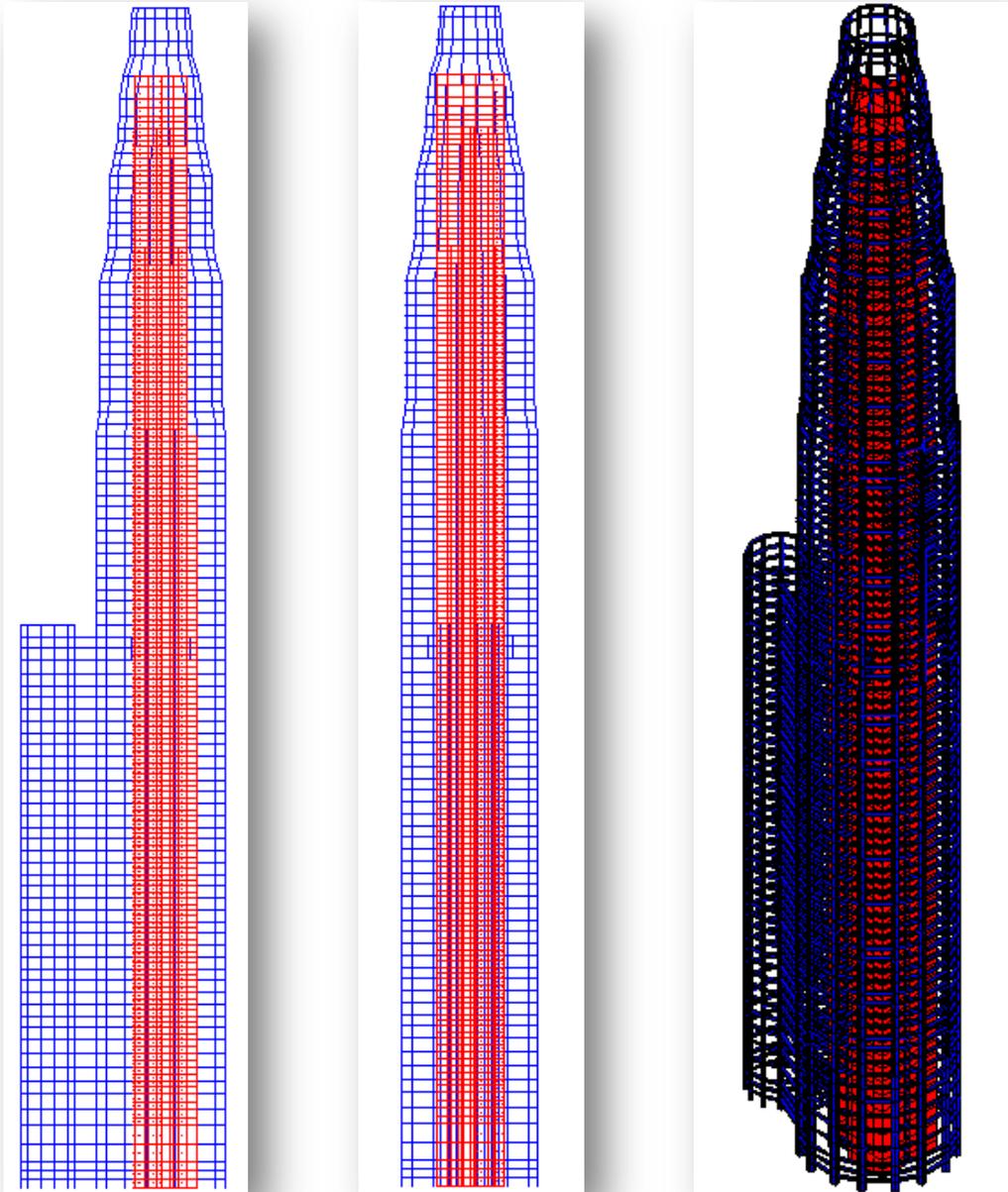


Figura 39. A la izquierda sección XY, al medio sección ZY y a la derecha una perspectiva del modelo 3 basado en las Torres Petronas.

VI.3.4. Modelo 4 basado en el edificio Central Plaza.

Para el caso del modelo 4 basado en el edificio Central Plaza se requirieron, aproximadamente, de los mismos tipos de elementos que para los modelos 1 y 3. (Ver figura 43)

En esta instancia también se utilizaron elementos tipo barra y elementos finitos rectangulares y triangulares, estos para modelar distintos componentes estructurales que trabajan en la resistencia de esfuerzos laterales de la estructura. Estos son:

- Muros del núcleo.
- Columna del núcleo.
- Columnas circulares de la base.
- Marco superior, que está compuesto por columnas y vigas.
- Viga de traspaso de esfuerzos.
- Losa de traspaso de esfuerzos.
- Marco superior.

Para los muros del núcleo se utilizaron elementos finitos rectangulares tipo 'SBHQ6' de 6 grados de libertad. Estos muros llegan hasta el piso 75 pero no todos ya que van siendo eliminados algunos tramos a medida que el edificio va adquiriendo altura.

El material utilizado para todos los muros, losas, vigas y columnas fue un hormigón C60 con las siguientes constantes.

$$E=34,856 \text{ [kN/mm}^2\text{]} \quad G=13,942\text{[kN/mm}^2\text{]}$$

Para la columna que se encuentra en el núcleo se utilizó un elemento tipo barra prismática a la cual se le asignaba la forma circular a través de un diámetro y el programa calculaba el resto de las propiedades geométricas como un cilindro lleno. El diámetro era igual a 3.5 metros hasta el piso 26, luego disminuía a 2.5 metros hasta el piso 57 para cambiar a 1.5 metros de diámetro hasta el piso 75.

En el caso de las columnas circulares de la base también se utilizó el mismo tipo de procedimiento anterior pero aquí las columnas poseían diámetros de 3.0 metros. Además las columnas de las esquinas del triángulo eran dobles separadas a una distancia aproximada de un diámetro unidas solidariamente. Para esto, se ubicó una viga infinitamente rígida en cada piso. Estas vigas llegan hasta el piso 4 donde existe, desde el 3^{er} piso, una zona de transferencia. (ver figura 40)

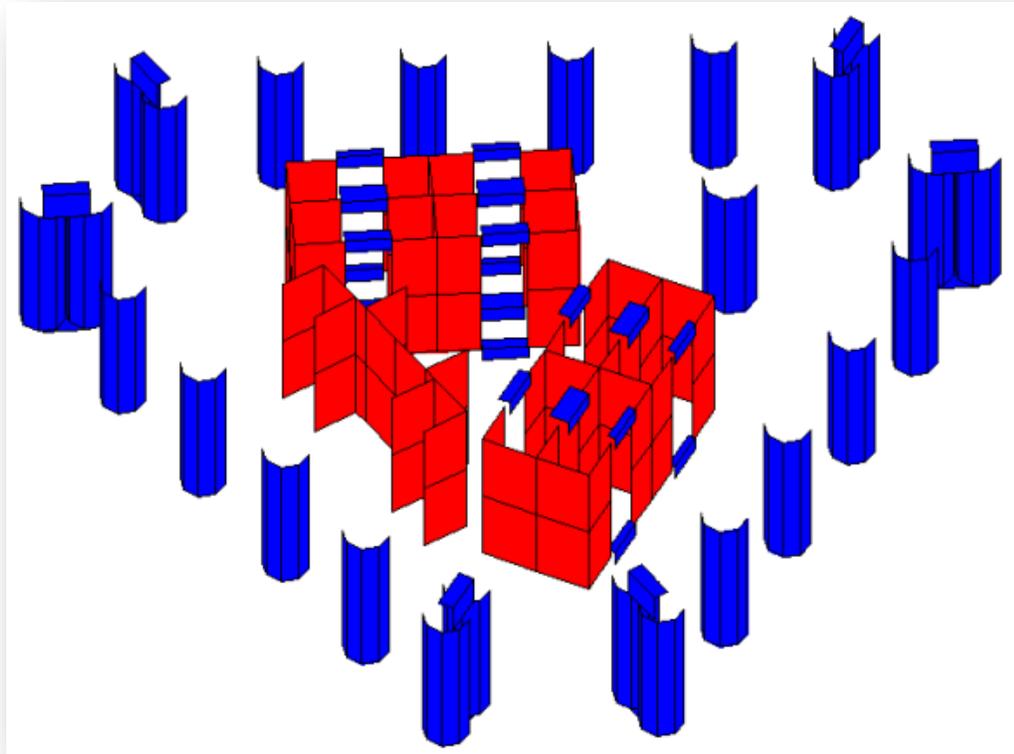


Figura 40. Detalle de la base del modelo 4, donde se ubican las columnas circulares.

El marco superior está compuesto por columnas cuadradas y vigas rectangulares que fueron modeladas con elementos prismáticos. Las columnas parten con un lado de 1,7 metros pero pasan desde el piso 26 a ser de 1,5 metros de lado. Luego en el piso 63 existe un cambio en el marco eliminándose algunas columnas intermedias quedando ahora separadas a 9.2 metros, pero estas nuevas columnas dejan de ser cuadradas para pasar a ser rectangulares de dimensiones 1,5 x 0,75 metros. Las vigas por otro lado poseen dimensiones según el tipo de columnas que estén uniendo (anchos de 1,7, 1,5 o 0,75 metros) y alto 1,1 metros. El marco llega solo hasta el piso 69. (Ver figura 41)

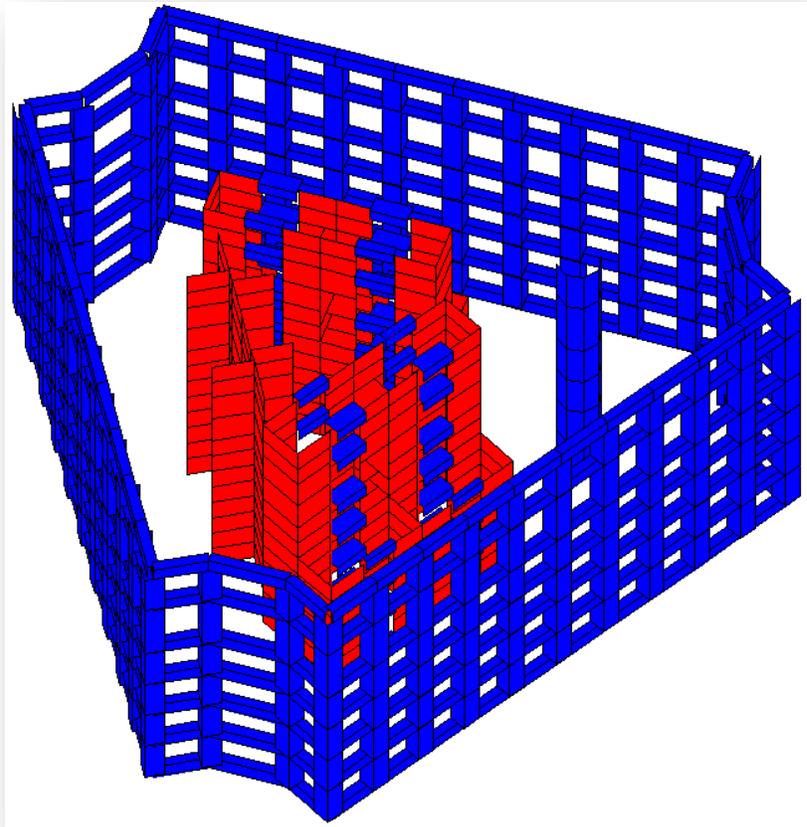


Figura 41. Detalle de una sección del modelo 4 en la zona del marco con columnas cuadradas, se aprecia una disminución de los muros del núcleo.

La zona de transferencia está compuesta por dos elementos: una viga perimetral y una losa.

La viga tiene un ancho de 2,8 metros y posee un alto de 5,5 metros. Debido a estas grandes dimensiones y a que transfiere los esfuerzos de las columnas cuadradas a las columnas circulares se decidió modelarla con elementos finitos rectangulares. La viga se inicia en el 3^{er} piso pero llega hasta el 5^o piso. Los elementos finitos que se utilizaron fueron los 'SBHQ6' de 6 grados de libertad.

La losa de transferencia es importante ya que transfiere todos los esfuerzos de corte del marco al núcleo. Para que tenga este resultado la losa posee un espesor de 1 metro lo que hizo necesario modelar la losa de esa zona y no hacer un diafragma. Aquí no se utilizaron elementos finitos de 6 grados de libertad como antes sino que de 3 grados de libertad tipo placa flexible (*PLATE BENDING*) que utilizan los grados de libertad u_3 , u_4 y u_5 . Se usaron elementos tipo 'BPHQ' para las placas rectangulares y 'BPHT' para las triangulares. (ver figura 42)

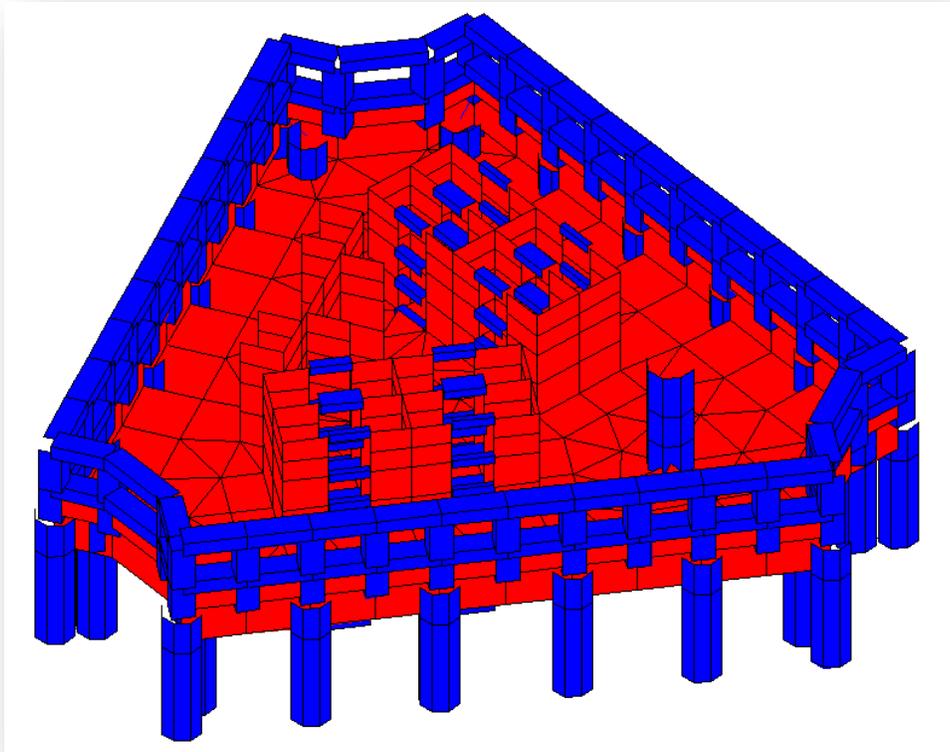


Figura 42. Destalle de la zona de transferencia de esfuerzos. Se puede ver la losa, la viga y el cambio de columnas circulares de la base a cuadradas.

El marco superior está compuesto por 3 columnas de hormigón armado que nacen del piso 69 y que rematan en una forma piramidal entre los pisos 73 al 78 (piso final).

La masa de este modelo fue calculada de manera mixta, como los modelos anteriores, el programa calculó automáticamente la masa de los elementos finitos y de las barras para asignarlas a los nudos correspondientes y externamente se asigna la masa de las losas y sobrecargas presentes en la estructura. La masa “externa” fue asignada en todas las direcciones de acción que tendrían como si estuviera presente, es decir:

- Traslacionalmente en X, Y y Z.
- Rotacionalmente en Y.

La masa se asignó en un nudo “maestro” del diafragma rígido de cada piso, que se ubicaba en el centro de cada planta. Hay que mencionar que a todos los pisos que tuvieran las características de piso mecánico se asumía una sobre carga de 1 tonf/m^2 en vez de las 250 kgf/m^2 que normalmente se le aplica a los pisos de oficinas.

El detalle de las masas asignadas en cada nudo se puede ver en las tablas A.8 y A.9 del anexo A.

El diafragma rígido que se usó en este caso es el de ‘*RIGID PLANE*’ que enlaza los grados de libertad traslacionales en X y Z y el giro que se produce en Y. Este diafragma une todos los nudos

de las columnas perimetrales y del núcleo al nodo “maestro” que se ubica en el centro menos en los pisos del 1 al 6 y del B1 al B2 donde el diafragma une solo a los nodos de los muros del núcleo y la columna. Esto se debe a que la estructura para asegurar la transferencia de esfuerzos a través de la losa del 3^{er} piso libera transversalmente las losas de los pisos mencionados y solo trasmite las fuerzas gravitacionales.

Los apoyos del edificio se modelaron como apoyos empotrados en todos los nudos de la base, que debería representar el comportamiento de la fundación que posee esta estructura.

El detalle del código que se utilizó para analizar este edificio en GT Strudl se encuentra en el anexo B bajo el nombre CT_01_MODEL.GTI.

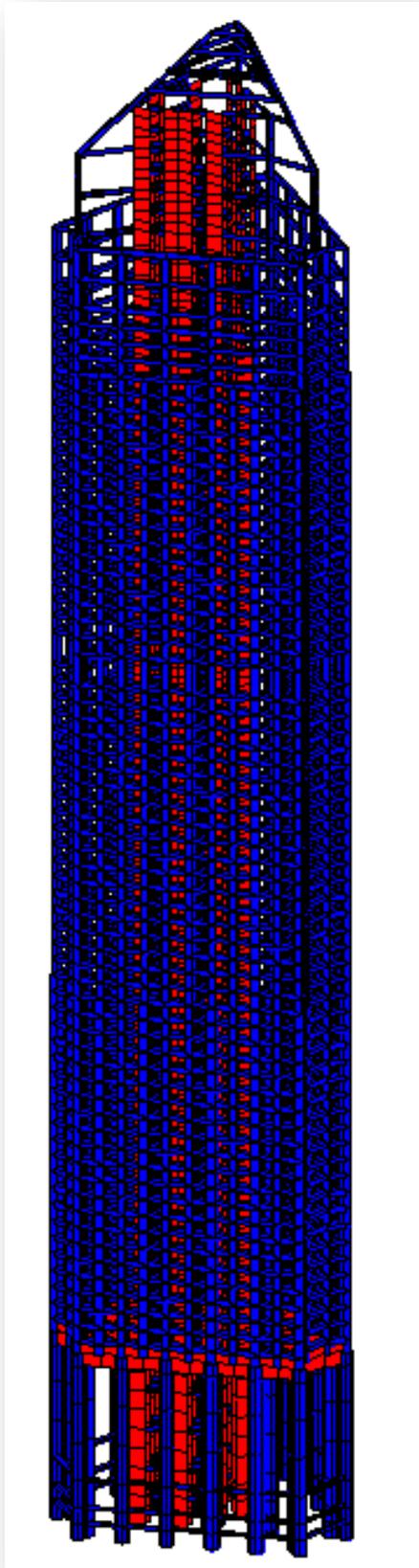


Figura 43. Perspectiva del modelo 4 basado en el Central Plaza.

CAPÍTULO VII: OBTENCIÓN DE PARÁMETROS DEL ANÁLISIS DE LOS MODELOS Y GENERACIÓN DE INDICADORES.

VII.1. Introducción.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los modelos.

Cabe destacar que se busco conseguir una participación dinámica de la masa del orden del 98% traslacionalmente. Esto significo obtener 200 modos para los modelos de la torre Jin Mao y del Taipéi 101. En el caso del modelo de las torres Petronas y del Central Plaza se obtuvieron 300 modos.

Todos los parámetros obtenidos se calcularon según la combinación CQC. Aquellos datos que no eran combinados directamente con el programa fueron combinados externamente con un programa realizado en SciLab. Este es un programa de cálculo numérico científico tipo MatLab pero de código abierto.

VII.2. Indicadores del perfil Bío-Sísmico.

VII.2.1. Indicadores de Rigidez.

1. H / T:

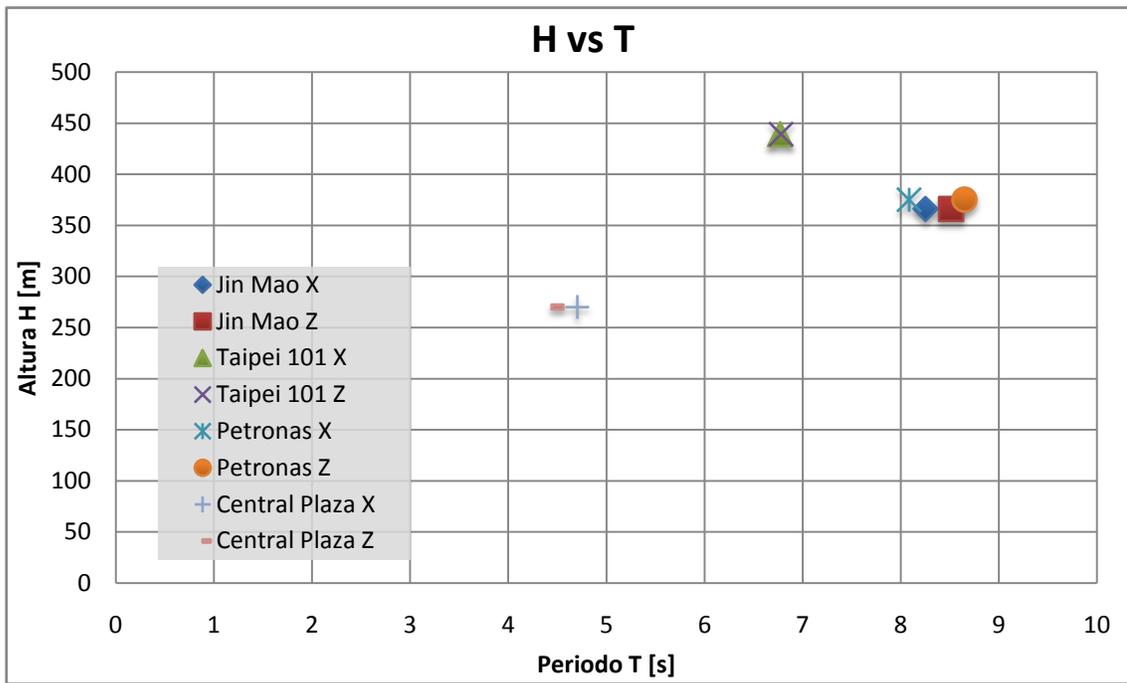


Figura 44. Gráfico de los resultados obtenidos para los modelos para el parámetro H/T.

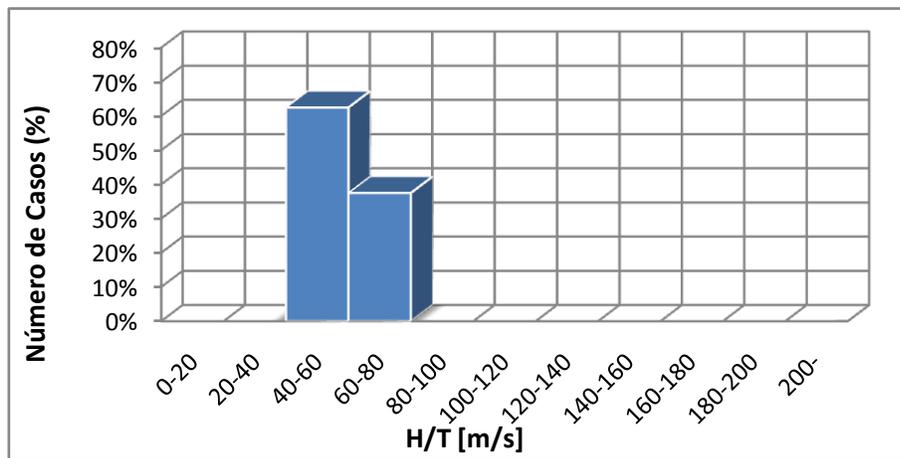


Figura 45. Gráfico del número de casos en el parámetro H/T.

Se puede observar que los resultados para los modelos se agrupan según sus materiales de construcción. Se aprecian dos grupos uno formado por los modelos de hormigón armado y otro por el edificio de acero.

Además los edificios de iguales pisos y materiales (modelos del Jin Mao y de las torres Petronas) poseen similar H/T.

2. Efecto P-Δ:

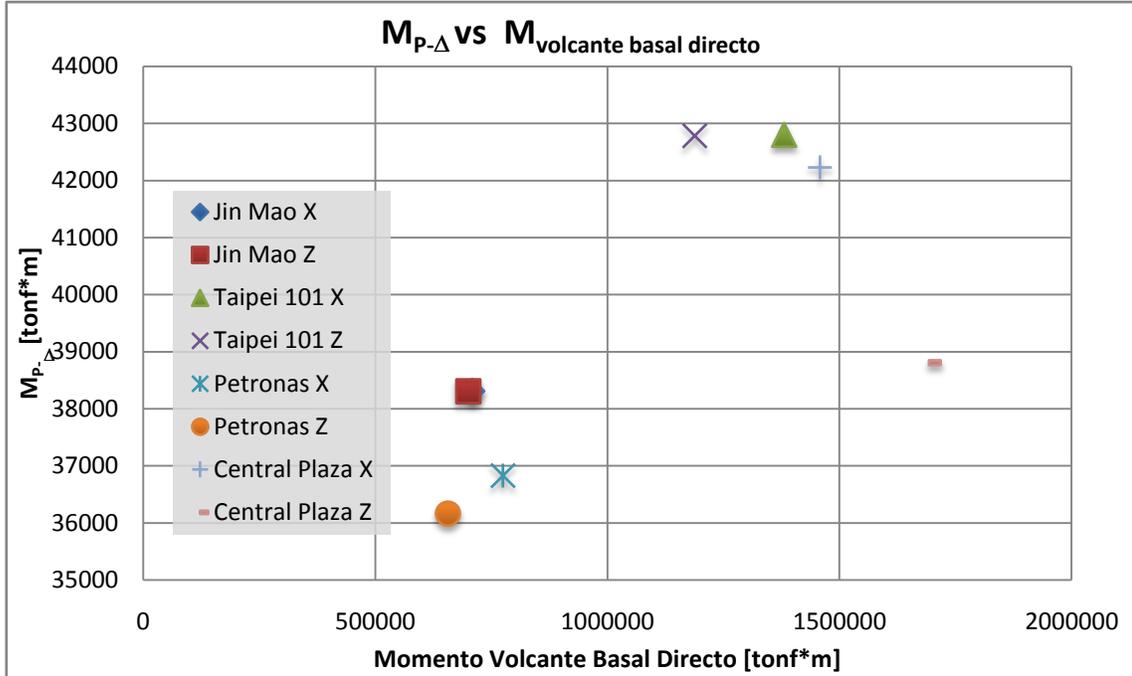


Figura 46. Grafico de los resultados de los modelos para el parámetro del efecto P-Δ.

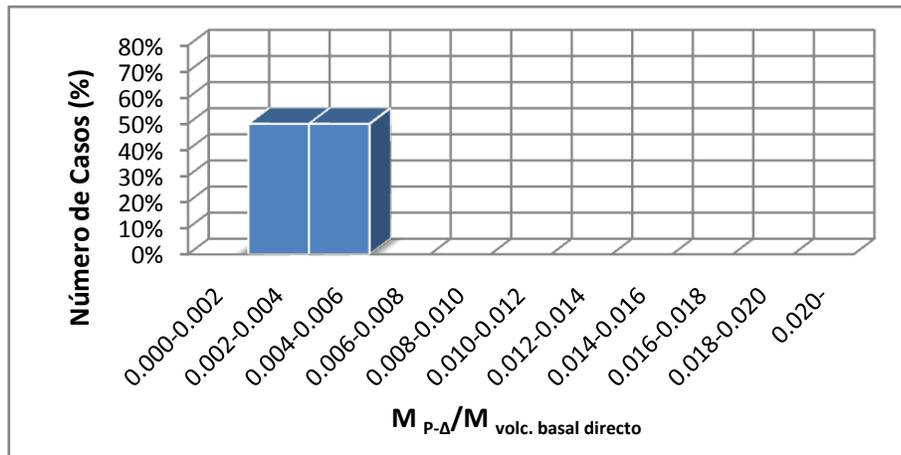


Figura 47. Gráfico del número de casos en el parámetro del efecto P-Δ.

En el caso de este parámetro podemos ver que la mayoría de los valores se agrupan entre el 2‰ y el 6‰. Estos valores nos indican que los efectos secundarios son todavía muy pequeños para entrar a considerarlos, por lo que no es necesario hacer un análisis más riguroso de este efecto.

3. Desplazamiento del nivel superior:

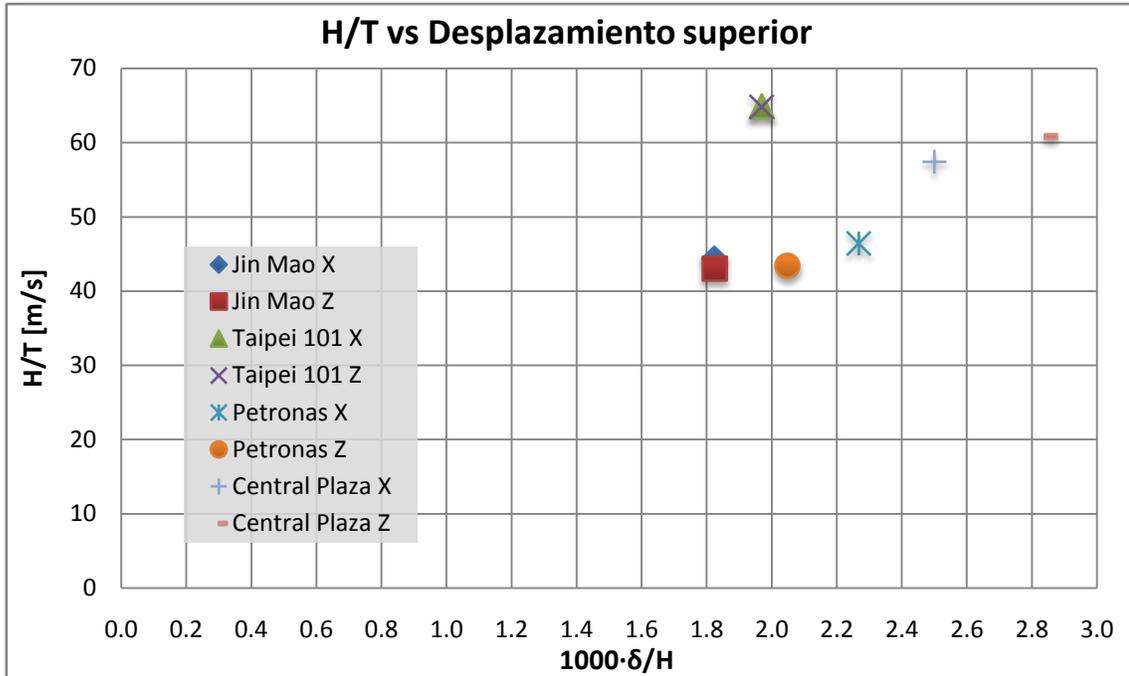


Figura 48. Gráfico de los resultados de los modelos para el parámetro del desplazamiento total nivel superior.

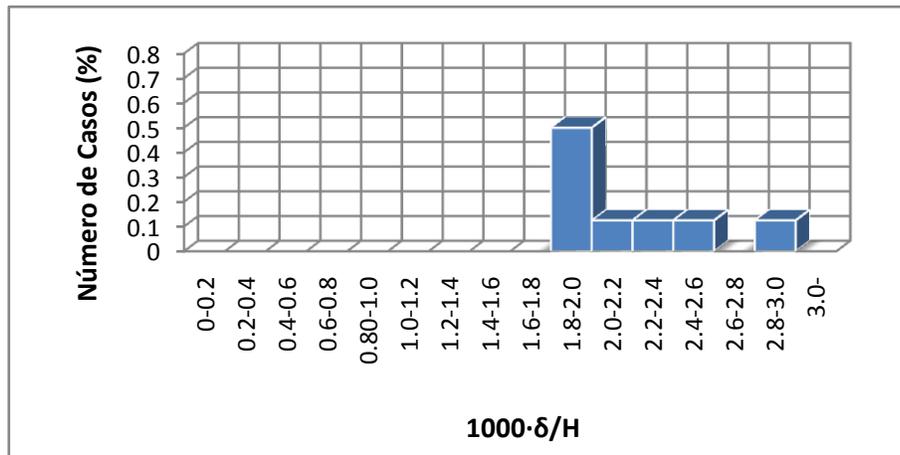


Figura 49. Gráfico del número de casos en el parámetro del desplazamiento total del nivel superior.

Podemos ver que para este caso también se aprecia la agrupación de los resultados según la respuesta de los materiales.

A pesar de que la altura de los modelos supera los 300 metros la mayoría de los modelos no sufre deformaciones superiores al 3‰.

4. Desplazamiento máximo entrepiso en centro de gravedad:

Se puede observar en los siguientes gráficos la distribución en función de la altura del desplazamiento entrepisos medido en el centro de gravedad.

Podemos ver que aquellos puntos de mayor desplazamiento están ubicados en zonas superiores donde las estructuras poseen menores elementos resistentes. Además de las forma de los grafios se puede observar fácilmente la ubicación de los sistemas traspaso de esfuerzos como riostras, vigas, enrejados, etc.

En el grafico del número de casos se muestra el valor máximo obtenido.

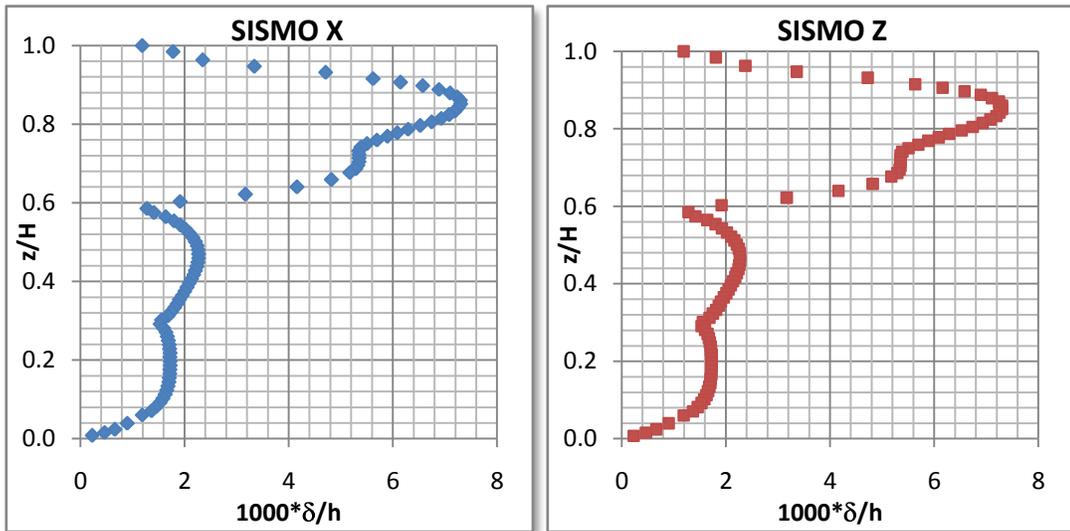


Figura 50. Gráficos resumen de los desplazamientos entrepiso del modelo de la torre Jin Mao.

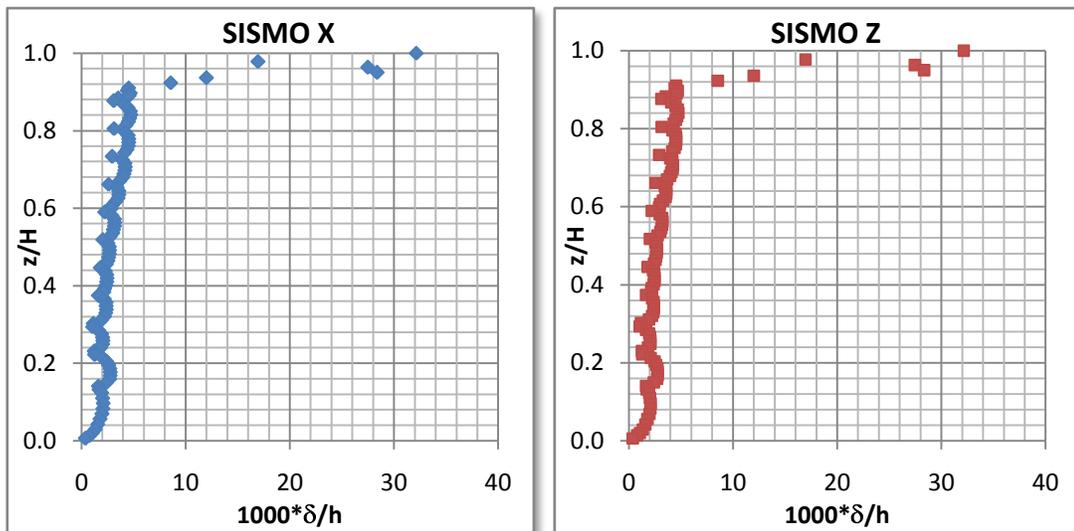


Figura 51. Gráficos resumen de los desplazamientos entrepiso del modelo del Taipéi 101.

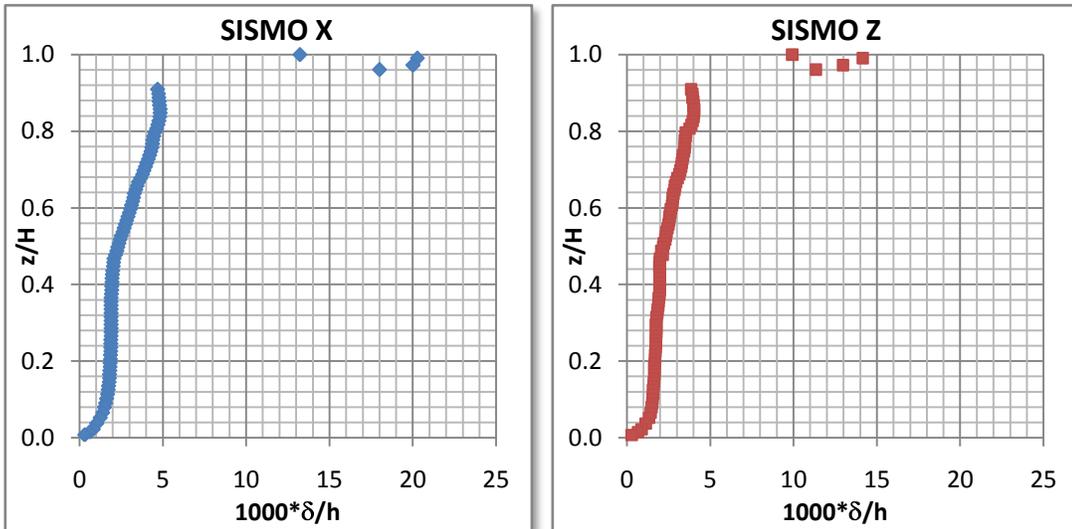


Figura 52. Gráficos resumen de los desplazamientos entre piso del modelo de las torres Petronas.

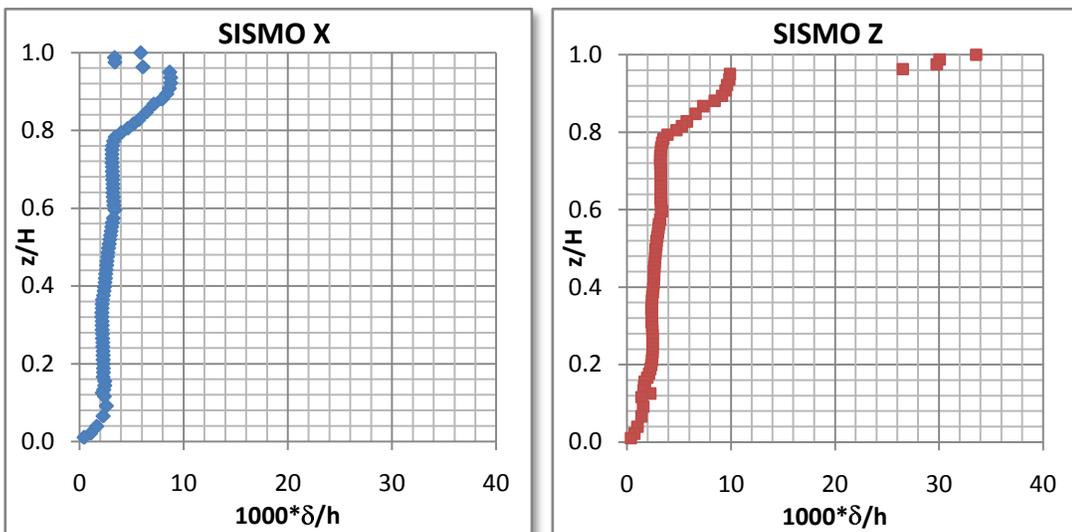


Figura 53. Gráficos resumen de los desplazamientos entre piso del modelo del Central Plaza.

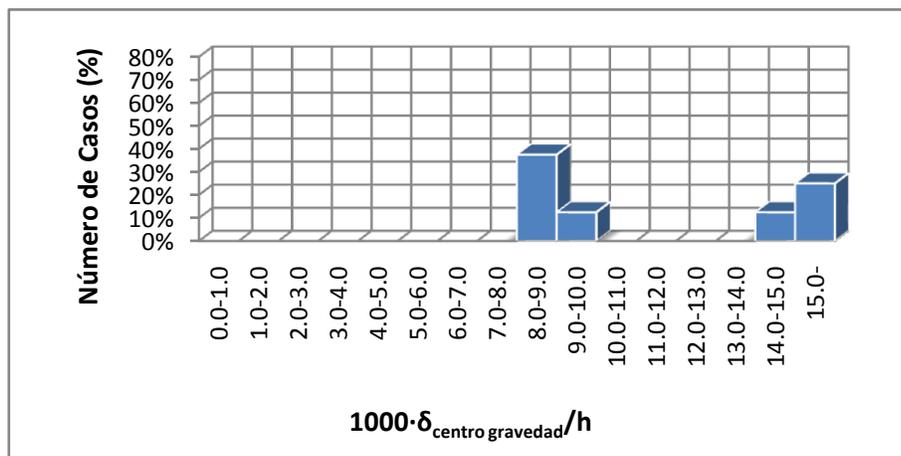


Figura 54. Gráfico del número de casos en el parámetro desplazamiento entre pisos en el centro de gravedad.

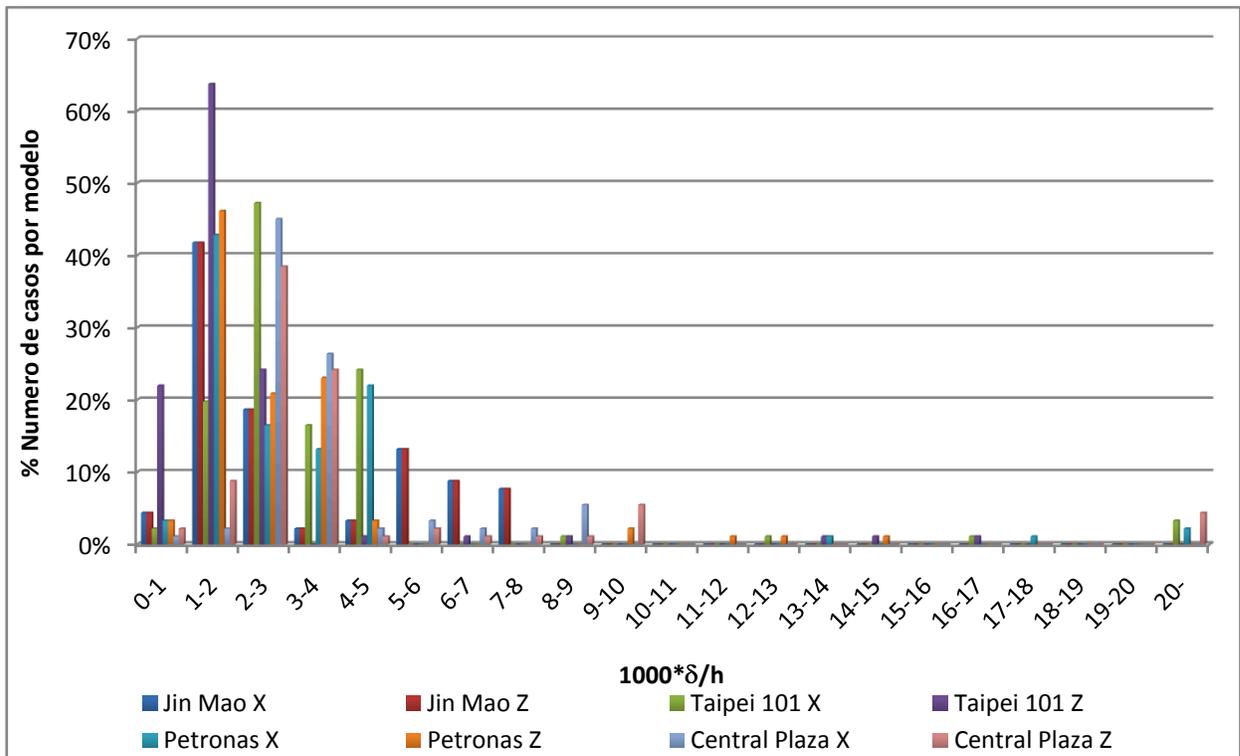


Figura 55. Gráfico estadístico de los desplazamientos entrepisos en el centro de gravedad obtenidos para cada edificio.

Tabla 26. Resumen de datos estadísticos de la medición del desplazamiento entrepisos en el centro de gravedad (todos los valores en %).

	Jin Mao X	Jin Mao Z	Taipéi 101 X	Taipéi 101 Z	Petronas X	Petronas Z	Central Plaza X	Central Plaza Z
MEDIA GEOMÉTRICA	2.58	2.58	2.85	2.85	2.65	2.41	2.99	3.23
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	2.13	2.13	3.96	3.96	3.36	2.29	1.81	6.14
MIN	0.22	0.22	0.38	0.38	0.30	0.30	0.42	0.36
MAX	7.30	7.31	28.38	28.36	20.27	14.15	8.76	33.54

Se puede observar que los valores máximos obtenidos en cada edificio superan ampliamente la media geométrica.

5. Desplazamiento máximo entrepiso en puntos extremos:

Se puede observar que todos los desplazamientos aumentan lo cual es lógico teniendo en cuenta que los puntos extremos están sujetos además del desplazamiento del diafragma al giro de este.

En el grafico del número de casos se expone el valor máximo obtenido.

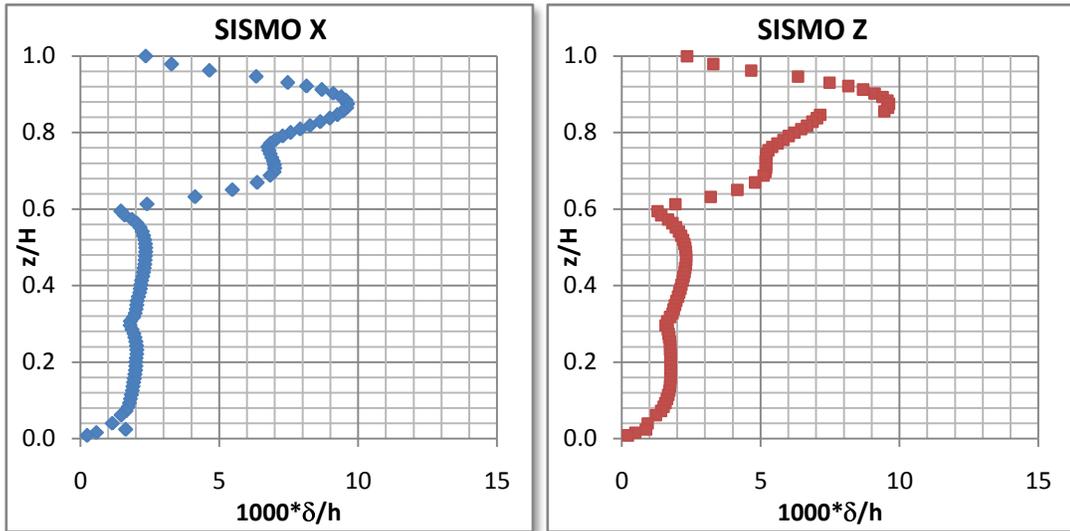


Figura 56. Gráficos resumen de los desplazamientos entrepiso en puntos extremos del modelo de la torre Jin Mao.

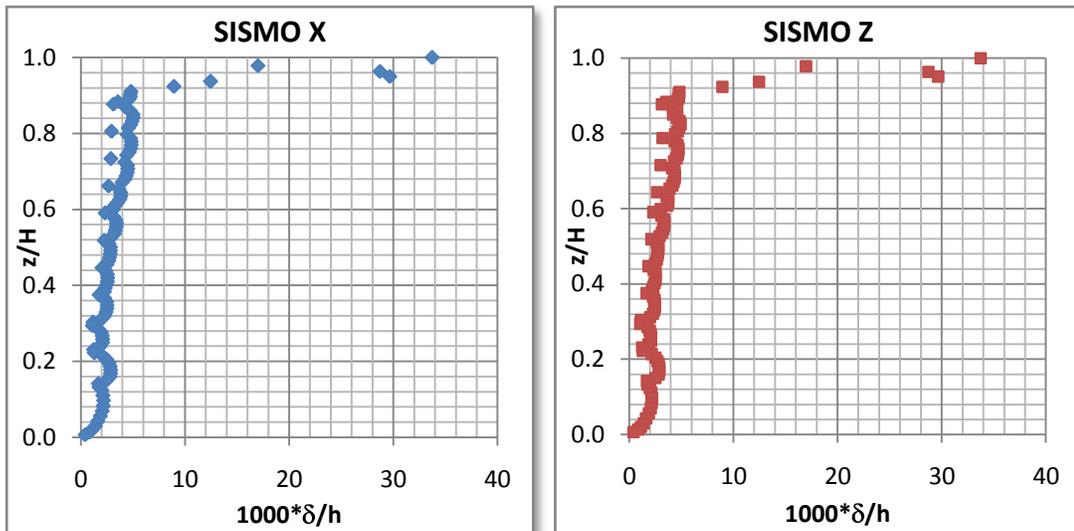


Figura 57. Gráficos resumen de los desplazamientos entrepiso en puntos extremos del modelo del Taipéi 101

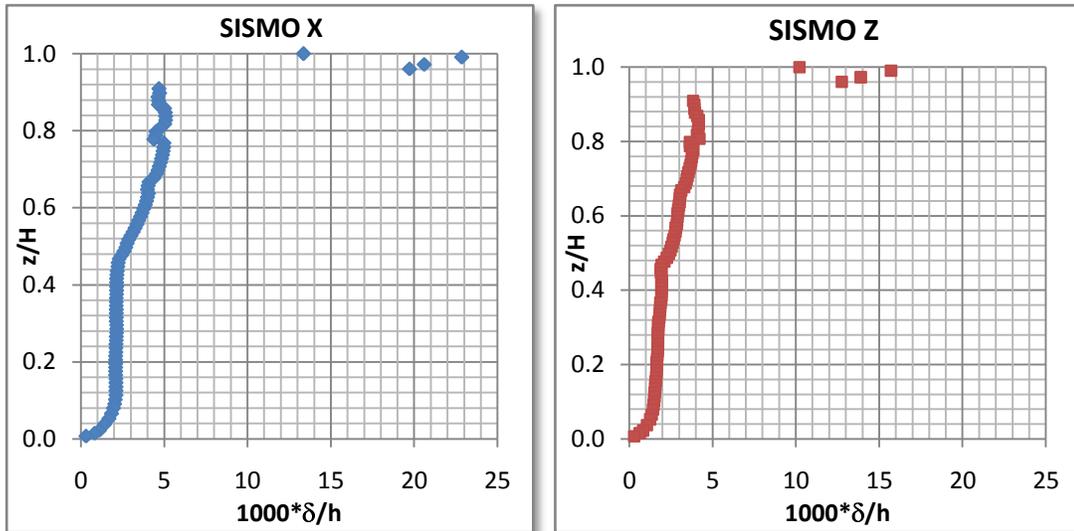


Figura 58. Gráficos resumen de los desplazamientos entre piso en puntos extremos del modelo de las torres Petronas.

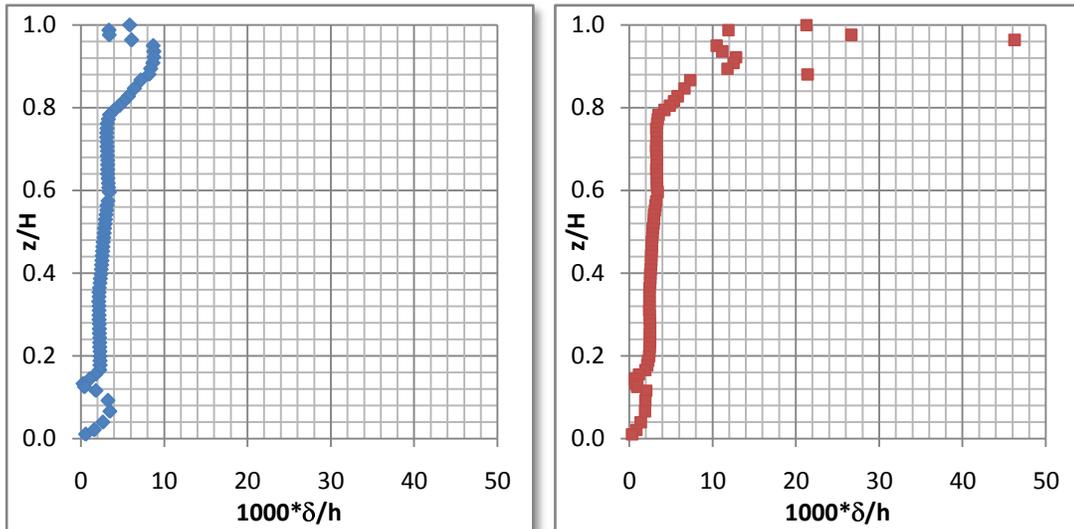


Figura 59. Gráficos resumen de los desplazamientos entre piso en puntos extremos del modelo del Central Plaza.

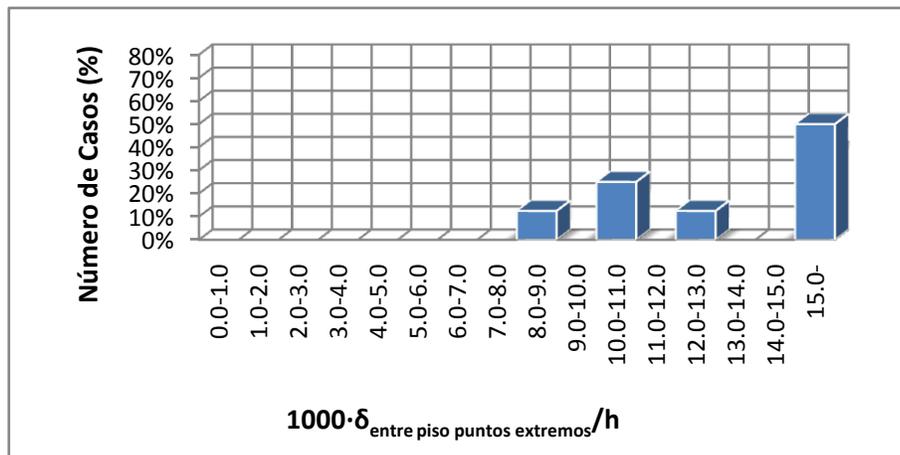


Figura 60. Gráfico del número de casos en el parámetro desplazamiento entre pisos en puntos extremos.

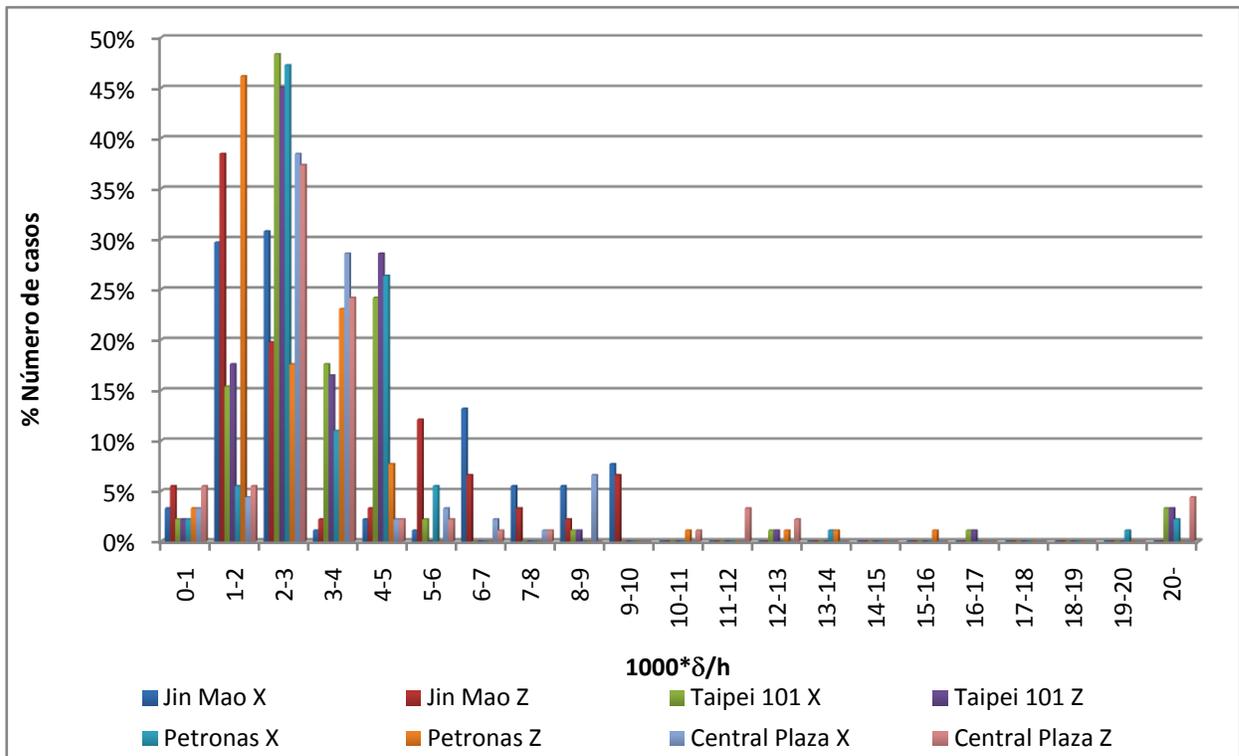


Figura 61. Gráfico estadístico de los desplazamientos entrepisos en un punto externo obtenidos para cada edificio.

Tabla 27. Resumen de datos estadísticos de la medición del desplazamiento entrepisos en el centro de gravedad.

	Jin Mao X	Jin Mao Z	Taipéi 101 X	Taipéi 101 Z	Petronas X	Petronas Z	Central Plaza X	Central Plaza Z
MEDIA GEOMÉTRICA	3.07	2.73	2.99	2.97	3.03	2.42	2.88	3.24
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	2.84	2.54	4.12	4.12	3.57	2.42	1.88	6.49
MIN	0.24	0.22	0.39	0.39	0.32	0.28	0.29	0.37
MAX	9.63	9.62	29.66	29.68	22.86	15.72	8.76	46.27

Se vuelve a observar que los valores máximos obtenidos son mucho mayores a la media geométrica.

VII.2.2. Indicadores de Acoplamiento.

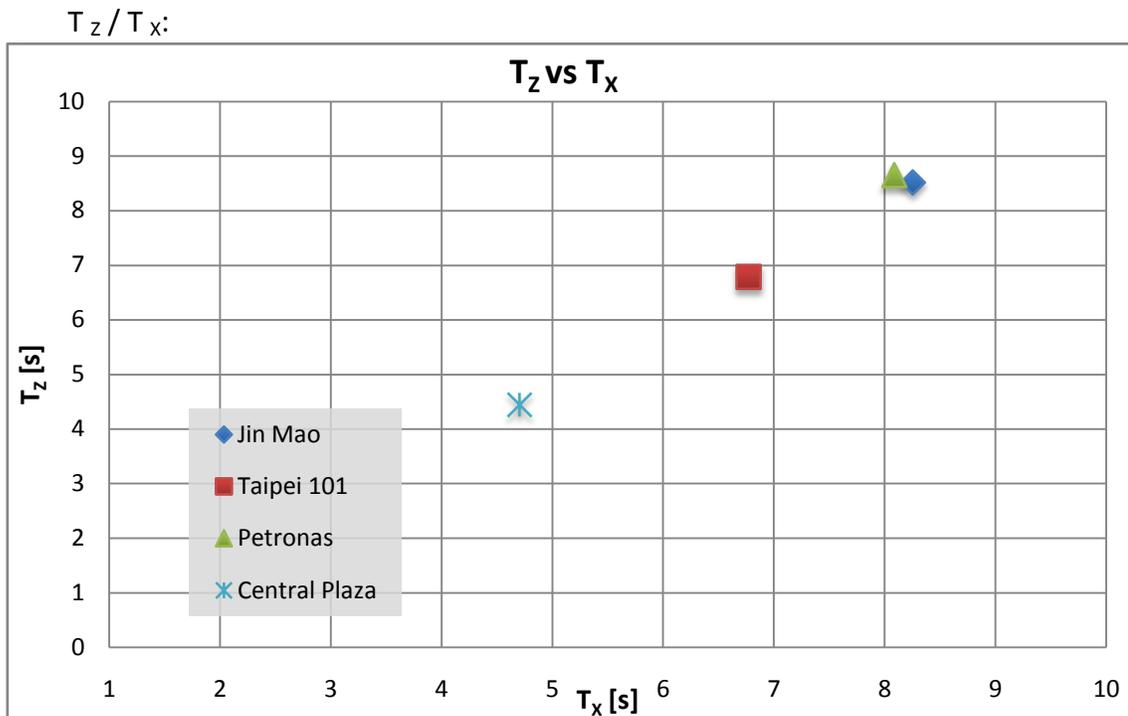


Figura 62. Gráfico de los resultados de los modelos para el parámetro de acoplamiento de los periodos traslacionales.

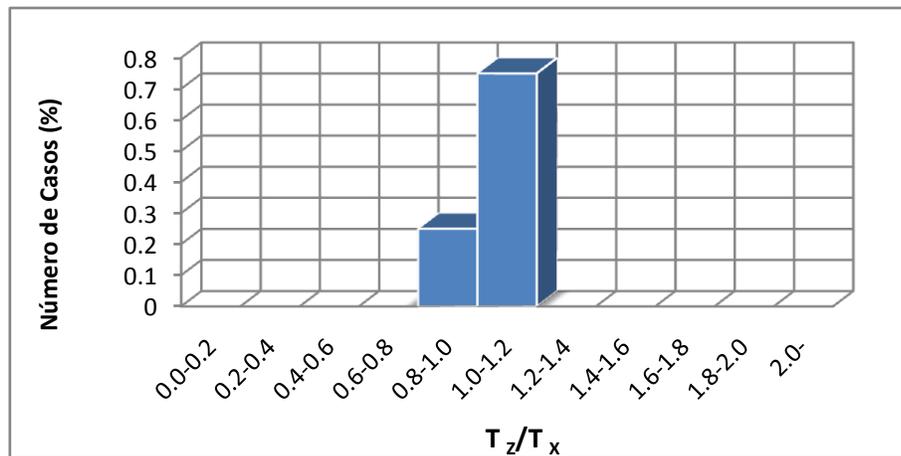


Figura 63. Gráfico del número de casos en el parámetro T_z/T_x .

Aquí se aprecia que el hecho de que las plantas sean simétricas e iguales, hace que el acoplamiento traslacional llegue a la unidad en la mayoría de los casos.

6. $T_{\text{rotacional}} / T_{\text{traslacional}}$

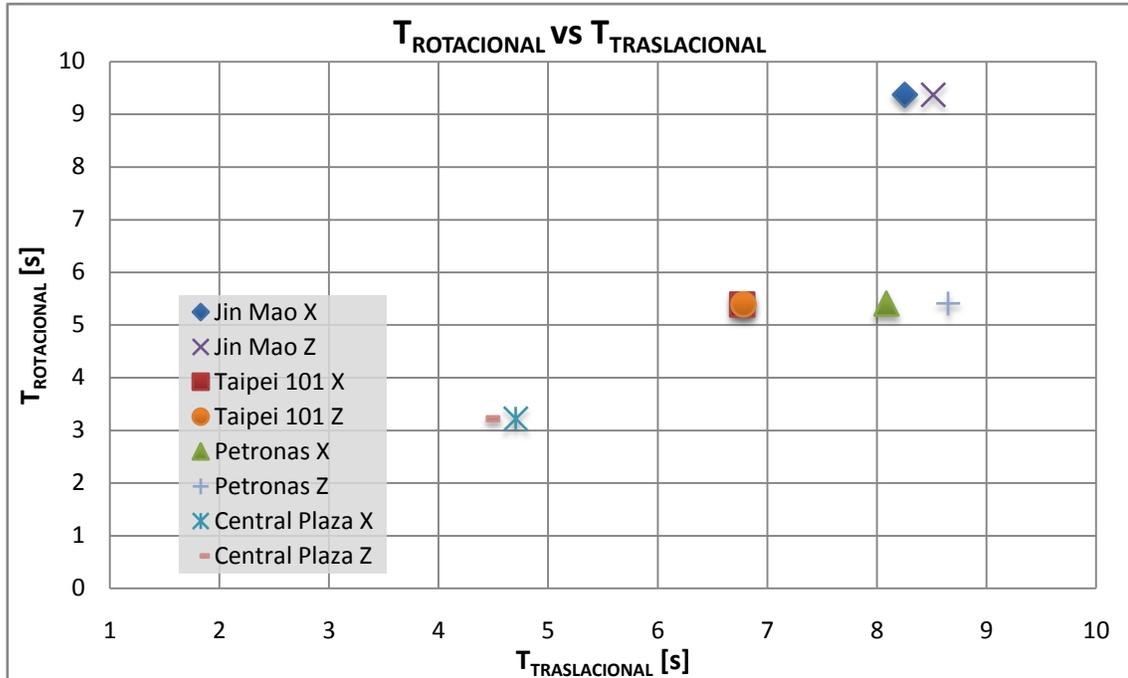


Figura 64. Gráfico de los resultados de los modelos para el parámetro de acoplamiento de los modos rotacional y traslacional.

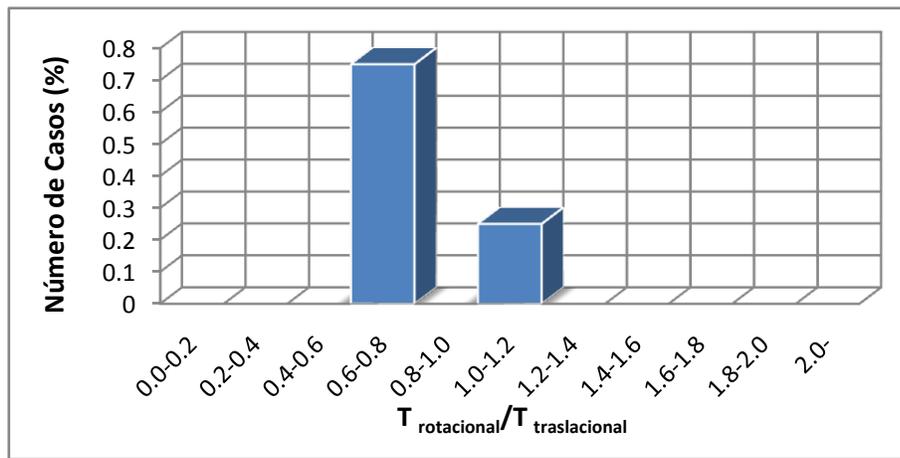


Figura 65. Gráfico del número de casos en el parámetro $T_{\text{rot.}} / T_{\text{tras.}}$

Es posible observar que en la gran mayoría de los modelos los períodos rotacionales con los traslacionales se encuentran desacoplados menos en el caso del modelo de la torre Jin Mao. Esto puede deberse a deficiencias en la modelación que afectaron los resultados del comportamiento real que posee este edificio.

7. Masa equivalente rotacional acoplada / Masa equivalente traslacional directa:

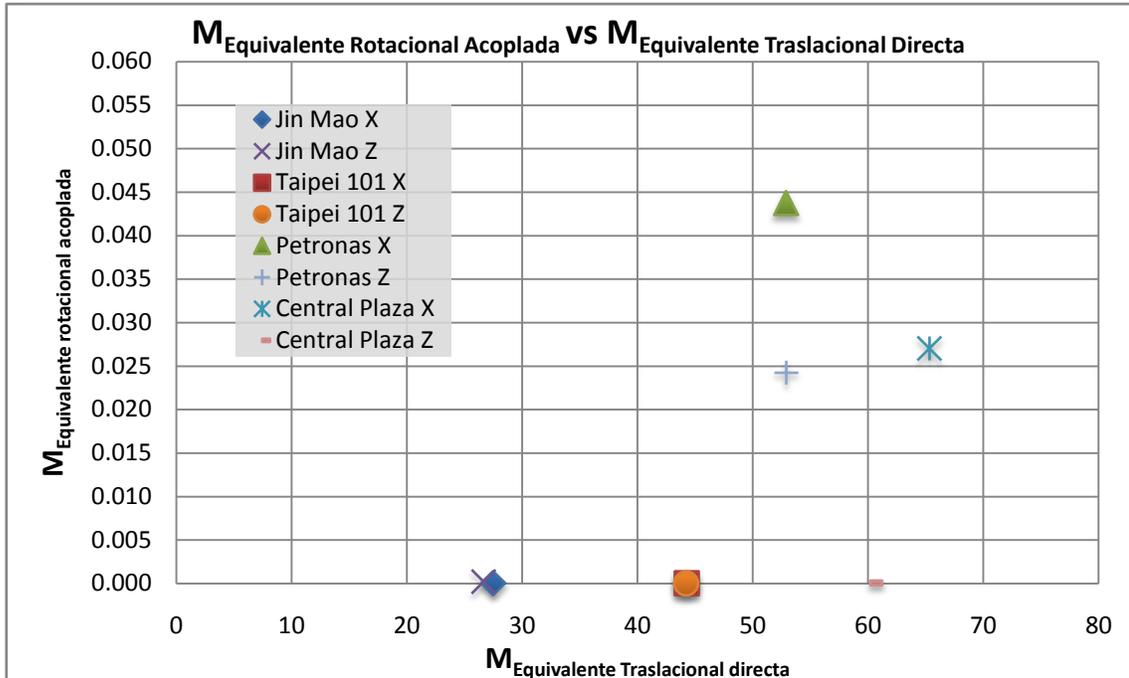


Figura 66. Gráfico de los resultados de los modelos para el parámetro de acoplamiento de masa rotacional acoplada y masa traslacional directa.

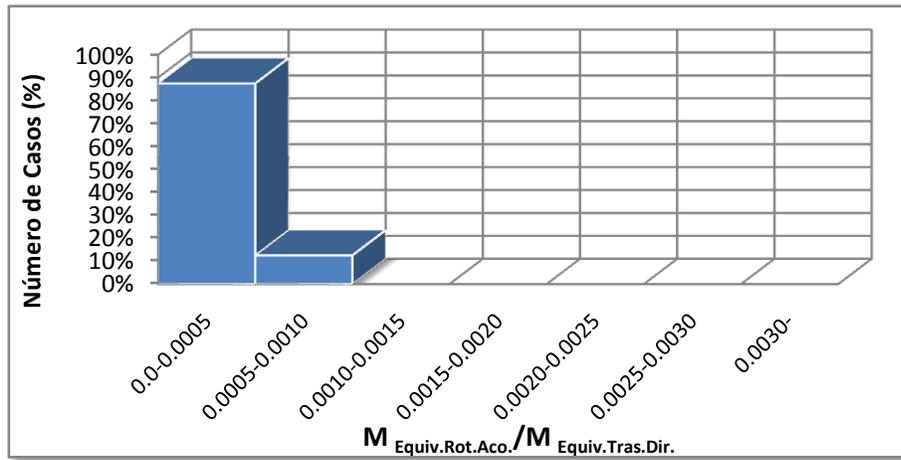


Figura 67. Gráfico del número de casos en el parámetro de acoplamiento de masas acoplada y directa.

En todos los casos podemos ver que el nivel de desacoplamiento entre las masas es completo.

8. Excentricidad Dinámica / Radio de giro basal:

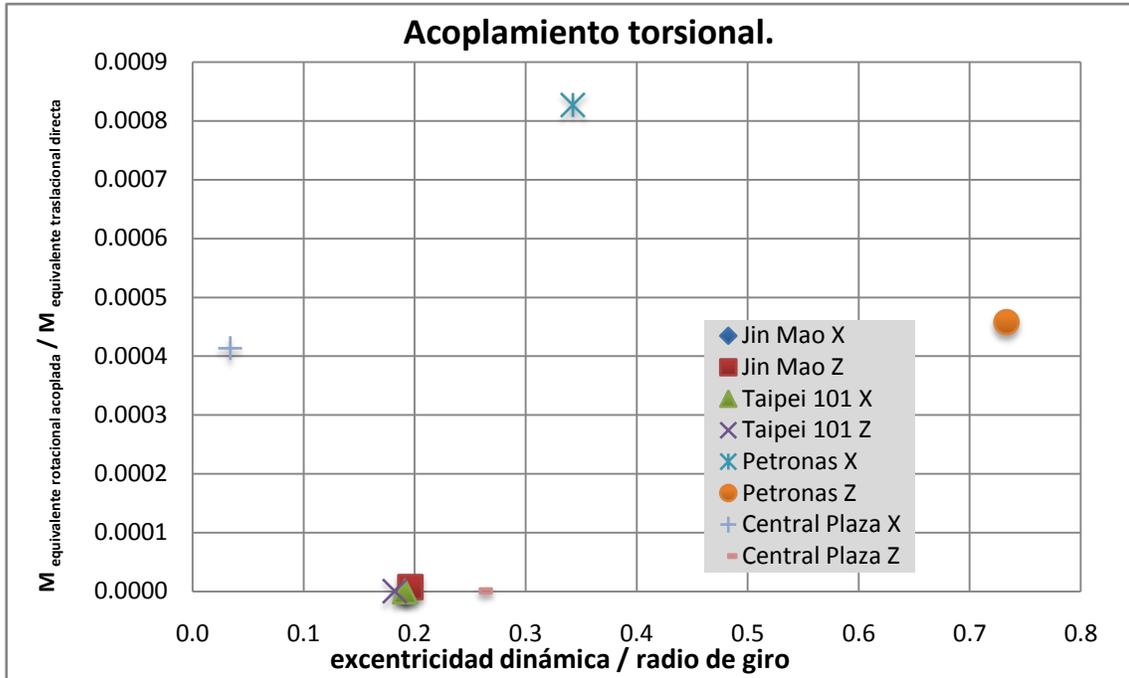


Figura 68. Gráfico de los resultados de los modelos para el acoplamiento torsional.

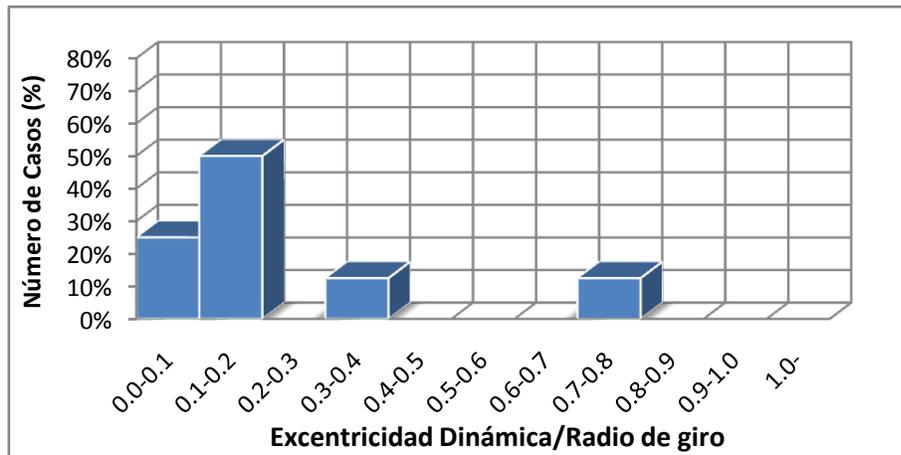


Figura 69. Gráfico del número de casos en el parámetro de la excentricidad dinámica versus el radio de giro.

Se aprecia un claro desacoplamiento de la excentricidad dinámica con el radio de giro para la mayoría de los casos, el único que se acerca a la unidad es el modelo aproximado de las torres Petronas en la dirección Z.

9. Masa equivalente traslacional acoplada / Masa equivalente traslacional directa:

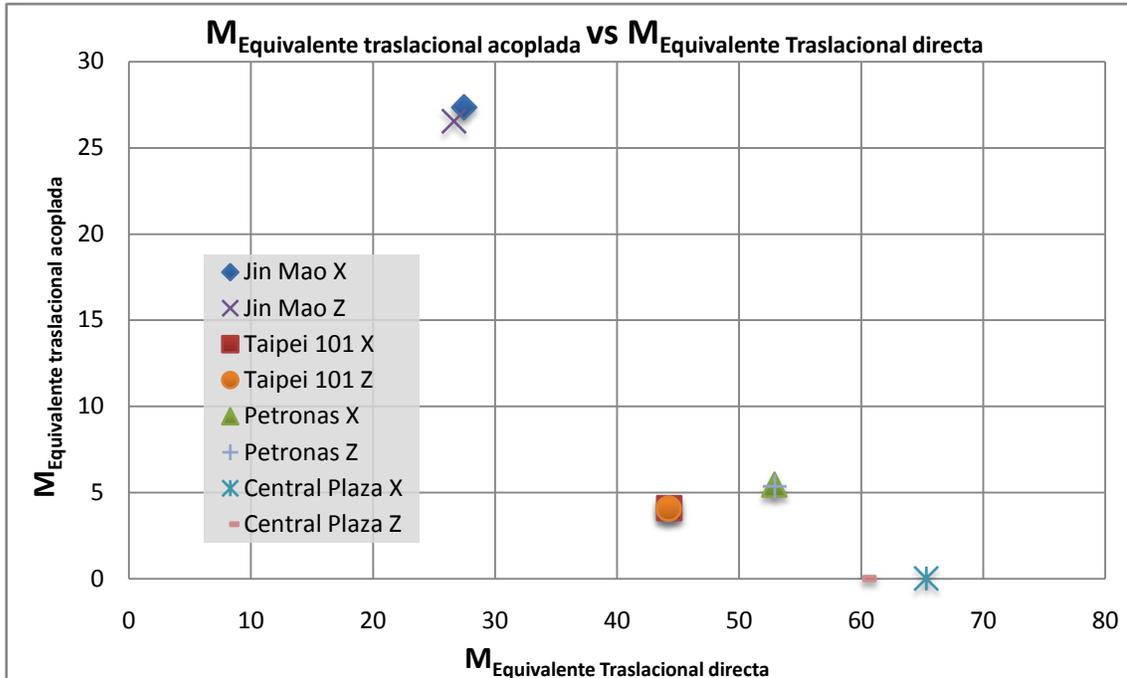


Figura 70. Gráfico de los resultados de los modelos para el parámetro del acoplamiento entre masas traslacionales acoplada y directa.

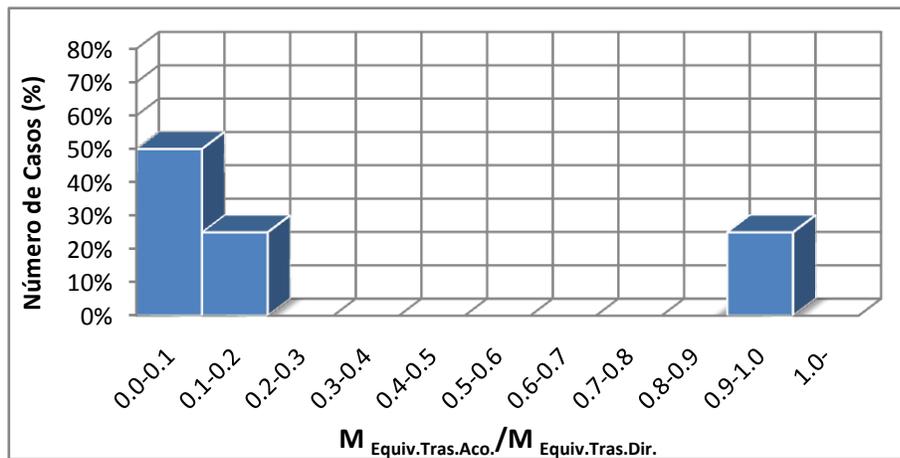


Figura 71. Gráfico del número de casos en el parámetro del acoplamiento de masas traslacionales.

En la mayoría de los casos se puede observar el desacoplamiento de las masas traslacionales menos en el caso del modelo 1.

Esto se debe a que si bien la estructura es simétrica las dos primeras formas de vibrar de la estructura no se sitúan en los ejes principales X y Z, sino que, rotadas en aproximadamente 45° con respecto a estos ejes. Este efecto se da debido a la distribución en planta de las columnas que están muy cerca del eje central de la estructura y no posee elementos resistentes en las esquinas de la planta.

10. Corte basal acoplado / Corte basal directo:

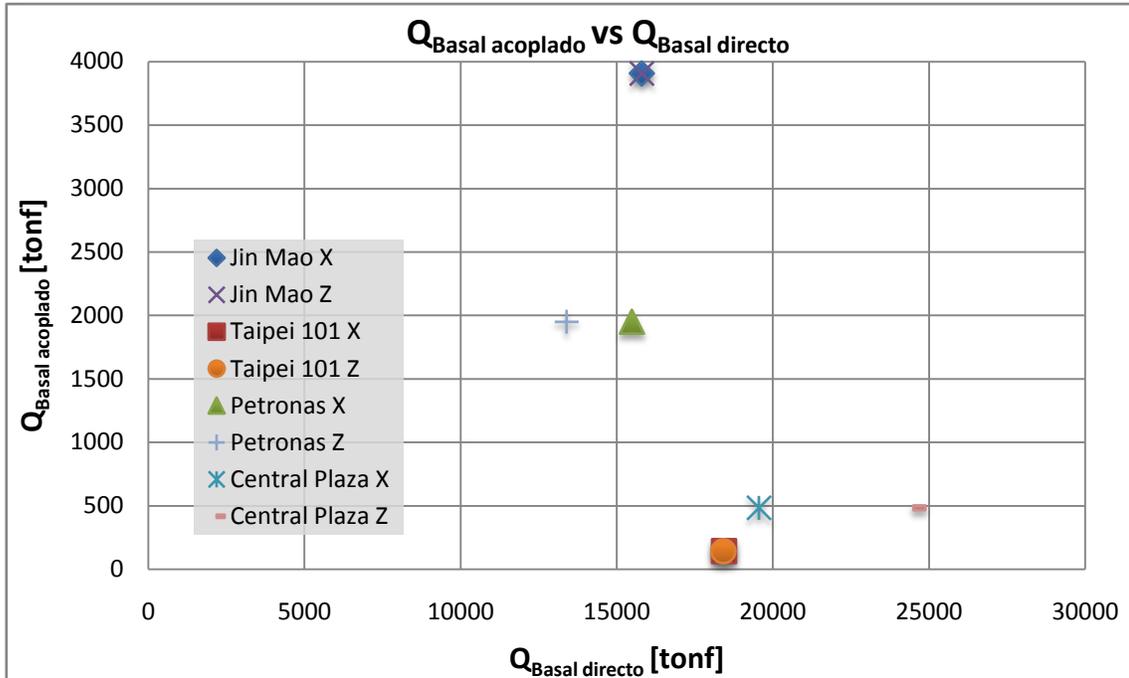


Figura 72. Gráfico de los resultados de los modelos para el parámetro de acoplamiento del corte basal.

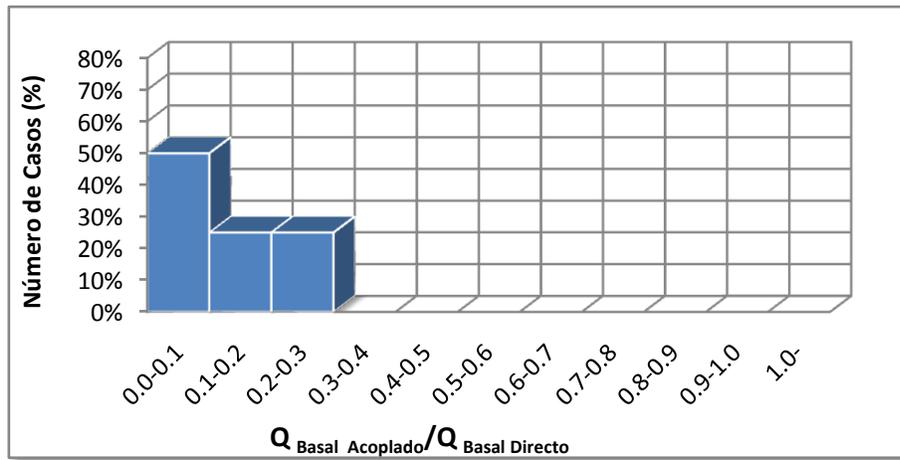


Figura 73. Gráfico del número de casos en el parámetro acoplamiento del corte basal.

Es posible observar que en la mayoría de los casos, los modelos, se encuentran desacoplados a nivel del corte basal.

11. Momento volcane basal acoplado / Momento volcane basal directo:

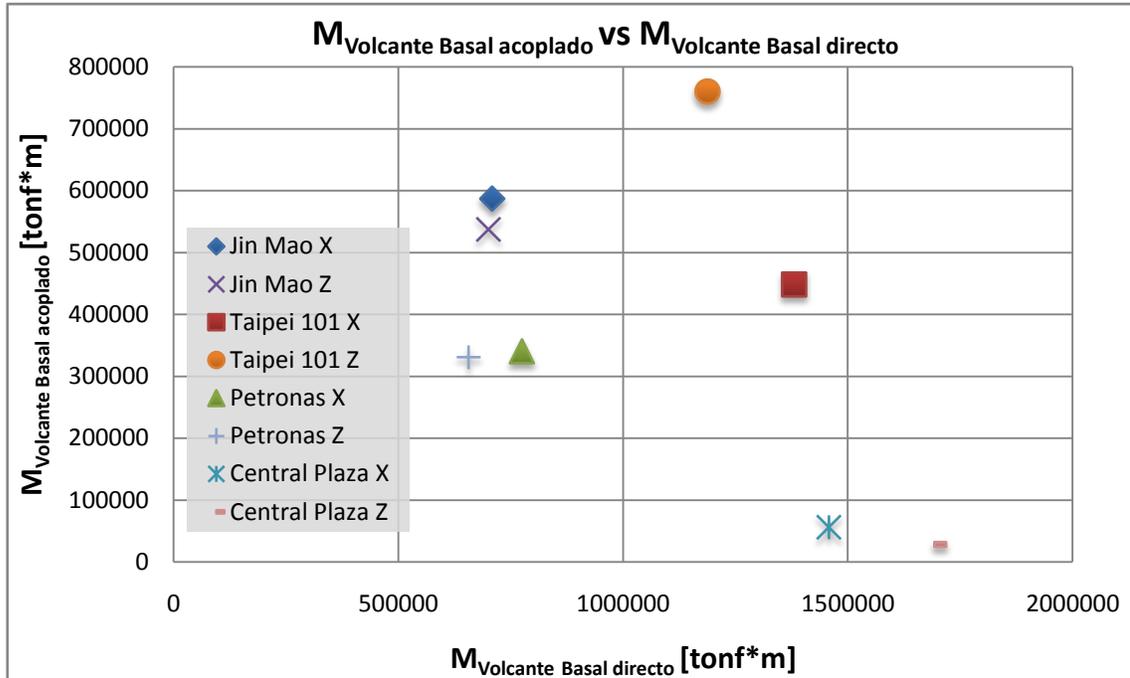


Figura 74. Gráfico de los resultados de los modelos para el parámetro de acoplamiento de los momentos volcantes.

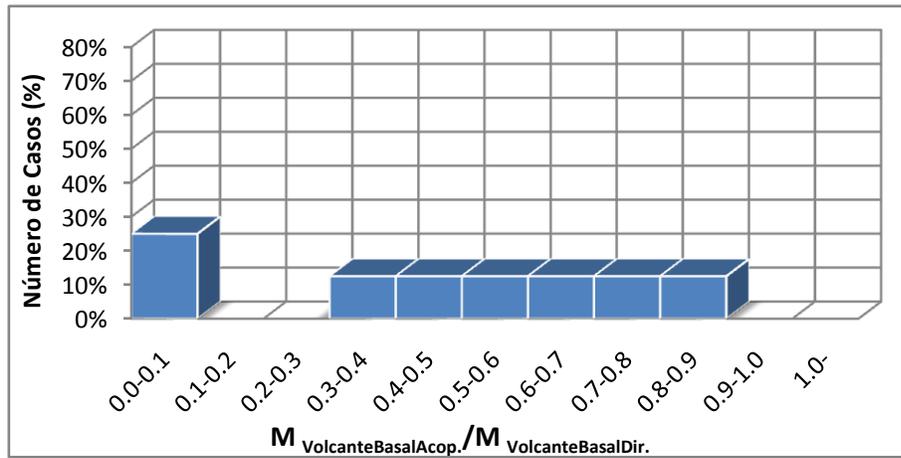


Figura 75. Gráfico del número de casos en el parámetro acoplamiento del momento volcane.

Si bien los resultados son bastante dispersos se puede observar que la mayoría se aleja de la unidad lo que demuestra el nivel de desacoplamiento que poseen los momentos volcantes basales directo y acoplado.

VII.2.3. Redundancia estructural y demanda de ductilidad.

12. Número de ejes resistentes:

En la siguiente tabla se puede observar que el número de elementos que aportaba más del 10% del corte basal era muy inferior al número de elementos que acumulaba el 90% del corte basal.

Tabla 28. Resumen de los números de ejes resistentes por edificio y dirección.

	Jin Mao		Taipéi 101		Torres Petronas		Central Plaza	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
# acumulan más del 90% Q_{basal}	13	13	19	19	23	20	32	14
# aporta más del 10% del Q_{basal}	4	4	0	0	2	1	0	1
Numero Ejes Resistentes	13	13	19	19	23	20	32	14

13. Factor de Reducción Espectral Efectivo:

Este valor no fue incluido dentro de los cálculos, ya que, se utilizó el espectro de la norma NCh2745.Of03. Esto hizo que el R^* utilizado tuviera un valor igual a 1,0. Es decir se analizaron los edificios para su respuesta elástica.

Además el corte mínimo en esta norma queda definido en función de parámetros del disipador que se va a usar, lo que no es aplicable a nuestro caso. Sin embargo, se procedió a calcular el corte mínimo y el corte máximo según la norma NCh433.Of96 y en todos los modelos realizados el corte estaba dentro de ambos valores.

VII.3. Nuevos indicadores.

1. Altura total / periodo ordenado por aporte al corte basal:

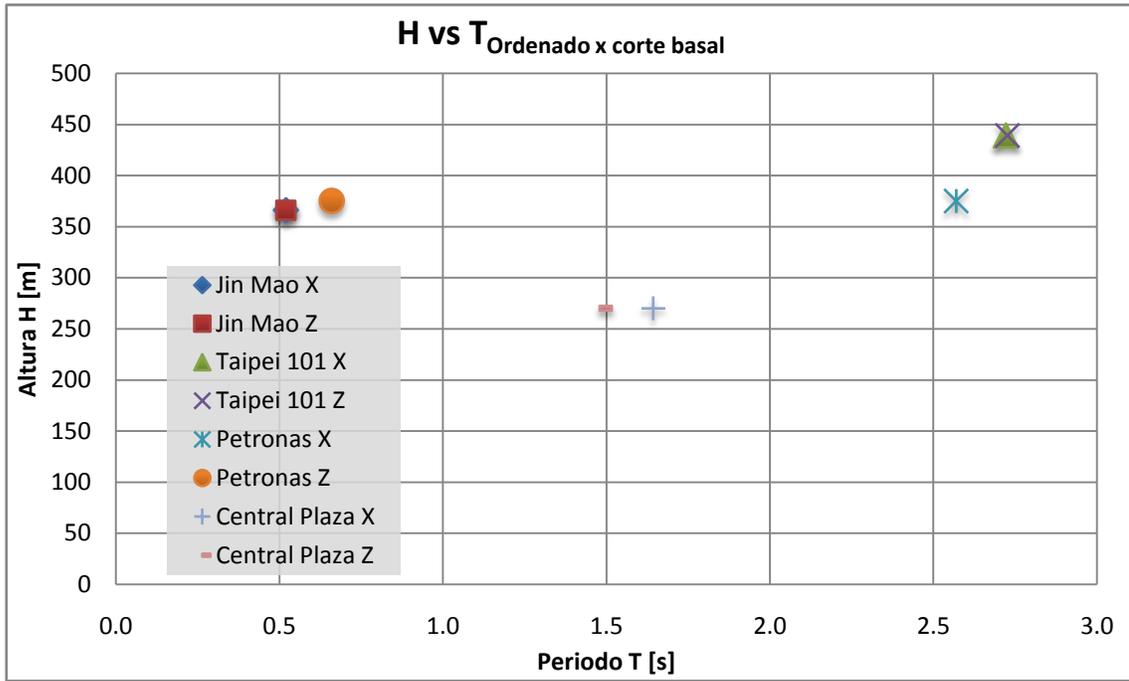


Figura 76. Gráfico de los resultados de los modelos para el parámetro de H/T ordenado por corte basal.

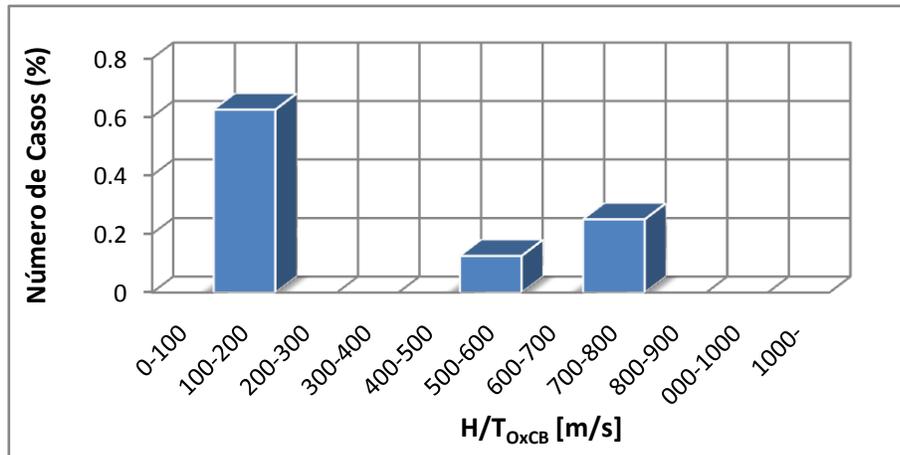


Figura 77. Gráfico del número de casos en el parámetro de H/T ordenado por corte basal.

2. Esbeltez:

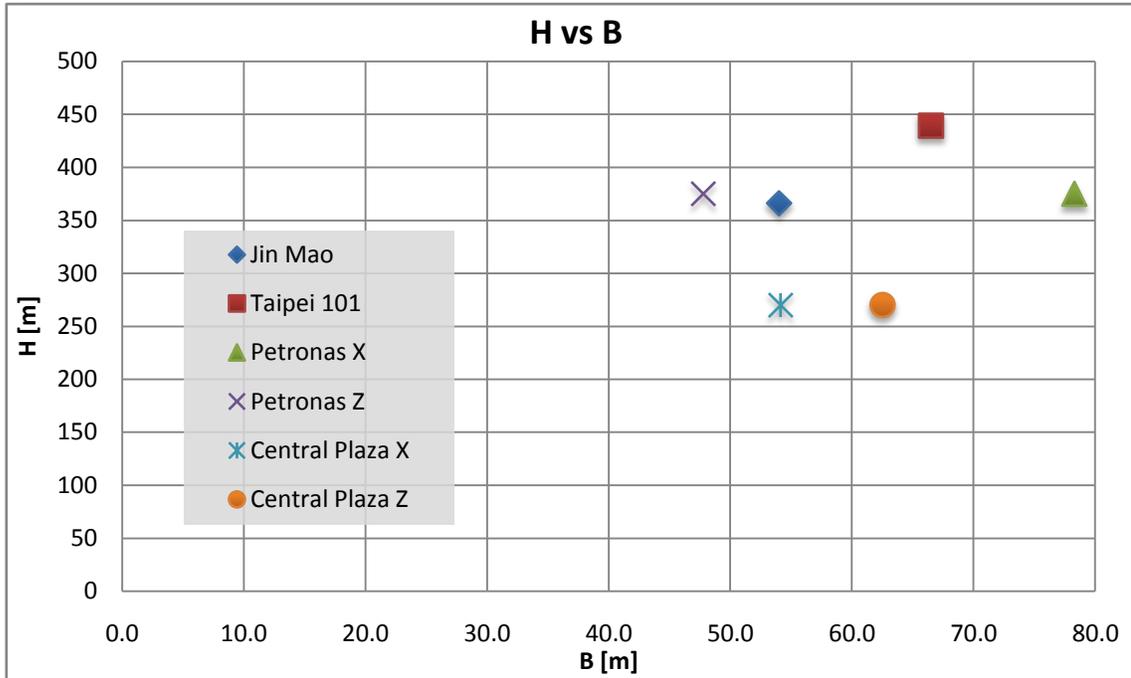


Figura 78. Gráfico de los resultados de los modelos para el parámetro de esbeltez.

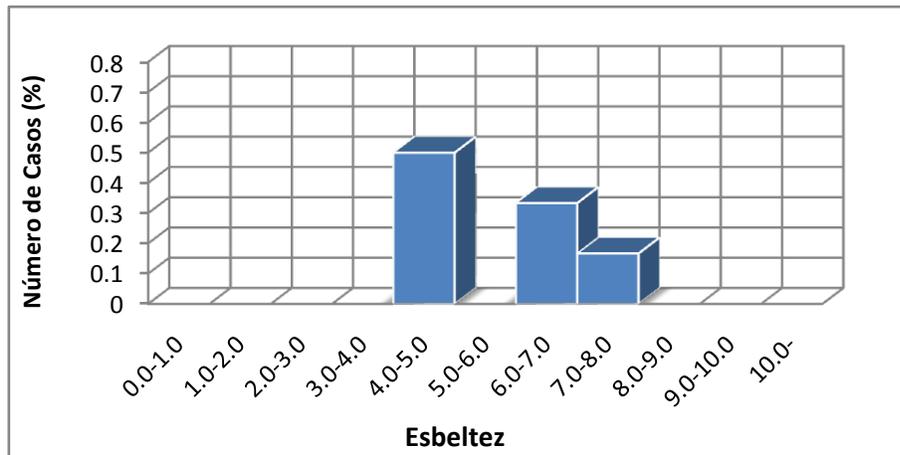


Figura 79. Gráfico del número de casos en el parámetro de la esbeltez.

En estos gráficos se puede ver que en todos los casos de los modelos presenta esbelteces menores a 8.

3. H / T rotacional:

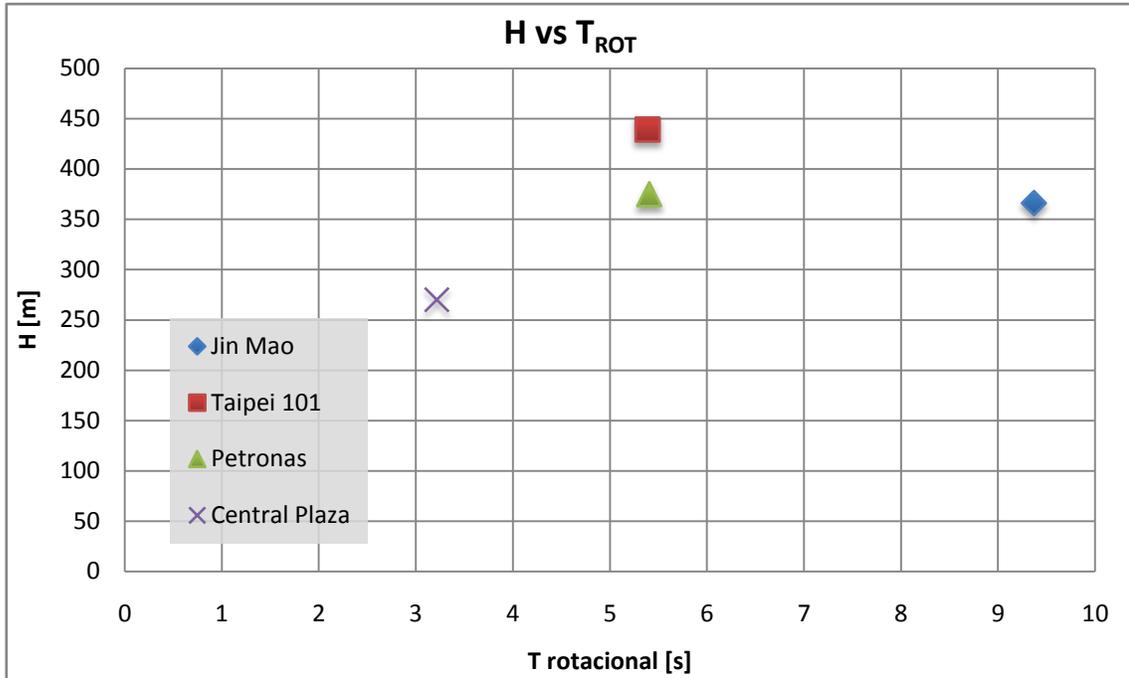


Figura 80. Grafico de los resultados de los modelos obtenidos para el parámetro de H / T_{ROT}.

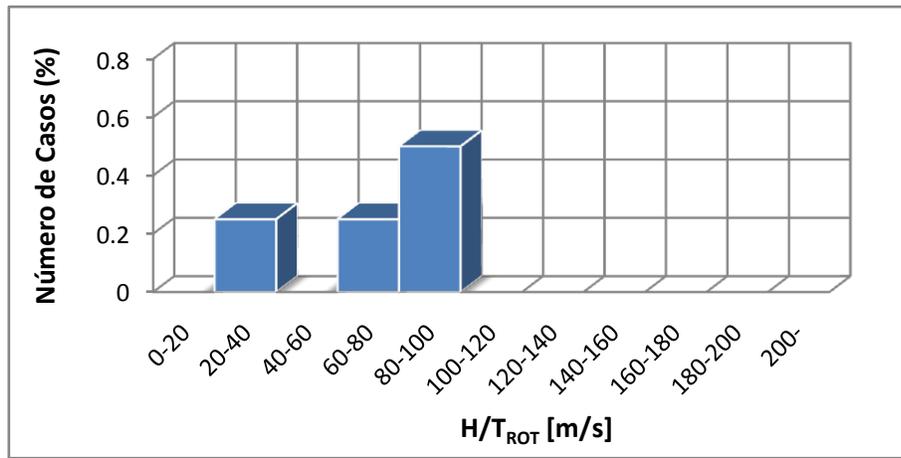


Figura 81. Gráfico del número de casos en el parámetro de H/T rotacional.

Podemos ver que existe una gran mayoría de los modelos posee valores entre 80 y 100 [m/s] el único que escapa a este rango un valor mucho más bajo es el modelo 1 (Torre Jin Mao).

4. Densidad de muros:

a. Densidad de muros local:

A continuación se muestran las densidades de muros de los 3 modelos de edificios altos de hormigón armado.

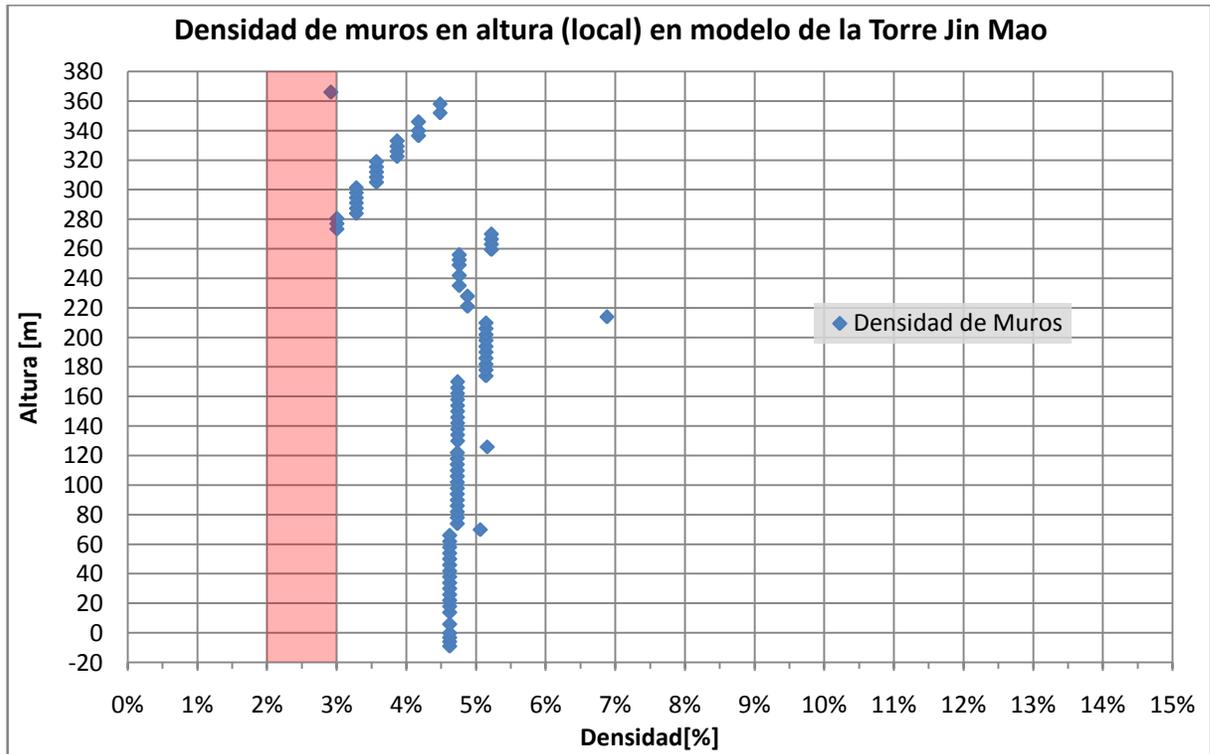


Figura 82. Grafico de la densidad local del modelo de la Torre Jin Mao.

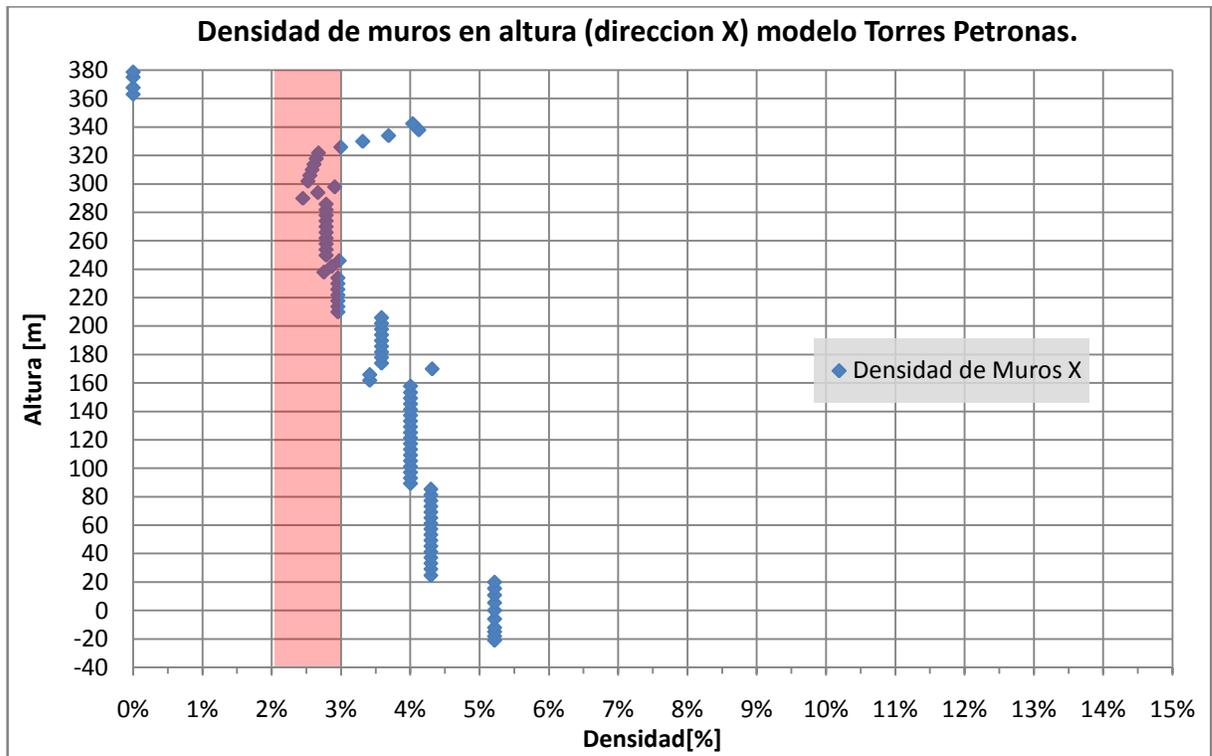


Figura 83. Grafico de la densidad de muros local del modelo de las Torres Petronas.

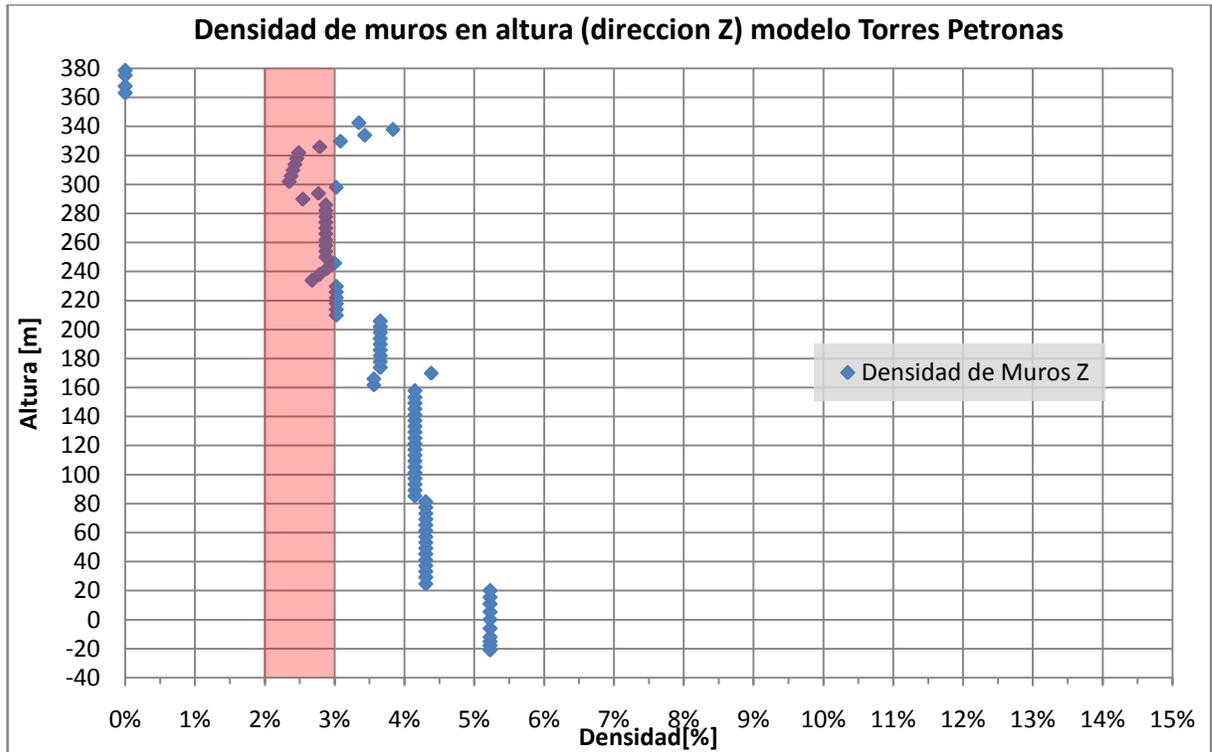


Figura 84. Grafico de la densidad de muros local del modelo de las Torres Petronas.

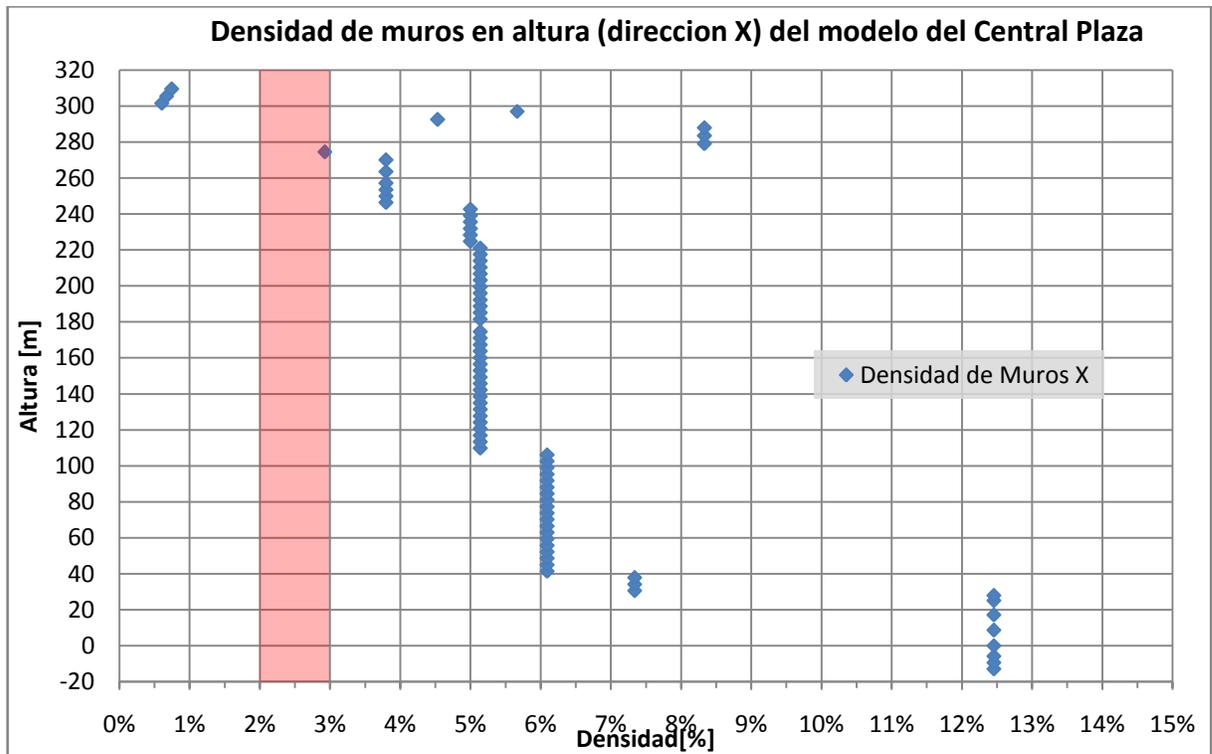


Figura 85. Grafico de la densidad de muros local del modelo del Central Plaza.

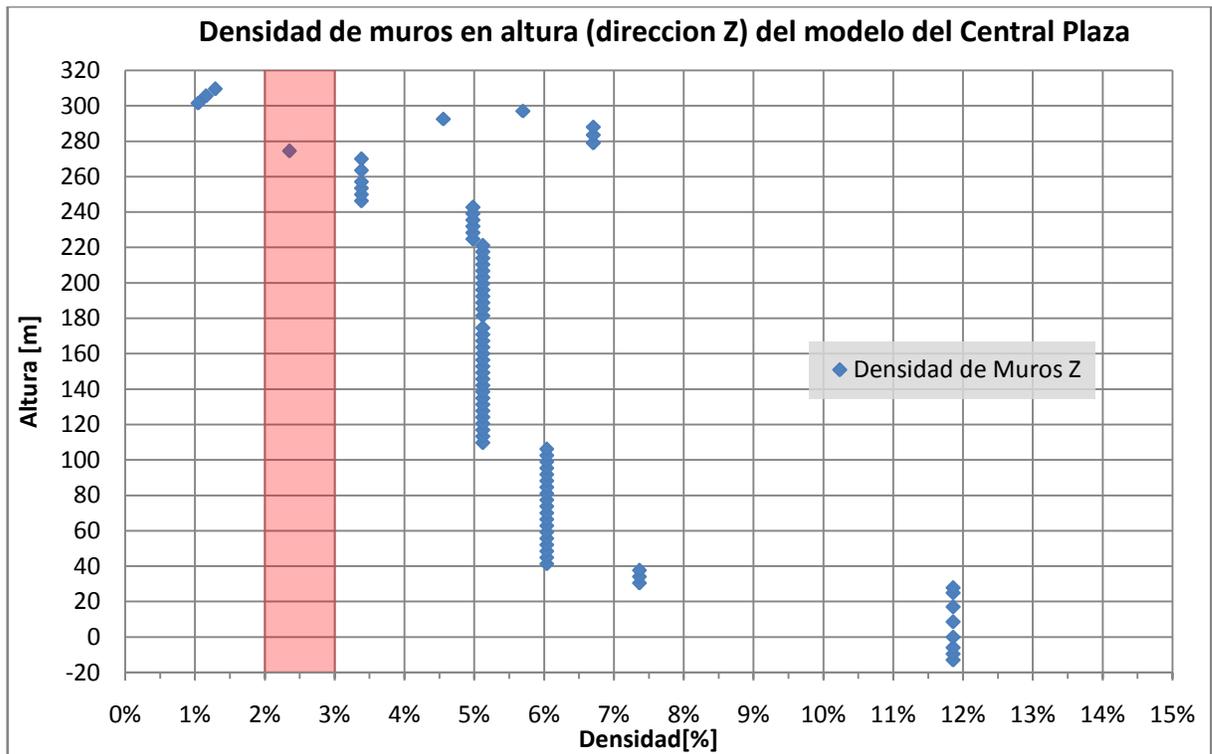


Figura 86. Grafico de la densidad de muros local del modelo del Central Plaza.

Tabla 29. Resumen de los datos estadísticos de la densidad de muros de los modelos.

	Jin Mao	Petronas X	Petronas Z	Central Plaza X	Central Plaza Z
MEDIA GEOMÉTRICA	4.46%	3.64%	3.66%	5.85%	5.37%
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0.66%	0.80%	0.82%	2.33%	2.32%
MÍNIMO	2.92%	2.45%	2.35%	2.92%	1.04%
MÁXIMO	6.88%	5.22%	5.23%	12.46%	11.86%

b. Densidad de muros global:

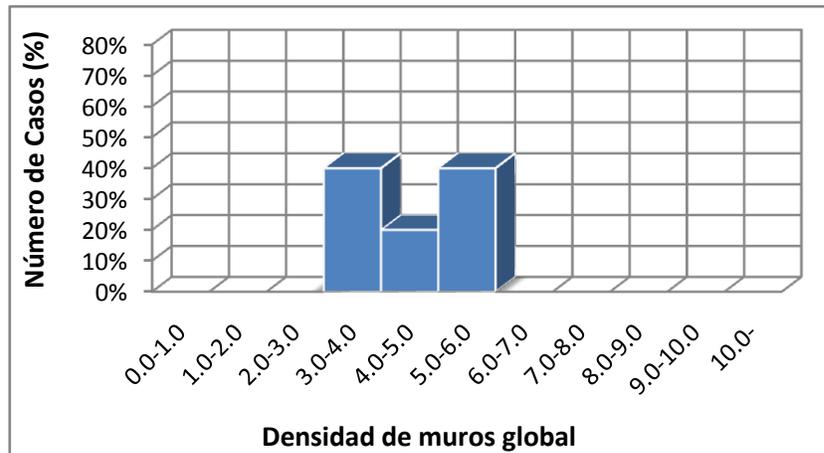


Figura 87. Gráfico del número de casos en el parámetro de la densidad de muros global.

c. Densidad de muros basal:

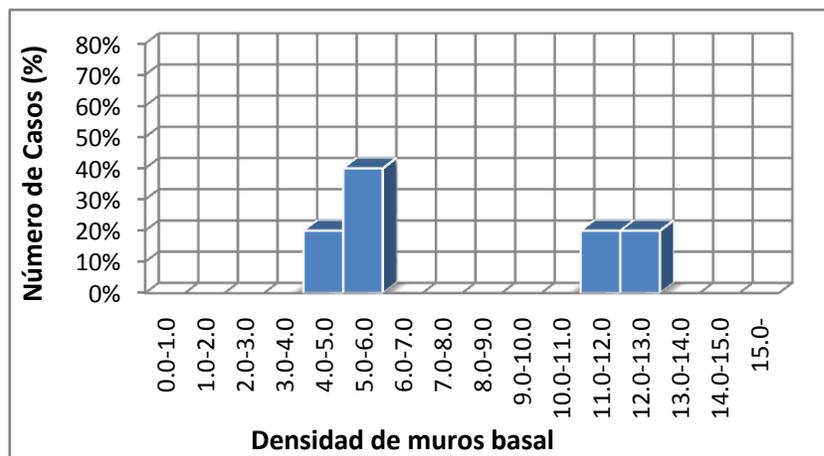


Figura 88. Gráfico del número de casos en el parámetro de la densidad de muros basal.

Tabla 30. Resultados para los modelos 1 y 2.

	Jin Mao		Taipei 101	
	X	Y	X	Y
H/T	44.348	43.000	64.873	64.777
M_{P-Δ}/M_{volc. basal directo}	0.0541	0.0547	0.0310	0.0360
1000·δ/H	1.8238	1.8248	1.9695	1.9685
1000·δ_{centro gravedad}/h	7.3041	7.3053	28.3813	28.3641
1000·δ_{extremo}/h	10.8491	10.8680	29.6559	29.6751
T_z/T_x	1.0314	1.0314	1.0015	1.0015
T_{rotacional}/T_{traslacional}	1.1351	1.1006	0.7956	0.7944
Masa_{eq. rot. acoplada}/Masa_{eq. transl. directa}	0.00000	0.00001	0.00000	0.00000
(M_{torsor basal}/Q_{basal})/r_{basal}	0.1926	0.1961	0.1914	0.1822
Masa_{eq. transl. acoplada}/Masa_{eq. transl. directa}	0.9954	0.9955	0.0922	0.0915
Q_{basal acoplado}/Q_{basal directo}	0.2472	0.2472	0.0076	0.0076
M_{volc. basal acoplado}/M_{volc. basal directa}	0.8285	0.7668	0.3246	0.6401
Numero Ejes Resistentes	13	13	19	19
H/T_{Ordenado x Corte Basal}	704.119	704.119	161.374	161.118
Esbeltez (H/B)	6.7778		6.6045	
H/T_{ROT}	39.070	39.070	81.543	81.543
Densidad de muro (media geométrica)	4.46%	4.46%	-	-

Tabla 31. Resultados para los modelos 3 y 4.

	Torres Petronas		Central Plaza	
	X	Y	X	Y
H/T	46.382	43.361	57.414	60.806
M_{P-Δ}/M_{volc. basal directo}	0.0476	0.0551	0.0290	0.0229
1000·δ/H	2.2678	2.0483	2.5005	2.8401
1000·δ_{centro gravedad}/h	20.2738	14.1471	8.7460	9.6103
1000·δ_{extremo}/h	22.8635	15.7216	8.7460	12.7930
T_Z/T_X	1.0697	1.0697	0.9442	0.9442
T_{rotacional}/T_{traslacional}	0.6684	0.6248	0.6836	0.7239
Masa_{eq. rot. acoplada}/Masa_{eq. trasl. directa}	0.00083	0.00046	0.00041	0.00000
(M_{torsor basal}/Q_{basal})/r_{basal}	0.3425	0.7330	0.0339	0.2587
Masa_{eq. trasl. acoplada}/Masa_{eq. trasl. directa}	0.1031	0.1010	0.0000	0.0000
Q_{basal acoplado}/Q_{basal directo}	0.1258	0.1455	0.0247	0.0197
M_{volc. basal acoplado}/M_{volc. basal directa}	0.4393	0.5038	0.0382	0.0165
Numero Ejes Resistentes	23	20	32	14
H/T Ordenado x Corte Basal	145.938	568.501	164.331	182.501
Esbeltez (H/B)	4.7907	7.8511	4.9884	4.3200
H/T_{ROT}	69.394	69.394	83.992	83.992
Densidad de muro (media geométrica)	3.64%	3.66%	5.85%	5.37%

CAPÍTULO VIII: COMPARACIÓN DE LOS INDICADORES CON LOS RANGOS OBTENIDOS ANTERIORMENTE EN EL PERFIL BÍO-SÍSMICO PARA EDIFICIOS DE MENOS DE 50 PISOS.

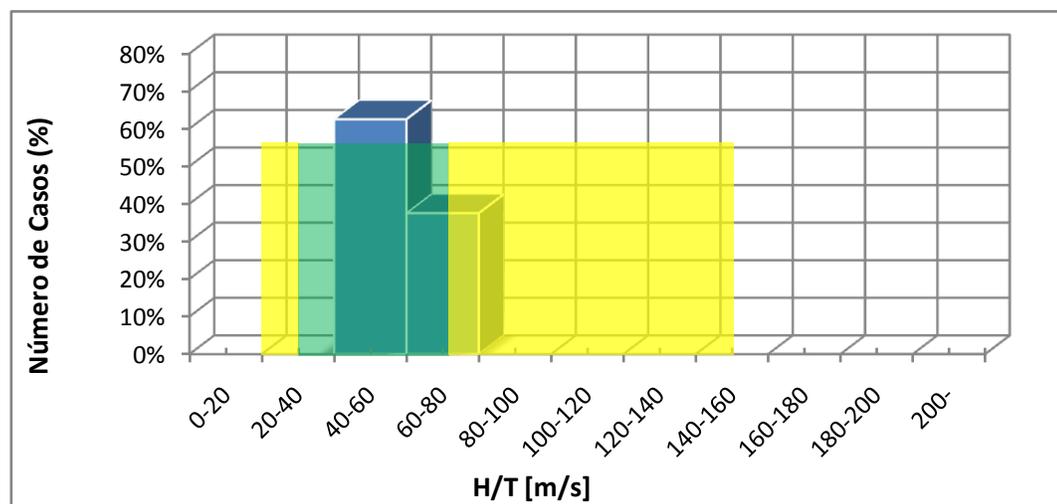
VIII.1. Resultados.

A continuación se presenta la comparación de los rangos obtenidos para el estudio anterior.

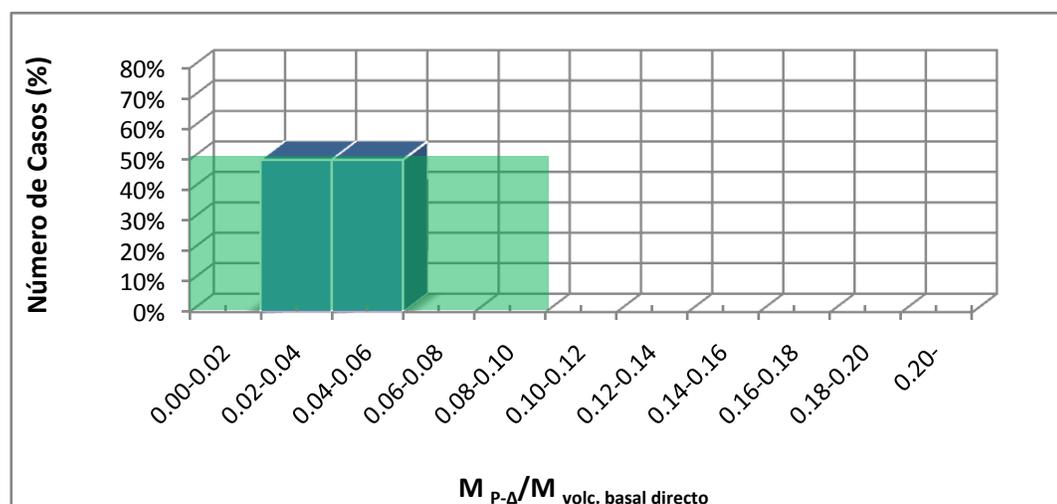
En amarillo se colorearan los valores “aceptables ligeramente fuera de rango”.

En verde se colorearan los valores “dentro de los rangos normales”.

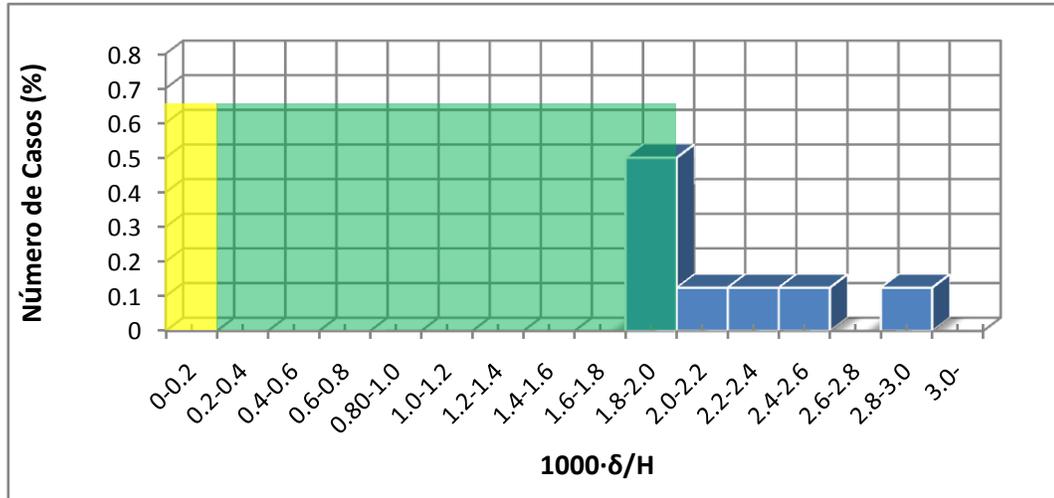
1. H/T:



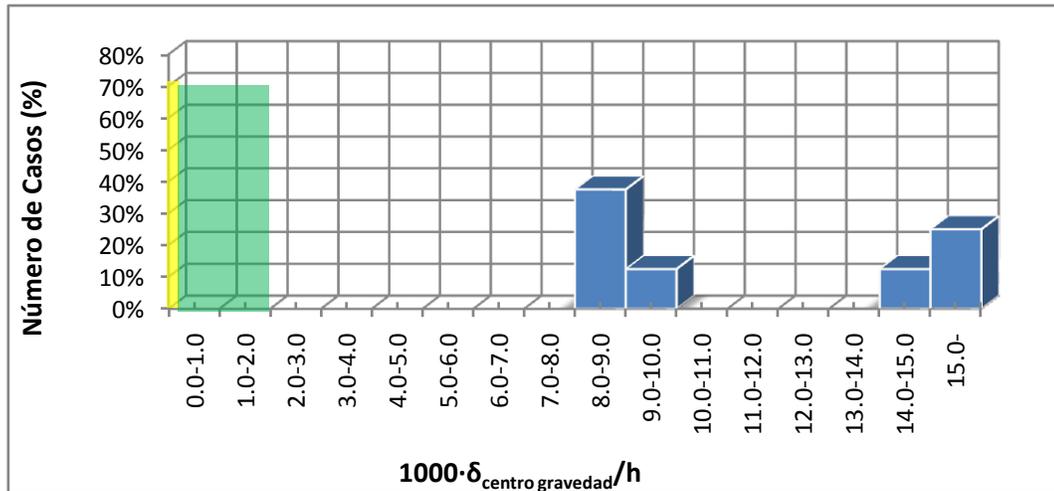
2. Efecto P-Δ:



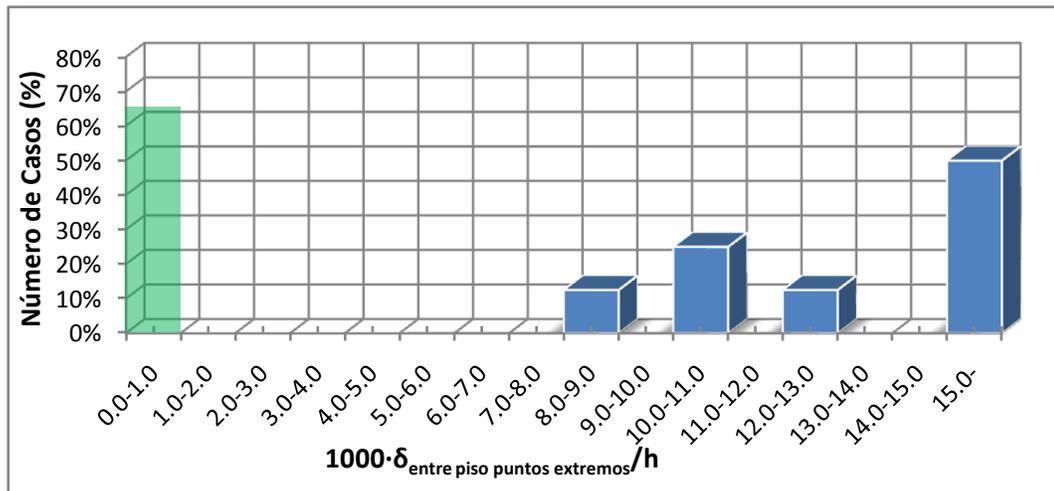
3. Desplazamiento total nivel superior:



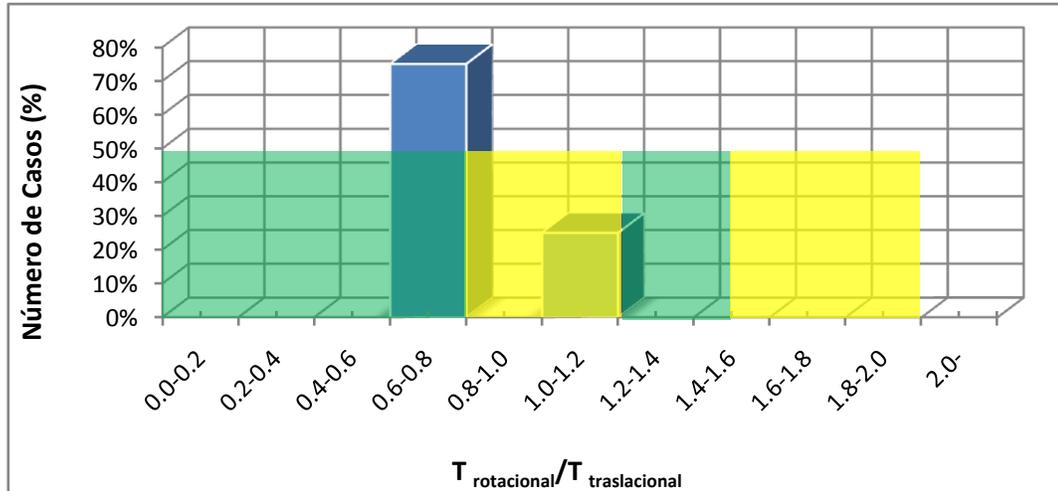
4. Desplazamiento entrepiso medido en centro de gravedad:



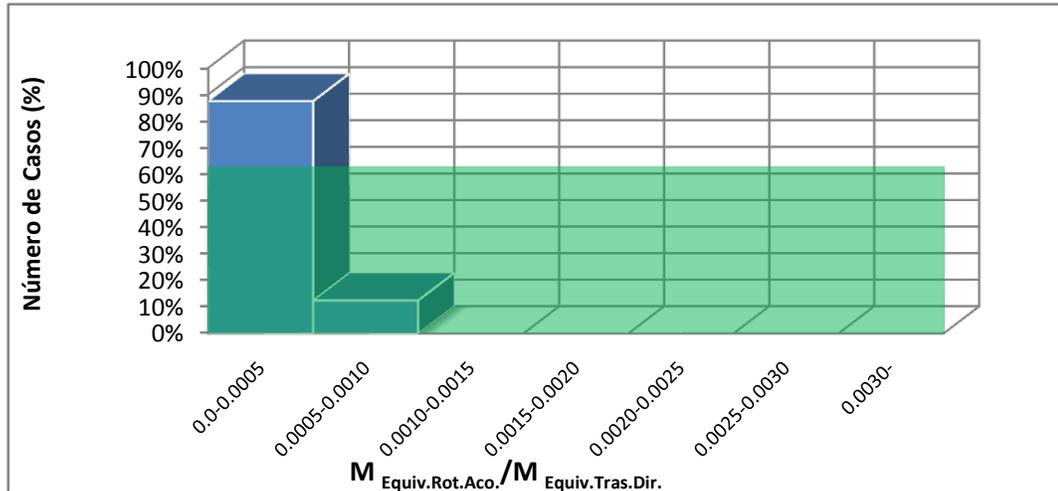
5. Desplazamiento entrepiso medido en puntos extremos:



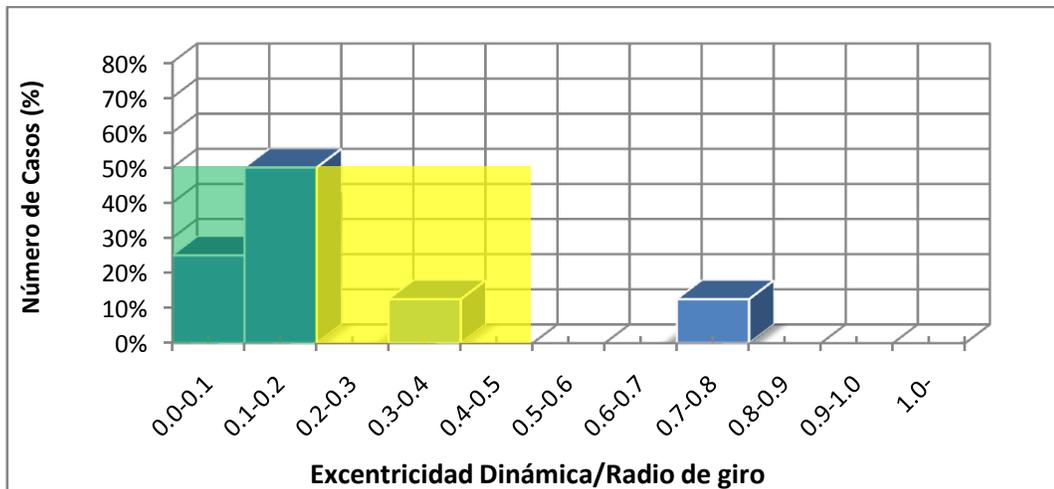
6. Acoplamiento entre periodo rotacional y periodo traslacional:



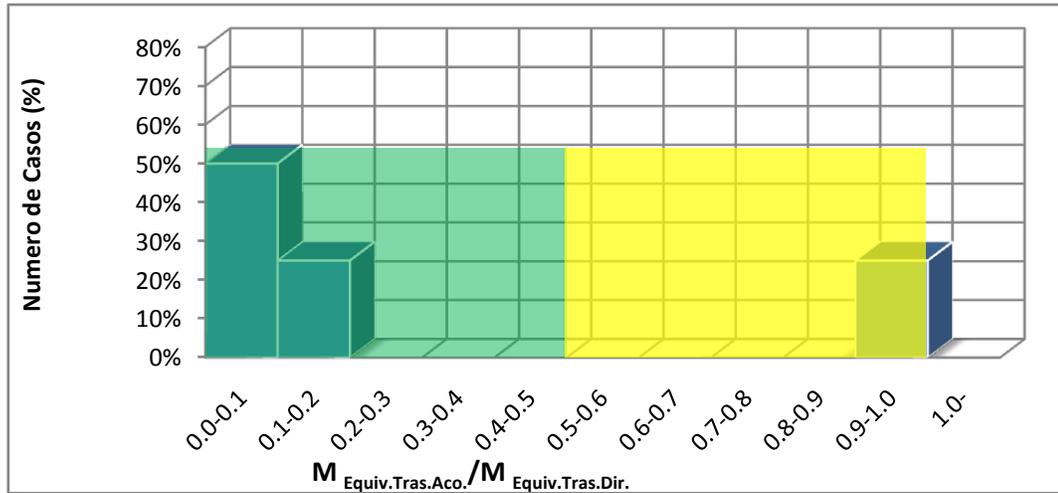
7. Acoplamiento entre masa equivalente rotacional acoplada y masa equivalente traslacional acoplada:



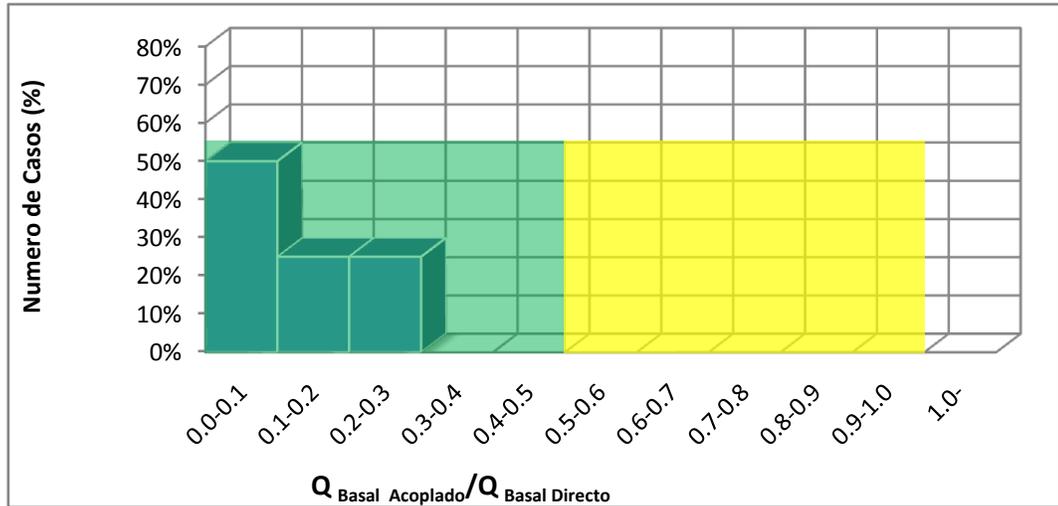
8. Excentricidad Dinámica / Radio de Giro Basal:



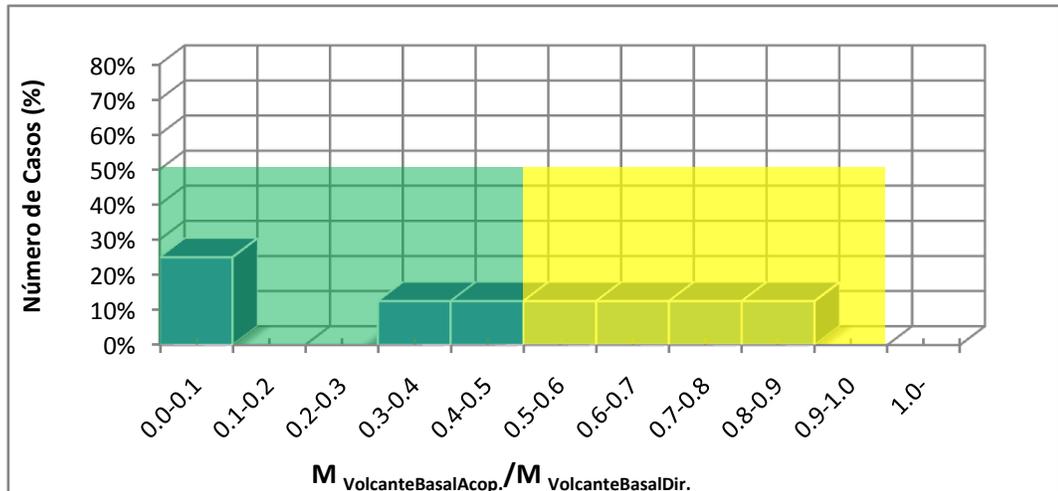
9. Acoplamiento entre masa equivalente traslacional acoplada y masa equivalente traslacional directa:



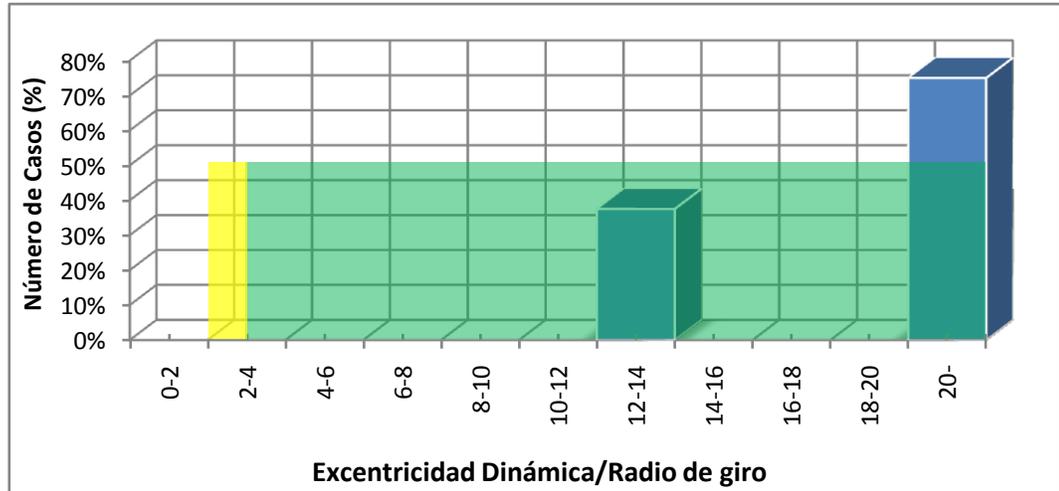
10. Acoplamiento entre el corte basal acoplado y el corte basal directo:



11. Momento volcante basal acoplado / Momento volcante basal directo:

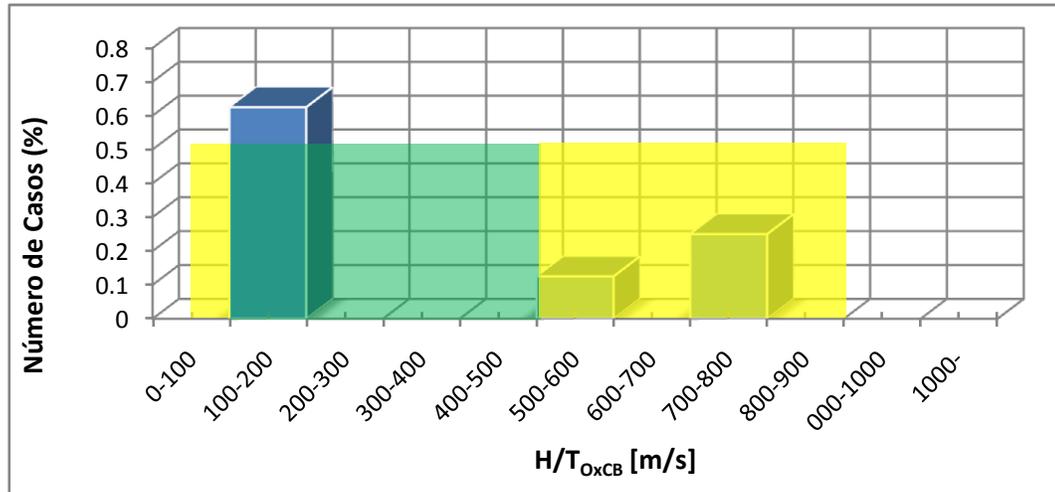


12. Número de ejes resistentes:

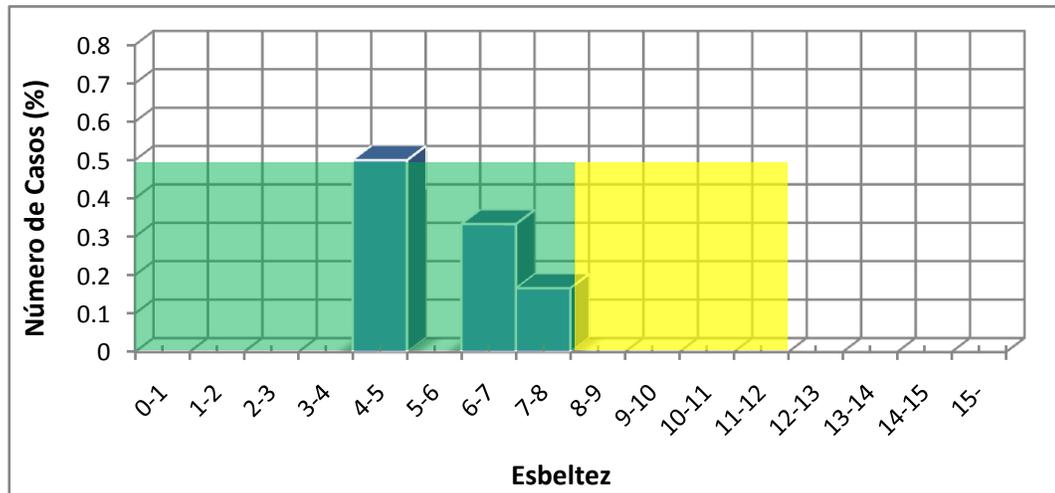


VIII.2. Rangos de los nuevos indicadores.

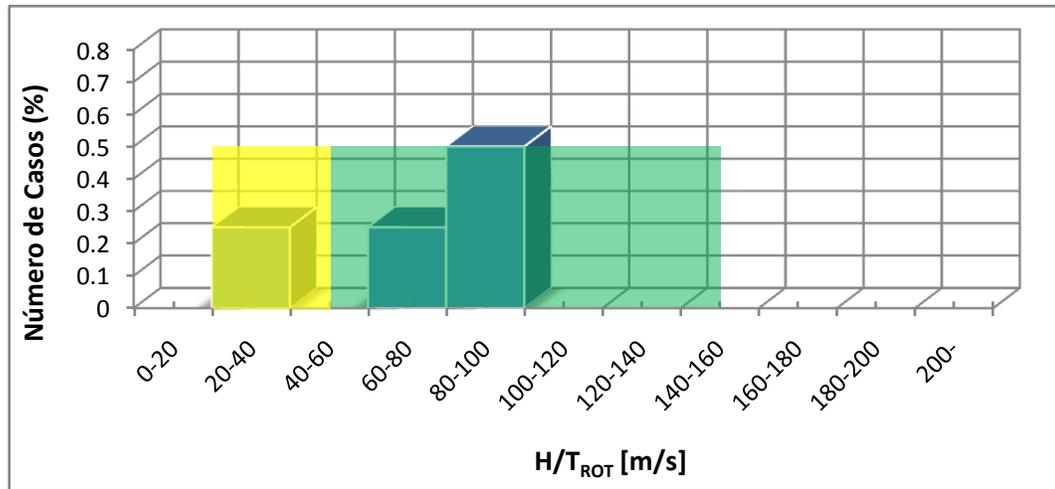
1. Cuociente altura total versus periodo con mayor aporte al corte basal:



2. Esbeltez:

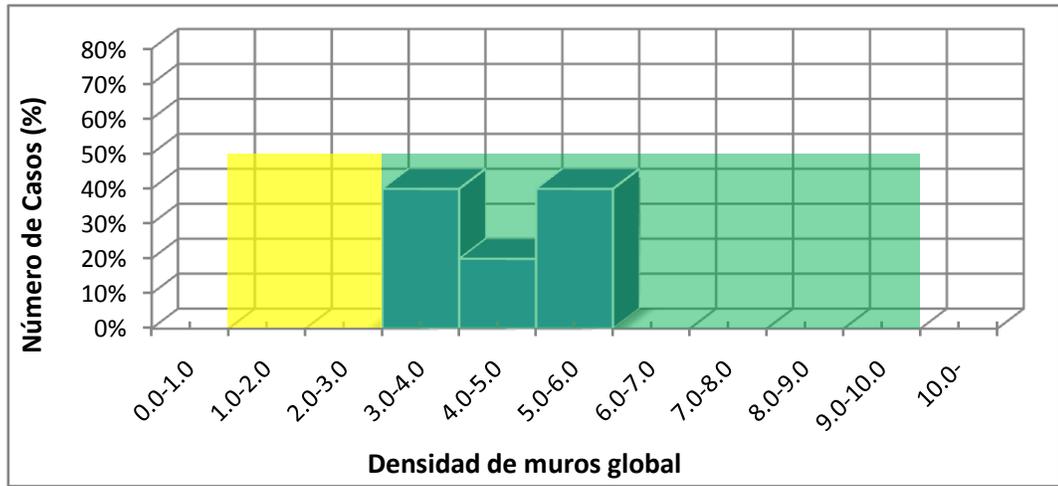


3. Cuociente altura total versus primer periodo rotacional:

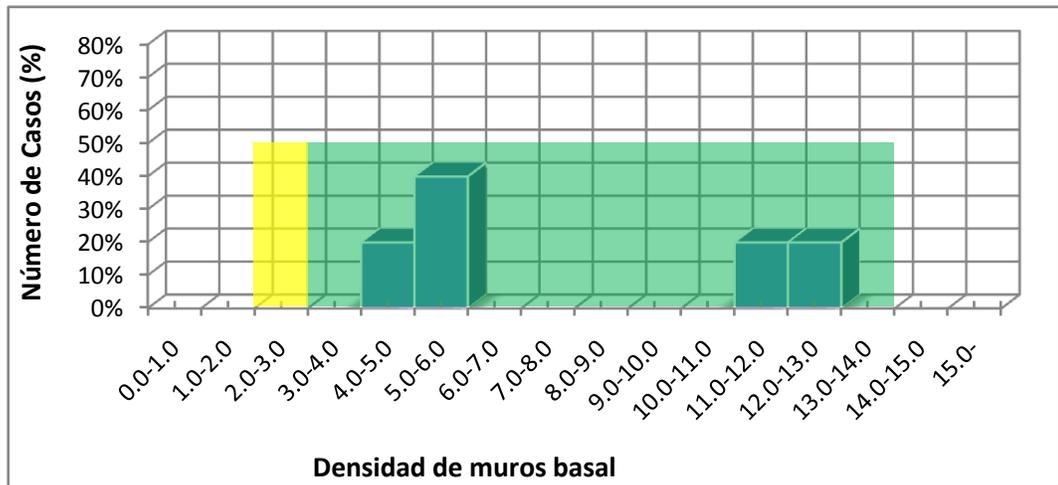


4. Densidad de muros:

a. Global.



b. Basal.



CAPÍTULO IX: CONCLUSIONES.

IX.1. Conclusiones.

El objetivo principal de esta investigación era el de analizar edificios altos frente a cargas sísmicas y obtener parámetros indicadores de su comportamiento. Este propósito se cumplió de forma satisfactoria en forma general así como es sus puntos más específicos.

En el marco de esta memoria, se logró construir modelos aproximados de los edificios más altos del mundo (4) a partir de información disponible públicamente. Estos modelos, si bien no son exactos, tuvieron un comportamiento muy cercano a la estructura real, lo cual fue corroborado con información de la literatura.

Además se logró utilizar un gran número de herramientas disponibles en el programa GT Strudl para simplificar la modelación de los edificios sin perder precisión en los datos obtenidos.

El rescate de datos bajo GT Strudl, si bien no es 100% amigable gráficamente comparado con otros *softwares*, logra cumplir su objetivo y mantener al ingeniero en control de los que se está modelando. También se pueden desarrollar herramientas entorno a los archivos de salida para obtener información de calidad.

Se puede concluir que los indicadores del perfil Bío-Sísmico siguen teniendo validez, en su mayoría, para calificar estructuras de este tipo. Además, los rangos determinados en el estudio original siguen teniendo utilidad y describen la “salud” del edificio.

El parámetro H/T sigue teniendo validez absoluta y logra calificar exitosamente los edificios. Además, se logra apreciar una agrupación de los datos en torno a un cierto valor para edificios de similares materiales y cantidad de pisos. También es válido el indicador del efecto P- Δ cuyos valores describen si va a ser necesario un análisis más minucioso de este efecto.

En el caso de los indicadores de los desplazamientos superiores y entre pisos la respuesta fue variada. Si bien el indicador es absolutamente válido para medir la respuesta de la estructura, se detectó que los valores máximos superan los rangos establecidos en el estudio de Guendelman et al (3).

Esto requirió un análisis más profundo de lo que sucedía piso a piso con la estructura y evidenció que la gran mayoría de los puntos en que se obtenían desplazamientos muy por sobre los rangos aceptados eran zonas puntuales de la estructura, ubicadas generalmente donde el edificio variaba en dimensiones de planta y altura de forma exagerada. Por lo general estas zonas se ubicaban en los últimos pisos que eran los que arrojaban resultados que escapaban a la media.

Viendo la distribución de los desplazamientos de entrepiso, se pudo observar que en ambos casos medidos la mayoría de estos valores se encuentra por debajo del 6‰, valor que si bien supera el 2‰, que establece la norma chilena NCh433.Of96, es aceptable tomando en cuenta que el desplazamiento entrepiso va a depender mucho de la modelación en detalle de los elementos resistentes y de las masas que participan en el esfuerzo. El hecho que los modelos

hayan sido aproximados y sometidos a un espectro elástico sobreestimando aceleraciones máximas a los cuales estaría sometido realmente hace concluir que este valor debería disminuir en la realidad mejorando su comportamiento.

Respecto a los indicadores de acoplamiento se pudo observar que poseían un muy buen comportamiento restringiendo sus valores en la mayoría de los casos a los postulados en el Perfil Bío-Sísmico. Esto es efectivo para la mayoría de los modelos, exceptuando la torre Jin Mao (Modelo 1), la que tuvo un comportamiento bastante extraño debido a que su primer periodo era torsional, y entonces se escapa de los rangos normales en el parámetro de acoplamiento de periodo rotacional versus traslacional, el indicador de acoplamiento de los momentos volcantes, etc.

El hecho de que algunos de los edificios busquen la simetría provocó que parámetros como el de acoplamiento de masas traslacionales tuviera valores que se escaparan fuera de lo “aceptable” pero se explica gracias a las disposiciones especiales que poseen estas estructuras (Torre Jin Mao y Taipéi 101).

También se observó el gran número de ejes resistentes obtenidos para todas las estructuras. Esto sigue la línea de varias normas extranjeras que buscan la redundancia estructural en edificios tan importantes.

El factor de reducción espectral efectivo no pudo ser aplicado debido a que se utilizó un espectro elástico sin reducción.

Respecto a los nuevos parámetros que se obtuvieron se puede concluir lo siguiente:

- El ordenar los modos según corte ofrece una visión distinta del comportamiento de las estructuras, pero este valor de aporte del corte basal depende mucho de la forma que posea el espectro y en donde se encuentre el *peak* de aceleraciones. Sin embargo, se plantea un rango entre 100 y 500 [m/s] para describir edificios saludables. Valores menores a éste radicará en una estructura más rígida y valores mayores a éste podrían ser peligrosos debido a que los *peaks* se ubican en zonas de periodos bajos.
- La esbeltez es un parámetro muy interesante, que describe de una forma muy simple el comportamiento aproximado que tendrá la estructura. Se incluyó un límite saludable de este valor hasta 8, y admisible hasta 12.
- El cociente entre la altura y el mayor periodo rotacional funcionó bien como indicador del comportamiento torsional de los edificios, resaltando de inmediato el caso singular del modelo de la torre Jin Mao. Se propone un rango saludable entre 50 y 150 [m/s]. Valores del indicador por debajo de esta zona indicarán que la estructura es flexible a la torsión y que habría que tener especial cuidado con ella.
- La densidad de muros otorgó resultados confiables de la capacidad del edificio y tanto los valores globales como basales se encontraban por sobre las recomendaciones mínimas de 2% y 3% en cada dirección.

Se propone la creación de algún tipo de analogía que permita describir cuanta “densidad de acero” sería necesaria para estructuras que no sean de hormigón armado respondan “saludablemente”.

Finalmente se propone que el nuevo cuadro de parámetros del perfil Bío Sísmico, a diferencia del anterior, quede compuesto con los siguientes parámetros:

Rigidez:

1. Esbeltez
2. Altura total / Periodo Traslacional.
3. Altura total / Periodo Rotacional.
4. Efecto P- Δ .
5. Densidad de Muros Global.
6. Desplazamiento total nivel superior.
7. Máximo desplazamiento entrepiso en centros de gravedad.
8. Máximo desplazamiento entrepiso en puntos extremos.

Acoplamiento traslación-rotación y traslación-traslación:

9. Periodo Rotacional / Periodo Traslacional.
10. Masa Equivalente Rotacional Acoplada / Masa Equivalente Traslacional Directa.
11. Excentricidad Dinámica / Radio de Giro Basal.
12. Masa Equivalente Traslacional Acoplada / Masa Equivalente Traslacional Directa.
13. Corte Basal Acoplado / Corte Basal Directo.
14. Momento Volcante Basal Acoplado / Momento Volcante Basal Directo.

Redundancia estructural y demanda de ductilidad:

15. Número de elementos relevantes en la resistencia sísmica.
16. Factor de Reducción Espectral Efectivo.

ANEXO A. DETALLE DE LAS MASAS POR PISO DE LAS LOSAS.

Modelo 1 basado en la torre Jin Mao.

Tabla A.1. Detalle del cálculo de masas y pesos de las losas de modelo 1. (PISOS: S2 al 42)

PISO	ÁREA TOTAL PISO	PESO DECK	SC	PESO SC (25%)	PESO TOTAL	MASA TOTAL	lxx	lyy	lr	MASA ROT. TOTAL
	m ²	tonf/m ²	tonf/m ²	tonf/m ²	tonf	tonf*s ² /m	m ⁴	m ⁴	m ²	tonf*s ² *m
S2	2916.0	0.381	0.250	0.063	1293.2	131.8	708588.0	708588.0	486.0	64069.1
S1	2916.0	0.381	0.250	0.063	1293.2	131.8	708588.0	708588.0	486.0	64069.1
1	2916.0	0.381	0.250	0.063	1293.2	131.8	708588.0	708588.0	486.0	64069.1
2	2916.0	0.381	0.250	0.063	1293.2	131.8	708588.0	708588.0	486.0	64069.1
3	2916.0	0.381	0.250	0.063	1293.2	131.8	708588.0	708588.0	486.0	64069.1
4	2916.0	0.381	0.250	0.063	1293.2	131.8	708588.0	708588.0	486.0	64069.1
5	2916.0	0.381	0.250	0.063	1293.2	131.8	708588.0	708588.0	486.0	64069.1
6	2916.0	0.381	0.250	0.063	1293.2	131.8	708588.0	708588.0	486.0	64069.1
7	2916.0	0.381	0.250	0.063	1293.2	131.8	708588.0	708588.0	486.0	64069.1
8	2916.0	0.381	0.250	0.063	1293.2	131.8	708588.0	708588.0	486.0	64069.1
9	2916.0	0.381	0.250	0.063	1293.2	131.8	708588.0	708588.0	486.0	64069.1
10	2916.0	0.381	0.250	0.063	1293.2	131.8	708588.0	708588.0	486.0	64069.1
11	2916.0	0.381	0.250	0.063	1293.2	131.8	708588.0	708588.0	486.0	64069.1
12	2916.0	0.381	0.250	0.063	1293.2	131.8	708588.0	708588.0	486.0	64069.1
13	2916.0	0.381	0.250	0.063	1293.2	131.8	708588.0	708588.0	486.0	64069.1
14	2916.0	0.381	0.250	0.063	1293.2	131.8	708588.0	708588.0	486.0	64069.1
15	2916.0	0.381	0.250	0.063	1293.2	131.8	708588.0	708588.0	486.0	64069.1
16	2916.0	0.381	0.250	0.063	1293.2	131.8	708588.0	708588.0	486.0	64069.1
17	2662.9	0.381	0.250	0.063	1181.0	120.4	586154.4	586154.4	440.2	52999.0
18	2662.9	0.381	0.250	0.063	1181.0	120.4	586154.4	586154.4	440.2	52999.0
19	2662.9	0.381	0.250	0.063	1181.0	120.4	586154.4	586154.4	440.2	52999.0
20	2662.9	0.381	0.250	0.063	1181.0	120.4	586154.4	586154.4	440.2	52999.0
21	2662.9	0.381	0.250	0.063	1181.0	120.4	586154.4	586154.4	440.2	52999.0
22	2662.9	0.381	0.250	0.063	1181.0	120.4	586154.4	586154.4	440.2	52999.0
23	2662.9	0.381	0.250	0.063	1181.0	120.4	586154.4	586154.4	440.2	52999.0
24	2662.9	0.381	1.000	0.250	1680.3	171.3	586154.4	586154.4	440.2	75405.5
25	2662.9	0.381	1.000	0.250	1680.3	171.3	586154.4	586154.4	440.2	75405.5
26	2662.9	0.381	0.250	0.063	1181.0	120.4	586154.4	586154.4	440.2	52999.0
27	2662.9	0.381	0.250	0.063	1181.0	120.4	586154.4	586154.4	440.2	52999.0
28	2662.9	0.381	0.250	0.063	1181.0	120.4	586154.4	586154.4	440.2	52999.0
29	2662.9	0.381	0.250	0.063	1181.0	120.4	586154.4	586154.4	440.2	52999.0
30	2662.9	0.381	0.250	0.063	1181.0	120.4	586154.4	586154.4	440.2	52999.0
31	2441.4	0.381	0.250	0.063	1082.8	110.4	489891.3	489891.3	401.3	44295.0
32	2441.4	0.381	0.250	0.063	1082.8	110.4	489891.3	489891.3	401.3	44295.0
33	2441.4	0.381	0.250	0.063	1082.8	110.4	489891.3	489891.3	401.3	44295.0
34	2441.4	0.381	0.250	0.063	1082.8	110.4	489891.3	489891.3	401.3	44295.0
35	2441.4	0.381	0.250	0.063	1082.8	110.4	489891.3	489891.3	401.3	44295.0
36	2441.4	0.381	0.250	0.063	1082.8	110.4	489891.3	489891.3	401.3	44295.0
37	2441.4	0.381	0.250	0.063	1082.8	110.4	489891.3	489891.3	401.3	44295.0
38	2441.4	0.381	0.250	0.063	1082.8	110.4	489891.3	489891.3	401.3	44295.0
39	2441.4	0.381	0.250	0.063	1082.8	110.4	489891.3	489891.3	401.3	44295.0
40	2441.4	0.381	0.250	0.063	1082.8	110.4	489891.3	489891.3	401.3	44295.0
41	2441.4	0.381	0.250	0.063	1082.8	110.4	489891.3	489891.3	401.3	44295.0
42	2441.4	0.381	0.250	0.063	1082.8	110.4	489891.3	489891.3	401.3	44295.0

Tabla A.2. Detalle del cálculo de masas y pesos de las losas de modelo 1. (PISOS: 43 al 88)

PISO	ÁREA TOTAL PISO	PESO DECK	SC	PESO SC (25%)	PESO TOTAL	MASA TOTAL	lxx	lyy	lr	MASA ROT. TOTAL
	m ²	tonf/m ²	tonf/m ²	tonf/m ²	tonf	tonf*s ² /m	m ⁴	m ⁴	m ²	tonf*s ² *m
43	2247.6	0.381	0.250	0.063	996.8	101.6	414089.4	414089.4	368.5	37441.0
44	2247.6	0.381	0.250	0.063	996.8	101.6	414089.4	414089.4	368.5	37441.0
45	2247.6	0.381	0.250	0.063	996.8	101.6	414089.4	414089.4	368.5	37441.0
46	2247.6	0.381	0.250	0.063	996.8	101.6	414089.4	414089.4	368.5	37441.0
47	2247.6	0.381	0.250	0.063	996.8	101.6	414089.4	414089.4	368.5	37441.0
48	2247.6	0.381	0.250	0.063	996.8	101.6	414089.4	414089.4	368.5	37441.0
49	2247.6	0.381	0.250	0.063	996.8	101.6	414089.4	414089.4	368.5	37441.0
50	2247.6	0.381	0.250	0.063	996.8	101.6	414089.4	414089.4	368.5	37441.0
51	2247.6	0.381	1.000	0.250	1418.2	144.6	414089.4	414089.4	368.5	53270.1
52	2247.6	0.381	1.000	0.250	1418.2	144.6	414089.4	414089.4	368.5	53270.1
53	1680.4	0.381	0.250	0.063	745.3	76.0	341724.7	341724.7	328.9	24986.0
54	1680.4	0.381	0.250	0.063	745.3	76.0	341724.7	341724.7	328.9	24986.0
55	1680.4	0.381	0.250	0.063	745.3	76.0	341724.7	341724.7	328.9	24986.0
56	1680.4	0.381	0.250	0.063	745.3	76.0	341724.7	341724.7	328.9	24986.0
57	1680.4	0.381	0.250	0.063	745.3	76.0	341724.7	341724.7	328.9	24986.0
58	1680.4	0.381	0.250	0.063	745.3	76.0	341724.7	341724.7	328.9	24986.0
59	1680.4	0.381	0.250	0.063	745.3	76.0	341724.7	341724.7	328.9	24986.0
60	1680.4	0.381	0.250	0.063	745.3	76.0	341724.7	341724.7	328.9	24986.0
61	1532.0	0.381	0.250	0.063	679.5	69.3	294497.4	294497.4	305.2	21141.1
62	1532.0	0.381	0.250	0.063	679.5	69.3	294497.4	294497.4	305.2	21141.1
63	1532.0	0.381	0.250	0.063	679.5	69.3	294497.4	294497.4	305.2	21141.1
64	1532.0	0.381	0.250	0.063	679.5	69.3	294497.4	294497.4	305.2	21141.1
65	1532.0	0.381	0.250	0.063	679.5	69.3	294497.4	294497.4	305.2	21141.1
66	1532.0	0.381	0.250	0.063	679.5	69.3	294497.4	294497.4	305.2	21141.1
67	1532.0	0.381	0.250	0.063	679.5	69.3	294497.4	294497.4	305.2	21141.1
68	1402.2	0.381	0.250	0.063	621.9	63.4	257125.5	257125.5	285.7	18112.8
69	1402.2	0.381	0.250	0.063	621.9	63.4	257125.5	257125.5	285.7	18112.8
70	1402.2	0.381	0.250	0.063	621.9	63.4	257125.5	257125.5	285.7	18112.8
71	1402.2	0.381	0.250	0.063	621.9	63.4	257125.5	257125.5	285.7	18112.8
72	1402.2	0.381	0.250	0.063	621.9	63.4	257125.5	257125.5	285.7	18112.8
73	1402.2	0.381	0.250	0.063	621.9	63.4	257125.5	257125.5	285.7	18112.8
74	1288.6	0.381	0.250	0.063	571.5	58.3	227504.9	227504.9	269.8	15720.0
75	1288.6	0.381	0.250	0.063	571.5	58.3	227504.9	227504.9	269.8	15720.0
76	1288.6	0.381	0.250	0.063	571.5	58.3	227504.9	227504.9	269.8	15720.0
77	1288.6	0.381	0.250	0.063	571.5	58.3	227504.9	227504.9	269.8	15720.0
78	1288.6	0.381	0.250	0.063	571.5	58.3	227504.9	227504.9	269.8	15720.0
79	1189.2	0.381	0.250	0.063	527.4	53.8	203984.2	203984.2	257.1	13822.3
80	1189.2	0.381	0.250	0.063	527.4	53.8	203984.2	203984.2	257.1	13822.3
81	1189.2	0.381	0.250	0.063	527.4	53.8	203984.2	203984.2	257.1	13822.3
82	1189.2	0.381	0.250	0.063	527.4	53.8	203984.2	203984.2	257.1	13822.3
83	1102.2	0.381	0.250	0.063	488.8	49.8	185271.5	185271.5	247.1	12310.9
84	1102.2	0.381	0.250	0.063	488.8	49.8	185271.5	185271.5	247.1	12310.9
85	1102.2	0.381	0.250	0.063	488.8	49.8	185271.5	185271.5	247.1	12310.9
86	1026.1	0.381	0.250	0.063	455.1	46.4	170355.4	170355.4	239.3	11101.5
87	1026.1	0.381	0.250	0.063	455.1	46.4	170355.4	170355.4	239.3	11101.5
88	959.5	0.381	0.250	0.063	625.6	63.8	158441.4	158441.4	233.5	14889.1

Modelo 2 basado en el Taipéi 101.

Tabla A.3. Detalle del cálculo de masas y pesos de las losas de modelo 2. (PISOS: B4 al 40)

PISO	ÁREA TOTAL PISO	PESO DECK	SC	PESO SC (25%)	PESO TOTAL	MASA TOTAL	lxx	lyy	lr	MASA ROT. TOTAL
	m ²	tonf/m ²	tonf/m ²	tonf/m ²	tonf	tonf*s ² /m	m ⁴	m ⁴	m ²	tonf*s ² *m
B4	4356.0	0.410	0.250	0.063	2058.2	209.8	1581228.0	1581228.0	726.0	152320.1
B3	4290.3	0.410	0.250	0.063	2027.1	206.6	1533853.8	1533853.8	715.0	147756.6
B2	4225.0	0.410	0.250	0.063	1996.3	203.5	1487552.1	1487552.1	704.2	143296.3
B1	4147.4	0.410	0.250	0.063	1959.6	199.8	1433382.9	1433382.9	691.2	138078.2
1	4019.6	0.410	0.250	0.063	1899.2	193.6	1346405.2	1346405.2	669.9	129699.6
2	3897.5	0.410	0.250	0.063	1841.6	187.7	1265878.7	1265878.7	649.6	121942.4
3	3777.3	0.410	0.250	0.063	1784.8	181.9	1189019.5	1189019.5	629.6	114538.6
4	3659.0	0.410	0.250	0.063	1728.9	176.2	1115714.5	1115714.5	609.8	107477.1
5	3542.6	0.410	0.250	0.063	1673.9	170.6	1045852.5	1045852.5	590.4	100747.3
6	3428.1	0.410	0.250	0.063	1619.8	165.1	979323.9	979323.9	571.4	94338.5
7	3315.5	0.410	1.000	0.250	2188.2	223.1	916020.9	916020.9	552.6	123256.6
8	3241.0	0.410	1.000	0.250	2139.1	218.1	875353.5	875353.5	540.2	117784.6
9	3167.4	0.410	0.250	0.063	1496.6	152.6	836055.5	836055.5	527.9	80537.5
10	3094.7	0.410	0.250	0.063	1462.2	149.1	798095.7	798095.7	515.8	76880.8
11	3022.8	0.410	0.250	0.063	1428.3	145.6	761443.5	761443.5	503.8	73350.1
12	2951.7	0.410	0.250	0.063	1394.7	142.2	726068.5	726068.5	492.0	69942.4
13	2881.5	0.410	0.250	0.063	1361.5	138.8	691940.6	691940.6	480.3	66654.8
14	2812.2	0.410	0.250	0.063	1328.8	135.4	659030.1	659030.1	468.7	63484.6
15	2743.7	0.410	0.250	0.063	1296.4	132.1	627307.9	627307.9	457.3	60428.7
16	2676.0	0.410	0.250	0.063	1264.4	128.9	596744.8	596744.8	446.0	57484.6
17	2609.2	0.410	1.000	0.250	1722.0	175.5	567312.4	567312.4	434.9	76335.6
18	2543.2	0.410	1.000	0.250	1678.5	171.1	538982.5	538982.5	423.9	72523.6
19	2478.0	0.410	0.250	0.063	1170.9	119.4	511727.0	511727.0	413.0	49294.8
20	2413.8	0.410	0.250	0.063	1140.5	116.3	485518.5	485518.5	402.3	46770.1
21	2350.3	0.410	0.250	0.063	1110.5	113.2	460329.9	460329.9	391.7	44343.7
22	2287.7	0.410	0.250	0.063	1080.9	110.2	436134.3	436134.3	381.3	42012.9
23	2226.0	0.410	0.250	0.063	1051.8	107.2	412905.3	412905.3	371.0	39775.3
24	2165.0	0.410	0.250	0.063	1023.0	104.3	390616.8	390616.8	360.8	37628.2
25	2105.0	0.410	0.250	0.063	994.6	101.4	369243.1	369243.1	350.8	35569.3
26	2045.8	0.410	1.000	0.250	1350.2	137.6	348758.7	348758.7	341.0	46927.8
27	2105.0	0.410	1.000	0.250	1389.3	141.6	369243.1	369243.1	350.8	49684.1
28	2166.9	0.410	0.250	0.063	1023.9	104.4	391288.9	391288.9	361.2	37693.0
29	2233.5	0.410	0.250	0.063	1055.3	107.6	415713.0	415713.0	372.3	40045.7
30	2301.1	0.410	0.250	0.063	1087.3	110.8	441263.1	441263.1	383.5	42507.0
31	2369.7	0.410	0.250	0.063	1119.7	114.1	467973.3	467973.3	395.0	45080.0
32	2439.4	0.410	0.250	0.063	1152.6	117.5	495878.0	495878.0	406.6	47768.1
33	2510.0	0.410	0.250	0.063	1186.0	120.9	525012.5	525012.5	418.3	50574.6
34	2581.7	0.410	0.250	0.063	1219.8	124.3	555412.4	555412.4	430.3	53503.0
35	2105.0	0.410	1.000	0.250	1389.3	141.6	369243.1	369243.1	350.8	49684.1
36	2166.9	0.410	0.250	0.063	1023.9	104.4	391288.9	391288.9	361.2	37693.0
37	2233.5	0.410	0.250	0.063	1055.3	107.6	415713.0	415713.0	372.3	40045.7
38	2301.1	0.410	0.250	0.063	1087.3	110.8	441263.1	441263.1	383.5	42507.0
39	2369.7	0.410	0.250	0.063	1119.7	114.1	467973.3	467973.3	395.0	45080.0
40	2439.4	0.410	0.250	0.063	1152.6	117.5	495878.0	495878.0	406.6	47768.1

Tabla A.4. Detalle del cálculo de masas y pesos de las losas de modelo 2. (PISOS: 41 al 87)

PISO	ÁREA TOTAL PISO	PESO DECK	SC	PESO SC (25%)	PESO TOTAL	MASA TOTAL	lxx	lyy	lr	MASA ROT. TOTAL
	m ²	tonf/m ²	tonf/m ²	tonf/m ²	tonf	tonf*s ² /m	m ⁴	m ⁴	m ²	tonf*s ² *m
41	2510.0	0.410	0.250	0.063	1186.0	120.9	525012.5	525012.5	418.3	50574.6
42	2581.7	0.410	0.250	0.063	1219.8	124.3	555412.4	555412.4	430.3	53503.0
43	2105.0	0.410	1.000	0.250	1389.3	141.6	369243.1	369243.1	350.8	49684.1
44	2166.9	0.410	0.250	0.063	1023.9	104.4	391288.9	391288.9	361.2	37693.0
45	2233.5	0.410	0.250	0.063	1055.3	107.6	415713.0	415713.0	372.3	40045.7
46	2301.1	0.410	0.250	0.063	1087.3	110.8	441263.1	441263.1	383.5	42507.0
47	2369.7	0.410	0.250	0.063	1119.7	114.1	467973.3	467973.3	395.0	45080.0
48	2439.4	0.410	0.250	0.063	1152.6	117.5	495878.0	495878.0	406.6	47768.1
49	2510.0	0.410	0.250	0.063	1186.0	120.9	525012.5	525012.5	418.3	50574.6
50	2581.7	0.410	0.250	0.063	1219.8	124.3	555412.4	555412.4	430.3	53503.0
51	2105.0	0.410	1.000	0.250	1389.3	141.6	369243.1	369243.1	350.8	49684.1
52	2166.9	0.410	0.250	0.063	1023.9	104.4	391288.9	391288.9	361.2	37693.0
53	2233.5	0.410	0.250	0.063	1055.3	107.6	415713.0	415713.0	372.3	40045.7
54	2301.1	0.410	0.250	0.063	1087.3	110.8	441263.1	441263.1	383.5	42507.0
55	2369.7	0.410	0.250	0.063	1119.7	114.1	467973.3	467973.3	395.0	45080.0
56	2439.4	0.410	0.250	0.063	1152.6	117.5	495878.0	495878.0	406.6	47768.1
57	2510.0	0.410	0.250	0.063	1186.0	120.9	525012.5	525012.5	418.3	50574.6
58	2581.7	0.410	0.250	0.063	1219.8	124.3	555412.4	555412.4	430.3	53503.0
59	2105.0	0.410	1.000	0.250	1389.3	141.6	369243.1	369243.1	350.8	49684.1
60	2166.9	0.410	0.250	0.063	1023.9	104.4	391288.9	391288.9	361.2	37693.0
61	2233.5	0.410	0.250	0.063	1055.3	107.6	415713.0	415713.0	372.3	40045.7
62	2301.1	0.410	0.250	0.063	1087.3	110.8	441263.1	441263.1	383.5	42507.0
63	2369.7	0.410	0.250	0.063	1119.7	114.1	467973.3	467973.3	395.0	45080.0
64	2439.4	0.410	0.250	0.063	1152.6	117.5	495878.0	495878.0	406.6	47768.1
65	2510.0	0.410	0.250	0.063	1186.0	120.9	525012.5	525012.5	418.3	50574.6
66	2581.7	0.410	0.250	0.063	1219.8	124.3	555412.4	555412.4	430.3	53503.0
67	2105.0	0.410	1.000	0.250	1389.3	141.6	369243.1	369243.1	350.8	49684.1
68	2166.9	0.410	0.250	0.063	1023.9	104.4	391288.9	391288.9	361.2	37693.0
69	2233.5	0.410	0.250	0.063	1055.3	107.6	415713.0	415713.0	372.3	40045.7
70	2301.1	0.410	0.250	0.063	1087.3	110.8	441263.1	441263.1	383.5	42507.0
71	2369.7	0.410	0.250	0.063	1119.7	114.1	467973.3	467973.3	395.0	45080.0
72	2439.4	0.410	0.250	0.063	1152.6	117.5	495878.0	495878.0	406.6	47768.1
73	2510.0	0.410	0.250	0.063	1186.0	120.9	525012.5	525012.5	418.3	50574.6
74	2581.7	0.410	0.250	0.063	1219.8	124.3	555412.4	555412.4	430.3	53503.0
75	2105.0	0.410	1.000	0.250	1389.3	141.6	369243.1	369243.1	350.8	49684.1
76	2166.9	0.410	0.250	0.063	1023.9	104.4	391288.9	391288.9	361.2	37693.0
77	2233.5	0.410	0.250	0.063	1255.3	128.0	415713.0	415713.0	372.3	47635.0
78	2301.1	0.410	0.250	0.063	1287.3	131.2	441263.1	441263.1	383.5	50326.0
79	2369.7	0.410	0.250	0.063	1319.7	134.5	467973.3	467973.3	395.0	53132.1
80	2439.4	0.410	0.250	0.063	1352.6	137.9	495878.0	495878.0	406.6	56056.8
81	2510.0	0.410	0.250	0.063	1386.0	141.3	525012.5	525012.5	418.3	59103.3
82	2581.7	0.410	0.250	0.063	1419.8	144.7	555412.4	555412.4	430.3	62275.2
83	2105.0	0.410	1.000	0.250	1589.3	162.0	369243.1	369243.1	350.8	56836.6
84	2166.9	0.410	0.250	0.063	1223.9	124.8	391288.9	391288.9	361.2	45055.9
85	2233.5	0.410	0.250	0.063	1255.3	128.0	415713.0	415713.0	372.3	47635.0
86	2301.1	0.410	0.250	0.063	1287.3	131.2	441263.1	441263.1	383.5	50326.0
87	2369.7	0.410	0.250	0.063	1319.7	134.5	467973.3	467973.3	395.0	53132.1
88	2439.4	0.410	0.250	0.063	1352.6	137.9	495878.0	495878.0	406.6	56056.8

Tabla A.5. Detalle del cálculo de masas y pesos de las losas de modelo 2. (PISOS: 89 al 102)

PISO	ÁREA TOTAL PISO	PESO DECK	SC	PESO SC (25%)	PESO TOTAL	MASA TOTAL	lxx	lyy	lr	MASA ROT. TOTAL
	m ²	tonf/m ²	tonf/m ²	tonf/m ²	tonf	tonf*s ² /m	m ⁴	m ⁴	m ²	tonf*s ² *m
89	2510.0	0.410	0.250	0.063	1386.0	141.3	525012.5	525012.5	418.3	59103.3
90	2581.7	0.410	0.250	0.063	1419.8	144.7	555412.4	555412.4	430.3	62275.2
91	1963.5	0.410	0.250	0.063	1127.8	115.0	60239.3	60239.3	61.4	7053.8
92	1024.0	0.410	0.250	0.063	683.8	69.7	87381.3	87381.3	170.7	11896.9
	MASA EN Y DEBIDO A TMD.				1345.8	137.2				
93	1024.0	0.410	0.250	0.063	683.8	69.7	87381.3	87381.3	170.7	11896.9
94	1024.0	0.410	0.250	0.063	683.8	69.7	87381.3	87381.3	170.7	11896.9
95	576.0	0.410	0.250	0.063	472.2	48.1	27648.0	27648.0	96.0	4620.5
96	196.0	0.410	0.250	0.063	292.6	29.8	3201.3	3201.3	32.7	974.4
97	210.3	0.410	0.250	0.063	299.3	30.5	3683.8	3683.8	35.0	1069.3
98	240.3	0.410	0.250	0.063	313.5	32.0	4810.0	4810.0	40.0	1279.7
99	272.3	0.410	0.250	0.063	328.6	33.5	6176.7	6176.7	45.4	1520.1
100	306.3	0.410	0.250	0.063	344.7	35.1	7815.8	7815.8	51.0	1793.5
101	225.0	0.410	0.250	0.063	306.3	31.2	4218.8	4218.8	37.5	1170.9
102	272.3	0.410	0.250	0.063	528.6	53.9	6176.7	6176.7	45.4	2445.2

Modelo 3 basado en las Torres Petronas.

Tabla A.6. Detalle del cálculo de masas y pesos de las losas de modelo 3. (PISOS: B4 al 41b)

PISO	ÁREA TOTAL PISO	PESO DECK	SC	PESO SC (25%)	PESO TOTAL	MASA TOTAL	lxx	lyy	lr	MASA ROT. TOTAL
	m ²	tonf/m ²	tonf/m ²	tonf/m ²	tonf	tonf*s ² /m	m ⁴	m ⁴	m ²	tonf*s ² *m
B4	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
B3	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
B2	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
B1	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
0	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
1	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
2	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
3	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
4	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
5	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
6	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
7	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
8	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
9	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
10	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
11	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
12	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
13	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
14	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
15	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
16	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
17	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
18	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
19	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
20	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
21	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
22	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
23	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
24	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
25	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
26	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
27	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
28	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
29	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
30	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
31	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
32	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
33	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
34	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
35	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
36	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
37	2492.2	0.311	0.250	0.063	931.6	95.0	880507.7	330979.7	486.1	46161.1
38	2492.2	0.311	1.000	0.250	1398.9	142.6	880507.7	330979.7	486.1	69316.4
39	2492.2	0.311	1.000	0.250	1398.9	142.6	880507.7	330979.7	486.1	69316.4
40	2492.2	0.311	1.000	0.250	1398.9	142.6	880507.7	330979.7	486.1	69316.4
41	1972.8	0.311	0.250	0.063	737.4	75.2	311895.2	311895.2	316.2	23768.2
41b	359.7	0.311	0.250	0.063	134.4	13.7	10294.8	10294.8	57.2	784.5

Tabla A.7. Detalle del cálculo de masas y pesos de las losas de modelo 3. (PISOS: 42 al 88)

PISO	ÁREA TOTAL PISO	PESO DECK	SC	PESO SC (25%)	PESO TOTAL	MASA TOTAL	lxx	lyy	lr	MASA ROT. TOTAL
	m ²	tonf/m ²	tonf/m ²	tonf/m ²	tonf	tonf*s ² /m	m ⁴	m ⁴	m ²	tonf*s ² *m
42	1972.8	0.311	0.250	0.063	737.4	75.2	311895.2	311895.2	316.2	23768.2
43	1972.8	0.311	0.250	0.063	737.4	75.2	311895.2	311895.2	316.2	23768.2
44	1972.8	0.311	0.250	0.063	737.4	75.2	311895.2	311895.2	316.2	23768.2
45	1972.8	0.311	0.250	0.063	737.4	75.2	311895.2	311895.2	316.2	23768.2
46	1972.8	0.311	0.250	0.063	737.4	75.2	311895.2	311895.2	316.2	23768.2
47	1972.8	0.311	0.250	0.063	737.4	75.2	311895.2	311895.2	316.2	23768.2
48	1972.8	0.311	0.250	0.063	737.4	75.2	311895.2	311895.2	316.2	23768.2
49	1972.8	0.311	0.250	0.063	737.4	75.2	311895.2	311895.2	316.2	23768.2
50	1972.8	0.311	0.250	0.063	737.4	75.2	311895.2	311895.2	316.2	23768.2
51	1972.8	0.311	0.250	0.063	737.4	75.2	311895.2	311895.2	316.2	23768.2
52	1972.8	0.311	0.250	0.063	737.4	75.2	311895.2	311895.2	316.2	23768.2
53	1972.8	0.311	0.250	0.063	737.4	75.2	311895.2	311895.2	316.2	23768.2
54	1972.8	0.311	0.250	0.063	737.4	75.2	311895.2	311895.2	316.2	23768.2
55	1972.8	0.311	0.250	0.063	737.4	75.2	311895.2	311895.2	316.2	23768.2
56	1972.8	0.311	0.250	0.063	737.4	75.2	311895.2	311895.2	316.2	23768.2
57	1972.8	0.311	0.250	0.063	737.4	75.2	324333.0	324333.0	328.8	24716.0
58	1900.4	0.311	0.250	0.063	710.4	72.4	289355.3	289355.3	304.5	22050.5
59	1829.6	0.311	0.250	0.063	683.9	69.7	268141.2	268141.2	293.1	20433.9
60	1760.2	0.311	0.250	0.063	658.0	67.1	248147.6	248147.6	281.9	18910.2
61	1760.2	0.311	0.250	0.063	658.0	67.1	248147.6	248147.6	281.9	18910.2
62	1760.2	0.311	0.250	0.063	658.0	67.1	248147.6	248147.6	281.9	18910.2
63	1760.2	0.311	0.250	0.063	658.0	67.1	248147.6	248147.6	281.9	18910.2
64	1760.2	0.311	0.250	0.063	658.0	67.1	248147.6	248147.6	281.9	18910.2
65	1760.2	0.311	0.250	0.063	658.0	67.1	248147.6	248147.6	281.9	18910.2
66	1760.2	0.311	0.250	0.063	658.0	67.1	248147.6	248147.6	281.9	18910.2
67	1760.2	0.311	0.250	0.063	658.0	67.1	248147.6	248147.6	281.9	18910.2
68	1760.2	0.311	0.250	0.063	658.0	67.1	248147.6	248147.6	281.9	18910.2
69	1760.2	0.311	0.250	0.063	658.0	67.1	248147.6	248147.6	281.9	18910.2
70	1760.2	0.311	0.250	0.063	658.0	67.1	248147.6	248147.6	281.9	18910.2
71	1586.0	0.311	0.250	0.063	592.8	60.4	201592.1	201592.1	254.2	15362.5
72	1457.8	0.311	0.250	0.063	544.9	55.5	170231.6	170231.6	233.6	12972.6
73	1335.5	0.311	0.250	0.063	499.2	50.9	142821.3	142821.3	213.9	10883.8
74	1298.4	0.311	0.250	0.063	485.3	49.5	134954.2	134954.2	207.9	10284.3
75	1284.1	0.311	0.250	0.063	480.0	48.9	132120.9	132120.9	205.8	10068.4
76	1269.5	0.311	0.250	0.063	474.5	48.4	129111.5	129111.5	203.4	9839.0
77	1254.9	0.311	0.250	0.063	469.1	47.8	126155.9	126155.9	201.1	9613.8
78	1240.4	0.311	0.250	0.063	463.7	47.3	123253.5	123253.5	198.7	9392.6
79	1226.0	0.311	0.250	0.063	458.3	46.7	120403.5	120403.5	196.4	9175.4
80	1094.2	0.311	0.250	0.063	409.0	41.7	95938.0	95938.0	175.4	7311.0
81	988.5	0.311	0.250	0.063	369.5	37.7	78253.0	78253.0	158.3	5963.3
82	888.8	0.311	0.250	0.063	332.2	33.9	63232.6	63232.6	142.3	4818.7
83	795.1	0.311	0.250	0.063	297.2	30.3	50584.1	50584.1	127.2	3854.8
84	772.6	0.311	0.250	0.063	288.8	29.4	47760.0	47760.0	123.6	3639.6
85	472.8	0.311	0.250	0.063	176.7	18.0	17904.9	17904.9	75.7	1364.5
86	446.9	0.311	0.250	0.063	167.0	17.0	16007.5	16007.5	71.6	1219.9
87	392.4	0.311	0.250	0.063	146.7	15.0	12340.2	12340.2	62.9	940.4
88	360.5	0.311	0.250	0.063	434.8	44.3	10412.3	10412.3	57.8	2559.8

Modelo 4 basado en el Central Plaza.

Tabla A.8. Detalle del cálculo de masas y pesos de las losas de modelo 4. (PISOS: B2 al 40)

PISO	ÁREA TOTAL PISO	PESO DECK	SC	PESO SC (25%)	PESO TOTAL	MASA TOTAL	lxx	lyy	lr	MASA ROT. TOTAL
	m ²	tonf/m ²	tonf/m ²	tonf/m ²	tonf	tonf*s ² /m	m ⁴	m ⁴	m ²	tonf*s ² *m
B2	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	486555.7	414046.2	406.8	29634.7
B1	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	486555.7	414046.2	406.8	29634.7
0	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	486555.7	414046.2	406.8	29634.7
1	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	486555.7	414046.2	406.8	29634.7
2	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	486555.7	414046.2	406.8	29634.7
3*	2214.0	0.260	0.250	0.063	0.0	0.0	435141.4	435141.4	393.1	0.0
4	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
5	2214.0	0.260	1.000	0.250	1129.8	115.2	435141.4	435141.4	393.1	45270.9
6	2214.0	0.260	1.000	0.250	1129.8	115.2	435141.4	435141.4	393.1	45270.9
7	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
8	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
9	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
10	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
11	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
12	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
13	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
14	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
15	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
16	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
17	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
18	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
19	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
20	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
21	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
22	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
23	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
24	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
25	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
26	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
27	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
28	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
29	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
30	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
31	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
32	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
33	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
34	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
35	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
36	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
37	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
38	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
39	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
40	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1

* Piso 3 no posee masa ya que la losa fue modelada con elementos finitos.

Tabla A.9 Detalle del cálculo de masas y pesos de las losas de modelo 4. (PISOS: 41 al 78)

PISO	ÁREA TOTAL PISO	PESO DECK	SC	PESO SC (25%)	PESO TOTAL	MASA TOTAL	lxx	lyy	lr	MASA ROT. TOTAL
	m ²	tonf/m ²	tonf/m ²	tonf/m ²	tonf	tonf*s ² /m	m ⁴	m ⁴	m ²	tonf*s ² *m
41	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
42	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
43	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
44	2214.0	0.260	1.000	0.250	1129.8	115.2	435141.4	435141.4	393.1	45270.9
45	2214.0	0.260	1.000	0.250	1129.8	115.2	435141.4	435141.4	393.1	45270.9
46	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
47	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
48	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
49	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
50	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
51	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
52	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
53	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
54	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
55	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
56	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
57	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
58	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
59	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
60	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
61	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
62	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
63	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
64	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
65	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
66	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
67	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
68	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
69	2214.0	0.260	0.250	0.063	714.7	72.9	435141.4	435141.4	393.1	28637.1
70	2214.0	0.260	1.000	0.250	1129.8	115.2	435141.4	435141.4	393.1	45270.9
71	776.9	0.260	1.000	0.250	396.5	40.4	58086.0	58086.0	149.5	6043.1
72	776.9	0.260	1.000	0.250	396.5	40.4	58086.0	58086.0	149.5	6043.1
73	776.9	0.260	0.250	0.063	250.8	25.6	58086.0	58086.0	149.5	3822.7
74	776.9	0.260	0.250	0.063	250.8	25.6	58086.0	58086.0	149.5	3822.7
75	621.6	0.260	0.250	0.063	200.6	20.5	46468.8	46468.8	149.5	3058.2
76	559.4	0.260	0.250	0.063	180.6	18.4	41821.9	41821.9	149.5	2752.3
77	503.5	0.260	0.250	0.063	162.5	16.6	37639.7	37639.7	149.5	2477.1
78	453.1	0.260	0.250	0.063	346.3	35.3	33875.8	33875.8	149.5	5277.8

ANEXO B. INFORMACIÓN ADJUNTA EN DVD.

Anexo digital con los archivos de la memoria:

- Modelos.
- Tablas
- Modelos analizados en GT Strudl
- Planos de plantas.

Bibliografía

1. Stafford Smith, Bryan, Coull, Alex, 1991, Tall Building Structures: Analysis and Design, JOHN WILEY & SONS, INC.
2. Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 1995, Structural Systems for Tall Buildings, McGrawhill.
3. Guendelman B., Tomas, Guendelman B., Mario, Lindenberg B., Jorge, 1997, Perfil Bío-Sísmico de Edificios, Congreso ACHISINA.
4. Korista, Stanton D., Sarkisian, Mark P., Abdelrazaq, Ahmad K., 1997, An optimal use of concrete in high-rise concrete building design – The Jin Mao Tower, NCMEC Session: High-Rise Concrete Buildings. International Case Studies
5. Taranath , Bungale S., 1998, Steel, Concrete, & Composite Design Of Tall Buildings, McGrawHill
6. Mer M., Ali, 2001, Evolution of Concrete Skyscrapers: from Ingalls to Jin Mao, Electronic Journal of Structural engineering, Vol. 1, No. 1.
7. Ayres, P. G., Macarthur, J. M., 1993, The structural engineering design of Central Plaza, Hong Kong, The Structural Engineer, Vol. 71, No. 11.
8. Mohamad, Hamdan, Choon, Tiam, Azam, Tarique, Tong,Stephen, 1995, The Petronas Towers – The Talles Building in the World, Proceedings of the fifth World Congress, Council on Tall Buildings and Urban Habitat.
9. Shieh, Shaw-Song, Chang, Ching-Chang, Jong, Jiun-Hong, 2003, Structural design of composite super-columns for the Taipei 101 Tower, National Center for Research on Earthquake Engineering, Taiwan.
10. Abada, Gadal, 2004, Petronas Office Towers, On Site Review Report.
11. Instituto Nacional de Normalización, 2003, Análisis y Diseño de edificios con aislación sísmica, NCh2745.Of03.
12. Instituto Nacional de Normalización, 1996, Diseño Sísmico de edificios, NCh433.Of96.
13. Wikipedia, Agosto 2007, List of tallest buildings and structures in the world,
http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_tallest_buildings_and_structures_in_the_world
14. Wikipedia, Agosto 2007, Jin Mao Building,
http://en.wikipedia.org/wiki/Jin_Mao_Building
15. Wikipedia, Agosto 2007, Taipei 101,
http://en.wikipedia.org/wiki/Taipei_101

16. Wikipedia, Agosto 2007, Petronas Twin Towers,
http://en.wikipedia.org/wiki/Petronas_Towers
17. Wikipedia, Agosto 2007, Central Plaza, Hong Kong,
http://en.wikipedia.org/wiki/Central_Plaza
18. Structure Magazine, Junio 2007, Tall Buildings, <http://www.structuremag.org>
19. Structure Magazine, Junio 2006, Taipéi 101, <http://www.structuremag.org>
20. C. Y. Lee, Marzo 2007, Plantas de arquitectura Taipéi 101, <http://www.cylee.com>