



BUAP

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

Trabajo Profesional Documentado

COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL EDIFICIO TORRES ARTS Y

PROPUESTA DE CIMENTACIÓN

Que para obtener el grado de

Maestro en Ingeniería Estructural

Presenta:

Ing. Martín Castillo Flores

Asesor:

Dr. José Joaquín Daniel Lozano Mercado

Puebla, Pue.

Diciembre 2014



BUAP

Oficio SIEP No. 3990/ 2014

ING. MARTÍN CASTILLO FLORES

*Maestría en Ingeniería, opción terminal Estructuras
Presente.*

El suscrito M.I. Edgar Iram Villagrán Arroyo, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema intitulado: ***"Comportamiento dinámico del edificio Torres Arts y propuesta de cimentación"***, para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Estructuras. Asignándose como Asesor de Tesis al Dr. José Joaquín Daniel Lozano Mercado

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"PENSAR BIEN. PARA VIVIR MEJOR"

Puebla, Puebla a 01 de diciembre de 2014

M.I. EDGAR IRAM VILLAGRÁN ARROYO
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA



C.c.p. Dr. José Joaquín Daniel Lozano Mercado. Asesor de Tesis.
c.c.p. Archivo.

GJS*JLM*dsm.

AF

Facultad
de Ingeniería

Bldv. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. 108 C, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

Puebla, Puebla; a 9 de diciembre de 2014

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

M.I. EDGAR IRÁM VILLAGRÁN ARROYO

DIRECTOR DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

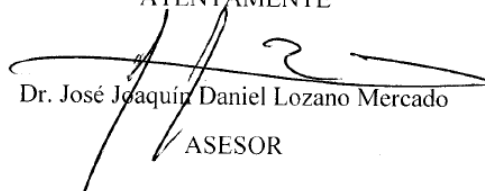
PRESENTE

Él suscrito: **Dr. José Joaquín Daniel Lozano Mercado**, asesor del trabajo profesional documentado denominado “**Comportamiento Dinámico del Edificio Torres Arts y Propuesta de Cimentación**”, presentado por el **Ing. Martín Castillo Flores**, candidato a Maestro en Ingeniería Estructural con matrícula 204702401, me permito informar a usted, que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, no tengo inconveniente en autorizar la impresión de la misma.

Para los efectos académicos que haya lugar, quedo de usted.



ATENTAMENTE


Dr. José Joaquín Daniel Lozano Mercado
ASESOR

c.c.p. Archivo

Interesado

Agradecimientos

A mi *alma mater*, la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por permitirme la oportunidad de presentar este trabajo, esperando sea una aportación más a su acervo, así mismo, a la Facultad de Ingeniería, por haberme preparado con ética y profesionalismo para servir a la sociedad.

Al Director de la Facultad de Ingeniería, el M.I. Edgar Iram Villagrán Arroyo, quien me motivó a presentar este trabajo. Además por el apoyo brindado día a día hacia el trabajo que desempeño orgullosamente como catedrático y responsable del laboratorio de estructuras de esta Facultad.

A la Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado y a su titular el Dr. Gabriel Jiménez Suarez por brindarme las facilidades de estudiar esta maestría.

A mi asesor, el Dr. José Joaquín Daniel Lozano Mercado a quien interrumpí en repetidas ocasiones su valioso tiempo y a quien le agradeceré infinitamente por aceptar ser mi asesor. Dr. Lozano, jamás olvidaré las facilidades y atenciones recibidas.

A la persona para quien trabajé siete años y de quien adquirí muchos conocimientos que sirvieron para este trabajo, M.I. Rafael Ramírez Álvarez mis agradecimientos hacia usted, no cabrían en esta hoja.

A la firma ADR y a mis colegas, socios y amigos, Ing. Domingo Rodríguez Flores y Jorge Francisco Miguel Rojas, por la confianza en sumarse a la propuesta de trabajo y por el ahínco que transmiten a los proyectos que desarrollamos.

Y finalmente a amigos ingenieros, compañeros de aulas y compañeros de trabajo:

Rafael Pelayo, Filiberto Candia, Ricardo Tellez, Fernando Sandoval, Cesar García, Marcos León, Guillermo Muñoz Cordero, Ricardo Barrón, Alejandro Hernández, Antonio Sabugal, Ana Elena Posada, Fernando Lazcano, Víctor Galindo y Antonio Maliachi.

Dedicatoria

A quien me motiva a ser mejor cada día.
A quien hace que mis problemas se solucionen.
A quien se desvela junto a mí.
A quien camina conmigo de la mano.
A quien amo con todo mi corazón.

A mi esposa:

Marina Lizeth Rodríguez Navarro

sin ti, nunca hubiese terminado este trabajo.

Trabajo Profesional Documentado

COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL EDIFICIO TORRES ARTS Y PROPUESTA DE CIMENTACIÓN



T. (222) 225 1588 BLVD. CÚMULO DE VIRGO 1052 ANGELÓPOLIS, PUEBLA

WWW.ARTSPUEBLA.MX ARTS@NVENTA.MX

Contenido

Resumen.....	1
Introducción	1
Antecedentes	2
Objetivo.....	2
CAPÍTULO 1 PROYECTO ARQUITECTÓNICO	3
1.1 Ubicación.....	4
1.2 Características del proyecto	4
1.3 Departamentos.....	4
1.4 Planta baja	6
1.5 Fachadas.....	7
1.6 Solución estructural en base al proyecto arquitectónico	9
1.7 Conclusión sobre el proyecto arquitectónico	9
CAPÍTULO 2 BASES PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL	10
2.1 Clasificación de la estructura	11
2.2 Factores de carga.....	11
2.3 Factores de resistencia	11
2.4 Cargas muertas.....	11
2.5 Cargas vivas.....	12
2.6 Materiales.....	13
2.7 Mecánica de suelos	14
2.8 Coeficiente sísmico	16
CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE CARGAS	17
3.1 Clasificación de los pesos	18
3.2 Pesos propios (PP)	19
3.3 Pesos Propios Superpuestos (PPS).....	19
3.3.1 Losas prefabricadas	19
3.3.2 Capa de compresión colada en sitio.....	20
3.3.3 Losa maciza colada en sitio	20
3.3.4 Muros de tabique rojo recocado	20
3.4 Pesos Permanentes Adicionales Superpuestos (PPAS)	21
3.4.1 Tinacos	22
3.4.2 Plafón.....	22

3.4.3	Agua para alberca	22
3.4.4	Acabados en azotea	22
3.4.5	Acabados en entepiso	23
3.4.6	Acabados en gimnasio.....	23
3.4.7	Acabados en roofgarden	23
3.4.8	Acabados en estacionamiento.....	23
3.5	Resumen de PPS y PPAS.....	23
3.5.1	Resumen de Pesos Propios Superpuestos (PPS).....	24
3.5.2	Resumen de los Pesos Permanentes Adicionales Superpuestos PPAS.....	24
3.6	Cargas muertas en losas según el destino.....	24
3.7	Cargas de muros apoyados directamente sobre losas	25
3.8	Cargas muertas finales.....	25
CAPÍTULO 4 MODELO POR COMPUTADORA.....		26
4.1	Programa comercial ETABS.....	27
4.2	Modelo matemático	28
4.3	Modelo de las Torres T1 y T2	28
4.3.1	Torre T1	28
4.3.2	Torre T2	29
4.4	Modelo de la Torre T3	29
4.5	Modelo del complejo residencial Torres Arts.....	30
4.6	Datos ingresados y datos calculados	31
4.6.1	Datos ingresados manualmente.....	31
4.6.2	Datos calculados automáticamente.....	31
4.7	Secciones.....	32
4.7.1	Secciones de columnas	32
4.7.2	Secciones de trabes	32
CAPÍTULO 5 ANÁLISIS SÍSMICO.....		33
5.1	Introducción.....	34
5.2	Método utilizado.....	34
5.3	Espectro de respuesta y de diseño en sitio.....	34
5.4	Diafragmas.....	35
5.5	Masas laterales.....	36
5.6	Rigideces de entepiso.....	38

5.6.1	Rigideces de entrepiso sin el efecto del agrietamiento	38
5.6.2	Rigideces de entrepiso con el efecto del agrietamiento	39
5.7	Análisis modal.....	40
5.7.1	Modos de vibrar sin el efecto de agrietamiento	40
5.7.2	Modos de vibrar con el efecto de agrietamiento.....	42
5.8	Método de combinación modal	44
5.8.1	Cortantes sísmicos sin el efecto de agrietamiento.....	45
5.8.2	Cortantes sísmicos con el efecto de agrietamiento.....	47
5.9	Fuerzas sísmicas	49
5.9.1	Fuerzas sísmicas sin el efecto de agrietamiento.....	49
5.9.2	Fuerzas sísmicas con el efecto de agrietamiento.....	50
5.10	Reducción de fuerzas sísmicas	50
5.11	Factor de comportamiento sísmico.....	50
5.12	Condiciones de regularidad.....	51
5.12.1	Requisitos incumplidos en torres 1 y 2.....	52
5.12.2	Requisitos incumplidos en torre 3.....	52
5.13	Estructura irregular.....	52
5.14	Estructura fuertemente irregular	52
5.15	Conclusión sobre las condiciones de regularidad por torre	52
5.16	Corrección por irregularidad.....	52
5.17	Fuerzas sísmicas reducidas.....	52
5.17.1	Fuerzas sísmicas reducidas sin el efecto de agrietamiento	53
5.17.2	Fuerzas sísmicas reducidas con el efecto de agrietamiento	53
5.18	Cortante basal mínimo.....	54
5.19	Peso total de cada edificio	55
5.20	Ordenadas espectrales	55
5.21	Cálculo del cortante basal mínimo.....	56
5.22	Factor de corrección.....	56
5.23	Fuerzas sísmicas finales	57
5.24	Combinaciones de diseño por sismo	63
5.25	Revisión de desplazamientos laterales.....	64
5.25.1	Desplazamientos máximos en Torre T1 sin el efecto de agrietamiento	65
5.25.2	Desplazamientos máximos en Torre T2 sin el efecto de agrietamiento	66

5.25.3	Desplazamientos máximos en Torre T3 sin el efecto de agrietamiento	67
5.25.4	Desplazamientos máximos en Torre T1 con el efecto de agrietamiento	68
5.25.5	Desplazamientos máximos en Torre T2 con el efecto de agrietamiento	69
5.25.6	Desplazamientos máximos en Torre T3 con el efecto de agrietamiento	70
5.26	Resumen de desplazamientos laterales.....	71
5.27	Revisión de drifts o derivas	71
5.27.1	Drift máximos en Torre T1 sin el efecto de agrietamiento	72
5.27.2	Drift máximos en Torre T2 sin el efecto de agrietamiento	73
5.27.3	Drift máximos en Torre T3 sin el efecto de agrietamiento	74
5.27.4	Drift máximos en Torre T1 con el efecto de agrietamiento	75
5.27.5	Drift máximos en Torre T2 con el efecto de agrietamiento	76
5.27.6	Drift máximos en Torre T3 con el efecto de agrietamiento	77
5.28	Resumen de drifts.....	78
5.29	Revisión por volteo	78
5.29.1	Revisión por volteo Torre T1 sin efectos de agrietamiento	79
5.29.2	Revisión por volteo Torre T2 sin efectos de agrietamiento	80
5.29.3	Revisión por volteo Torre T3 sin efectos de agrietamiento	81
5.29.4	Revisión por volteo Torre T1 con efectos de agrietamiento	82
5.29.5	Revisión por volteo Torre T2 con efectos de agrietamiento	83
5.29.6	Revisión por volteo Torre T3 con efectos de agrietamiento	84
5.30	Resumen de la revisión por volteo	85
5.31	Conclusión sobre el análisis sísmico.....	85
CAPÍTULO 6 PROPUESTA DE CIMENTACIÓN Y MODELO POR COMPUTADORA.....		86
6.1	Software empleado	87
6.2	Modelo matemático	87
6.3	Planta de cimentación propuesta	88
6.4	Propuesta del estudio de mecánica de suelos	88
6.5	Modelo por computadora de la cimentación	89
6.6	Datos ingresados y datos calculados	89
6.6.1	Datos importados.....	89
6.6.2	Datos ingresados manualmente.....	90
6.6.3	Datos calculados automáticamente	90
6.7	Secciones utilizadas	90

CAPÍTULO 7 ANÁLISIS DE LA CIMENTACIÓN.....	91
7.1 Introducción.....	92
7.2 Método de análisis utilizado	92
7.3 Presión en el suelo	92
7.3.1 Presión por cargas de gravedad para la combinación CombDG.....	92
7.3.2 Presión por cargas de sismo para la combinación CombDS1-1.....	93
7.3.3 Presión por cargas de sismo para la combinación CombDS2-3.....	93
7.3.4 Presión por cargas de sismo para la combinación CombDS3-5.....	94
7.3.5 Presión por cargas de sismo para la combinación CombDS4-6.....	94
7.4 Resumen de presiones máximas.....	95
7.5 Asentamientos.....	95
7.5.1 Asentamientos por cargas de gravedad para la combinación CombDG.....	95
7.5.2 Asentamientos por cargas de sismo para la combinación CombDS1-1.....	96
7.5.3 Asentamientos por cargas de sismo para la combinación CombDS2-3.....	96
7.5.4 Asentamientos por cargas de sismo para la combinación CombDS3-5.....	97
7.5.5 Asentamientos por cargas de sismo para la combinación CombDS4-6.....	97
7.6 Resumen de asentamientos máximos.....	98
7.7 Conclusión sobre el análisis de la cimentación	98
CONSIDERACIONES FINALES	99
BIBLIOGRAFÍA.....	100

Resumen

Este es un trabajo que pretende corroborar los conocimientos adquiridos como ingeniero civil dedicado principalmente al cálculo estructural, a partir de los estudios realizados en la Maestría en Ingeniería Estructural. Se trata de un modelo por computadora del edificio Torres Arts ubicado en la ciudad de Puebla y que consiste principalmente de dos torres de 23 niveles, cada una con 72 departamentos y 3 penthouses, además de un tercer edificio de 5 niveles destinado a área de estacionamiento y amenidades. Se busca demostrar que el modelo desarrollado, proporciona una respuesta que describe con gran precisión el comportamiento dinámico del edificio, con la finalidad de contar con la información suficiente para poder justificar la cimentación más apropiada.

Se tuvo la necesidad de la aplicación de temas como: análisis estructural de elementos barra y elementos finitos, dinámica estructural, ingeniería sísmica, y diseño de elementos de concreto. Otro tema que no se ve en las aulas y que también fue muy necesario, fue contar con el conocimiento sobre el uso de software especializado en estructuras. Para el desarrollo de este proyecto, los programas empleados fueron ETABS (Extended Three Dimensional Analysis of Building Systems) y SAFE (Slab Analysis by the Finite Element Method), los cuales resuelven satisfactoriamente gran parte de los proyectos destinados a edificaciones.

Finalmente, se busca dejar un ejemplo de ingeniería estructural para quienes están interesados o solo desean conocer algo de lo que desarrollan los ingenieros civiles y más en específico los ingenieros estructurales.

Introducción

Dado que no existe un formato definido para realizar este trabajo, se trató de efectuarlo de manera muy similar a una memoria de cálculo, donde se presentan datos sobresalientes como: cargas, fuerzas sísmicas, desplazamientos, drifts, presiones y asentamientos, entre otros.

Muchos de los datos mencionados son obtenidos directamente de los programas empleados, y quisiera mencionar que no fue fácil su uso y sobretodo su aprendizaje. Mi deseo por aprender a utilizar un software de análisis estructural surge desde los primeros años de la licenciatura en Ing. Civil, es ahí cuando conocí que existía un programa llamado SAP2000, y desde la materia *Estructuras Isostáticas* es que aprendí a revisar los ejercicios del curso. En *Estructuras Hiperestáticas II* recuerdo llegar a resolver a mano estructuras hasta de 6 niveles y 3 crujiás en unas 10 horas por el método de Kani, y posteriormente las resolvía en unos 5 minutos con SAP2000. De esta experiencia, aprendí que no existe una satisfacción auténtica al utilizar un programa, si no se tiene resuelto el ejercicio hecho a mano, y aseguro que entre más difícil y tardado sea el ejercicio a mano, más se aprende a valorar lo que te brinda un programa de computo, sin embargo, si el que se tarda 5 minutos entrega resultados erróneos, es preferible esperar 9 hrs 55 minutos más y tener los correctos.

Actualmente he impartido el curso básico: “*SAP2000 Aplicado al Análisis Estructural*” en 10 ocasiones en el departamento de Educación Continua de nuestra Facultad, de las cuales 9 ocasiones ha sido dirigido a nivel licenciatura y una a nivel maestría. Refiriéndome al nivel licenciatura, siembre busco encaminar a los alumnos al uso responsable del programa, y redundando en lo comentado anteriormente, creo que esto se logra bajo el respaldo de ejemplos numéricos desarrollados por ellos mismos de forma manual.

Creí conveniente realizar estos comentarios debido a que prácticamente todo lo desarrollado en este documento radica en el uso de software de ingeniería estructural. Por último y volviendo a lo que pretendo en primer párrafo de esta introducción, aclaro que el reporte que brinda el programa ETABS sobre el modelo que se realizó, consta de 13707 hojas por lo que aquí pretendo mostrar un trabajo en síntesis, claridad y precisión, y no uno donde predomine la cantidad.

Antecedentes

El proyecto de ingeniería estructural y de construcción para el *Complejo Residencial Torres Arts* fue asignado a la empresa ITISA (Impulsora Tlaxcalteca de Industrias S.A. de C.V), y dadas las características y magnitud del proyecto, los inversionistas determinaron se tuviese una oficina de revisión y aseguramiento estructural, la cual fue encargada a la firma Structura IP (Structura, Ingeniería y Proyecto) cuyo representante es el M.I. Rafael Ramírez Álvarez y en la cual me desempeñe como calculista estructural durante siete años. Para el cumplimiento de las tareas asignadas, se decidió que la forma más eficaz para revisar y asegurar un proyecto de tal magnitud, sería desarrollando un modelo estructural por computadora alternativo al desarrollado por ITISA.

Los ingenieros estructurales de la empresa ITISA modelaron el complejo residencial en el programa ECOgcW, y la empresa Structura IP modeló en dos programas: Multiframe 4D y ETABS, donde a mí me fue asignada la modelación en este último. Debo reconocer a los ingenieros de ITISA por la disposición a modelar en algunas ocasiones prácticamente uno al lado del otro, ellos en ECOgcW y yo en ETABS. Esta fue una experiencia que me gustaría volver a vivir porque se aclararon muchos factores, omisiones, errores, y formas distintas en que trabajan los programas, cuando algo difiere: ¿quién está bien?, ¿quién está mal?, ¿ambos estamos mal? o ¿los programas están mal?; son las preguntas que nos hacíamos muchas veces a lo largo del día.

Esta forma de trabajo llevó de manera rápida a garantizar las condiciones de seguridad y servicio que demanda el Complejo Residencial Torres Arts, teniendo un proyecto estructural revisado y asegurado fielmente mediante la metodología adoptada.

Objetivo

Presentar evidencia documentada que respalda la experiencia profesional adquirida a partir de cursar la Maestría en Ingeniería Estructural.

CAPÍTULO 1

PROYECTO ARQUITECTÓNICO

1.1 Ubicación

El complejo residencial Torres Arts se encuentra ubicado en la ciudad de San Andrés Cholula, Puebla, México. La dirección es Boulevard Cúmulo de Virgo 1052 en la Reserva Territorial Atlixcayotl. Se encuentra rodeado de algunos de los principales centros comerciales, así como de restaurantes, gimnasios, colegios, universidades, parques ecológicos y hospitales.



Figura 1: Croquis de localización

1.2 Características del proyecto

El proyecto nace en un predio de 3890 m² y se compone principalmente de dos torres de 23 niveles, cada torre cuenta con 72 departamentos y 3 penthouses, resultando en un total de 144 departamentos y 6 penthouses. Cada torre alcanza una altura de 78.4 m y su base es de aproximadamente 31.5 m por 17.5 m, resultando en un área en la base de 551.25 m². Los dos primeros niveles son subterráneos y están destinados a estacionamiento y roofgarden.

Entre las dos torres, se edifica un tercer edificio de 5 niveles destinado a amenidades, el cual cuenta con gimnasio, alberca semi olímpica, área de asoleaderos, cancha de tenis, jacuzzis y SPA. De igual manera que las torres principales, sus dos primeros niveles son subterráneos destinados a área de estacionamiento y roofgarden.

Es propiedad de Desarrollos Inmobiliarios Aqua Towers S.A. de C.V. y el proyecto arquitectónico es del despacho 3A+A.

1.3 Departamentos

Las características en cuanto a espacio y distribución es la siguiente:

Departamento 128 m²: 2 recamaras, 2 ½ baños, sala comedor y área de servicio.

Departamento 133 m²: 2 recamaras, 3 ½ baños, sala comedor, terraza y área de servicio.

Departamento 143 m²: 2 recamaras, 2 ½ baños, sala comedor, terraza y área de servicio.

Departamento 149 m²: 2 recamaras, 2 ½ baños, sala comedor y área de servicio.

Departamento 190 m²: 3 recamaras, 4 ½ baños, sala comedor, terraza y área de servicio.

Departamento 194 m²: 3 recamaras, 3 ½ baños, sala comedor, terraza y área de servicio.

Departamento 331 m²: 3 recamaras, 6 ½ baños, sala comedor y área de servicio.

Departamento 411 m²: 4 recamaras, 6 baños, sala comedor y área de servicio.

Departamento 412 m²: 4 recamaras, 6 ½ baños, sala comedor y área de servicio.

Se muestra a distribución de los departamentos tipo I y G de 411 m² y 412 m², respectivamente.



PLANTA ARQUITECTÓNICA
DEPARTAMENTO TIPO I



Figura 2: Distribución del departamento Tipo I



PLANTA ARQUITECTÓNICA
DEPARTAMENTO TIPO G

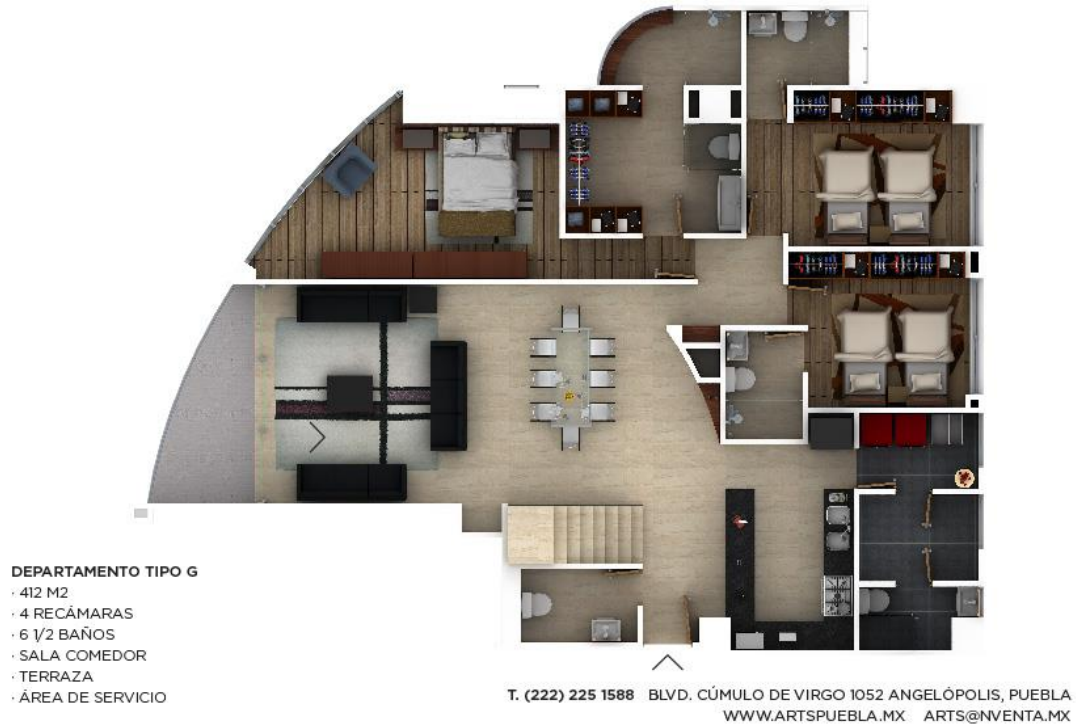


Figura 3: Distribución del departamento Tipo G

1.4 Planta baja

La planta baja está adecuadamente diseñada con dos carriles para circulación vehicular, esto con la finalidad de proporcionar un cómodo acceso a los residentes hacia las zonas de estacionamiento subterráneo. En la parte exterior del complejo residencial se encuentra la zona de estacionamiento para visitantes.



Figura 4: Planta baja general

1.5 Fachadas

En la fachada arquitectónica frontal de ambas torres, se observan balcones laterales y frontales, además se muestra el edificio de amenities y los dos niveles subterráneos.



Figura 5: Fachada frontal

En la fachada lateral se observa un desfase en la posición de las torres debido a la irregularidad del terreno (ver Figura 4), así como balcones en la parte posterior.

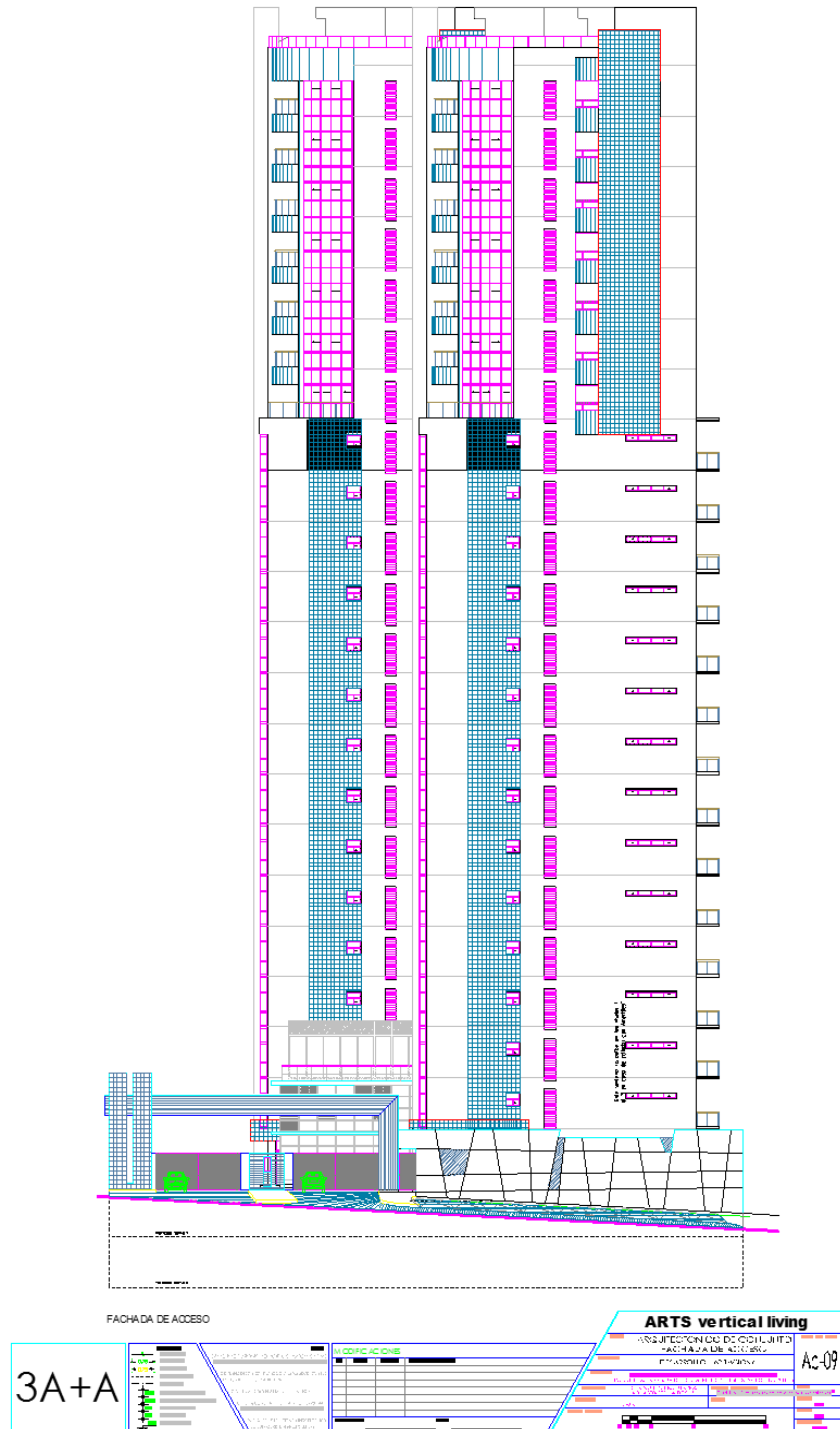


Figura 6: Fachada lateral

1.6 Solución estructural en base al proyecto arquitectónico

Debido a la simetría de las torres principales, se plantea un edificio reticular de concreto reforzado con la siguiente distribución de columnas y trabes. La estructuración es constante desde la base hasta el piso 23, excepto por las dos columnas de esquina inferiores de acuerdo a la planta, que solo llegan hasta el piso 17 como se muestra en la Figura 7.

Todos los sistemas de muros serán divisorios y las losas prefabricadas de tipo spancrete.

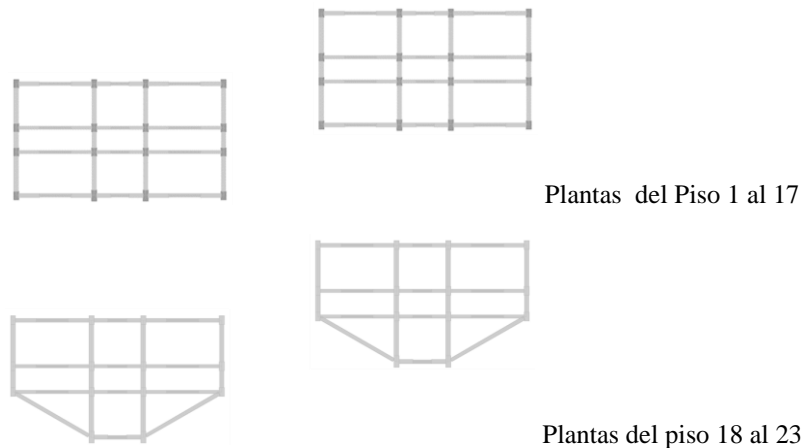


Figura 7: Estructuración principal de columnas y trabes

1.7 Conclusión sobre el proyecto arquitectónico

Sobre el proyecto arquitectónico y sobre lo plasmado en los planos, no cabe duda que se muestra una gran calidad y esfuerzo por facilitar a la interpretación de los requerimientos proyectados, esto ayuda a que el ingeniero estructural se fije como meta atender las necesidades planteadas y tratar de no alterar el proyecto que probablemente ya convenció y enamoró al cliente. Conforme se va ganando experiencia en el diseño estructural, uno va aprendiendo a valorar y tratar de respetar al máximo los proyectos que los arquitectos nos proporcionan, ya que el proyecto dominante comercialmente es el arquitectónico que probablemente ya se vendió y no quiere afectarse o cambiarse. Por otra parte, existen casos donde el proyecto arquitectónico y el estructural no se dejan acoplar y se vuelve un problema que resulta en consecuencias que elevan el costo, el tiempo y solo crean un ambiente de incertidumbre sobre la solución, es aquí cuando se debe tener una buena comunicación entre ambos proyectistas y se debe buscar un equilibrio entre el proyecto arquitectónico y su solución estructural.

CAPÍTULO 2

BASES PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL

2.1 Clasificación de la estructura

De lo establecido en el artículo 995 del Código Reglamentario del Municipio de Puebla COREMUN, este proyecto se clasifica como una edificación destinada a vivienda, y está catalogada dentro del Grupo B.

2.2 Factores de carga

De acuerdo a su clasificación, esta estructura requiere de un grado de seguridad intermedio y por lo que se emplearon los siguientes factores de carga:

$F_C = 1.4$	Para la combinación de acciones permanentes y variables.
$F_C = 1.1$	Para la combinación de acciones permanentes, variables y accidentales.
$F_C = 1.0$	Para la revisión de los estados límite de servicio.
$F_C = 0.9$	Para acciones o fuerzas internas cuyo efecto sea favorable a la resistencia o estabilidad de la estructura.

2.3 Factores de resistencia

Los factores de resistencia se toman de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal del año 2004.

$F_R = 0.9$	Para flexión.
$F_R = 0.8$	Para cortante y torsión
$F_R = 0.7$	Para transmisión de flexión y cortante en losas o zapatas.
$F_R = 0.7$	Para columnas sometidas a flexocompresión.
$F_R = 0.7$	Para aplastamiento

Al multiplicar la resistencia nominal por el factor de resistencia que aplique, se obtiene la resistencia reducida o resistencia de diseño.

2.4 Cargas muertas

Se consideraron como cargas muertas los pesos de todos los elementos constructivos que no varían sustancialmente con el tiempo, estos son: el peso propio de los elementos estructurales

y los muros y losas con sus respectivos acabados. Así mismo, se consideraron las cargas que ocupan una posición permanente y de relativa importancia, como las generadas por plafones falsos y tinacos.

Para la evaluación de estas cargas, se emplearon los pesos volumétricos promedio de los materiales por utilizar, así como los valores establecidos en los manuales de los respectivos fabricantes.

2.5 Cargas vivas

Se ocuparon las establecidas en las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural, y se determinaron según el uso y ocupación de la edificación, es decir, según su destino.

Destino: Azotea con pendiente < 5%:

$$W = 15 \quad \text{Kg/cm}^2$$

$$W_a = 70 \quad \text{Kg/cm}^2$$

$$W_m = 100 \quad \text{Kg/cm}^2$$

Destino: Departamentos:

$$W = 70 \quad \text{Kg/cm}^2$$

$$W_a = 90 \quad \text{Kg/cm}^2$$

$$W_m = 170 \quad \text{Kg/cm}^2$$

Destino: Estacionamiento:

$$W = 40 \quad \text{Kg/cm}^2$$

$$W_a = 100 \quad \text{Kg/cm}^2$$

$$W_m = 250 \quad \text{Kg/cm}^2$$

Destino: Gimnasio:

$$W = 40 \quad \text{Kg/cm}^2$$

$$W_a = 250 \quad \text{Kg/cm}^2$$

$$W_m = 350 \quad \text{Kg/cm}^2$$

Se justificaron racionalmente los valores para los destinos no mencionados en estas normas como: Roofgarden y Alberca.

Destino: Roofgarden

$$W = 40 \quad \text{Kg/cm}^2$$

$$W_a = 250 \quad \text{Kg/cm}^2$$

$$W_m = 350 \quad \text{Kg/cm}^2$$

Se emplearon cargas como las especificadas para lugares de reunión, ya que es una zona que pudiese ser ocupada como de convivencia familiar o de evento social.

Destino: Alberca

$$W = 0 \quad \text{Kg/cm}^2$$

$$W_a = 0 \quad \text{Kg/cm}^2$$

$$W_m = 0 \quad \text{Kg/cm}^2$$

En el caso de la alberca se determina que el caso más crítico es cuando ésta en su totalidad ocupada por agua, este caso fue considerado como carga muerta en el análisis, por lo que las cargas vivas se tomaron como nulas.

De igual manera que en el caso de la alberca, aunque para un caso de naturaleza y estudio distinto, en la revisión por volteo las cargas vivas fueron consideradas como nulas.

2.6 Materiales

Los principales materiales empleados en el proyecto son los siguientes:

a) Concreto

Se requirió de un concreto clase 1 con agregado grueso calizo y un módulo de elasticidad $E_c = 15000 \sqrt{f'_c}$. Se manejaron dos valores de resistencia a la compresión: $f'_c = 450 \text{ Kg/cm}^2$ para la cimentación y los primeros 8 niveles; y $f'_c = 350 \text{ Kg/cm}^2$ para el resto del edificio. El peso volumétrico se consideró como $\gamma_c = 2.4 \text{ T/m}^3$.

b) Acero

El acero es de alta resistencia con un esfuerzo de fluencia $f_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$ y se consideró un módulo de elasticidad $E_s = 2000000 \text{ Kg/cm}^2$.

c) Mampostería de tabique rojo recocido

La mampostería fue empleada únicamente para la construcción de muros divisorios por lo que no fue considerada su resistencia.

2.7 Mecánica de suelos

La mecánica de suelos fue desarrollada por la empresa Suelos y Cimentaciones S.A. y se realizaron 5 sondeos a profundidades desde 25 m hasta 35 m, además de dos pozos a cielo abierto (Figura 8). Se proporciona una carga admisible mínima de 57.69 T/m^2 y se da una propuesta de cimentación a base de zapatas corridas en una dirección (Figura 9) a una profundidad de 3.75 m.

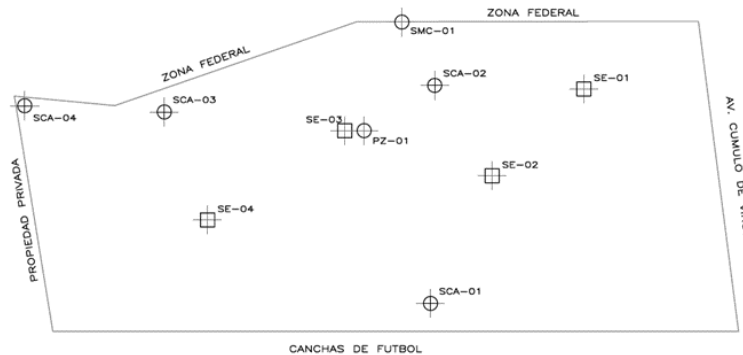


Figura 8: Ubicación de sondeos para el estudio de mecánica de suelos

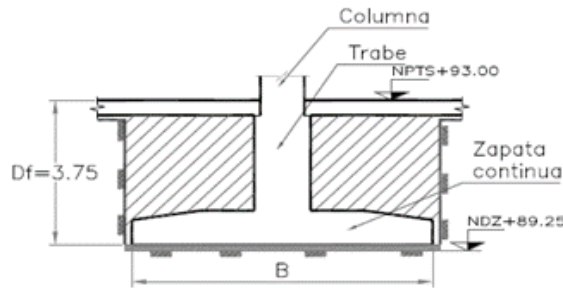


Figura 9: Propuesta esquemática para cimentación

A continuación se presentan las tablas con la capacidad de carga admisible, incremento de esfuerzos debidos a acciones sísmicas, módulos de reacción y de asentamientos elásticos; así como un esquema general de la cimentación del conjunto en la Figura 10.

ZAPATA No.	EJE	B m	L m	A m ²	Df m	γ t/m ³	Pv t/m ²	ϕ °	Nq	Ny	Fr	qa t/m ²	Q t	Q Fc / A t/m ²
1	1c	5.10	29.65	151.22	3.75	1.70	6.38	24.32	9.88	9.20	0.70	77.57	5160.55	47.78
2	2c	5.10	32.76	167.07	3.75	1.70	6.38	24.32	9.88	9.26	0.70	77.44	7042.66	59.02
3	3c	5.10	35.55	181.31	3.75	1.70	6.38	24.32	9.88	9.31	0.70	77.34	7268.69	56.13
4	4c	5.10	38.04	194.00	3.75	1.70	6.38	24.32	9.88	9.35	0.70	77.26	5126.15	36.99
5	4	2.00	40.63	81.26	3.75	1.70	6.38	24.32	9.88	9.68	0.70	58.72	1384.24	23.85
6	1c	5.40	41.05	221.67	3.75	1.70	6.38	24.32	9.88	9.36	0.70	78.91	5363.42	33.87
7	2c	6.40	41.67	266.69	3.75	1.70	6.38	24.32	9.88	9.27	0.70	84.59	8230.19	43.21
8	3c	6.40	41.77	267.34	3.75	1.70	6.38	24.32	9.88	9.27	0.70	84.59	7207.40	37.74
9	4c	5.40	41.09	221.89	3.75	1.70	6.38	24.32	9.88	9.36	0.70	78.91	6203.28	39.14
10	4c'	1.50	9.32	13.98	3.75	1.70	6.38	24.32	9.88	9.24	0.70	57.69	132.39	13.26
11	Ac'	1.50	7.77	11.66	3.75	1.70	6.38	24.32	9.88	9.11	0.70	58.22	96.52	11.59

Tabla 1: Capacidad de carga admisible, cimentación a base de zapatas continuas

Mv =	76,855.09	t-m
lx =	1,103,514.86	m
ly =	197,519.78	m

Nodo No.	X m	Y m	AREA m ²	Qsis t	q _{máx} t/m ²	q _{min} t/m ²	qa t/m ²
1	44.18	6.38	40.95	1415.12	34.98	34.13	81.29
2	44.18	2.71	52.17	2236.39	43.20	42.53	80.19
3	44.18	13.56	58.09	1115.67	19.51	18.91	78.78
4	32.66	6.97	49.67	1924.49	39.00	38.48	79.89
5	32.42	2.87	51.05	2869.88	56.46	55.97	80.22
6	32.42	13.56	58.09	1711.44	29.68	29.24	79.78
7	24.81	8.37	63.70	2148.46	33.88	33.57	79.13
8	24.61	3.04	52.79	2855.91	54.29	53.92	80.86
9	24.63	13.73	56.36	1710.24	30.52	30.17	79.89
10	12.71	14.19	46.36	260.91	5.74	5.52	80.70
11	12.46	5.67	40.95	1254.76	30.76	30.52	81.29
12	12.47	2.75	44.98	2134.73	47.57	47.35	80.23
13	12.47	13.21	61.71	1085.00	17.67	17.50	79.57
14	5.01	15.18	24.72	337.87	13.76	13.58	60.45
15	4.98	5.07	15.74	299.03	19.13	18.87	61.86
16	4.98	2.79	15.74	291.37	18.64	18.38	61.86
17	4.98	12.99	25.06	350.45	14.07	13.90	60.41
18	2.52	17.58	45.52	1190.02	26.17	26.11	72.92
19	2.52	8.25	55.24	2344.05	42.45	42.41	81.82
20	2.52	1.15	46.17	951.12	20.62	20.58	82.58
21	2.52	12.34	74.74	469.38	6.30	6.26	80.81
22	14.67	17.59	54.02	2321.37	43.09	42.86	87.37
23	14.67	8.25	65.47	2902.94	44.43	44.25	86.91
24	14.67	1.15	54.72	1578.11	28.94	28.73	87.55
25	14.67	12.34	88.58	800.42	9.10	8.97	86.13
26	22.47	17.59	54.02	1603.82	29.86	29.52	87.36
27	22.47	8.25	65.47	3011.89	46.14	45.87	86.91
28	22.47	1.14	54.72	1569.02	28.83	28.51	87.55
29	22.47	12.34	88.58	472.87	5.44	5.24	86.13
30	34.27	17.60	45.74	1222.32	27.02	26.42	82.62
31	34.27	8.25	55.24	2339.63	42.60	42.11	81.82
32	34.27	1.15	46.17	1214.88	26.60	26.02	82.58
33	34.27	12.34	74.74	953.59	12.94	12.58	80.81
34	39.47	17.18	13.98	122.30	9.87	7.62	68.15
35	40.88	11.77	11.66	89.16	9.04	6.26	58.22

Tabla 2: Incrementos de esfuerzos debidos al sismo

ZAPATA No.	B m	L m	CLASIFICACION	ks _v kg/cm ³
1	5.10	29.65	Limo arenoso café rojizo	1.0457
2	5.10	31.14	Limo arenoso café rojizo	1.0457
3	5.10	33.89	Limo arenoso café rojizo	1.0457
4	5.10	38.04	Limo arenoso café rojizo	1.0457
5	2.00	40.63	Limo arenoso café rojizo	2.6667
6	5.40	41.05	Limo arenoso café rojizo	0.9876
7	6.40	41.07	Limo arenoso café rojizo	0.8333
8	6.40	41.08	Limo arenoso café rojizo	0.8333
9	5.40	41.09	Limo arenoso café rojizo	0.9876
10	1.50	9.32	Limo arenoso café rojizo	3.5555
11	1.50	7.77	Limo arenoso café rojizo	3.5555

Tabla 3: Módulos de reacción según el ancho de la zapata corrida

B m	L m	A m ²	Q t	ASENTAMIENTOS	
				LATERAL cm	CENTRAL cm
5.10	29.65	151.22	4636.09	3.22	6.45
5.10	31.14	158.81	6326.81	4.25	8.50
5.10	33.89	172.84	6529.86	4.13	8.25
5.10	38.04	194.00	4605.11	2.68	5.35
2.00	40.63	81.26	1243.55	0.86	1.72
5.40	41.05	221.67	4818.26	2.61	5.22
6.40	41.07	262.85	7393.63	3.82	7.64
6.40	41.08	262.91	6474.81	3.34	6.69
5.40	41.09	221.89	5572.75	3.01	6.03
1.50	9.32	13.98	118.93	0.27	0.54
1.50	7.77	11.66	96.35	0.25	0.49

Tabla 4: Asentamientos elásticos

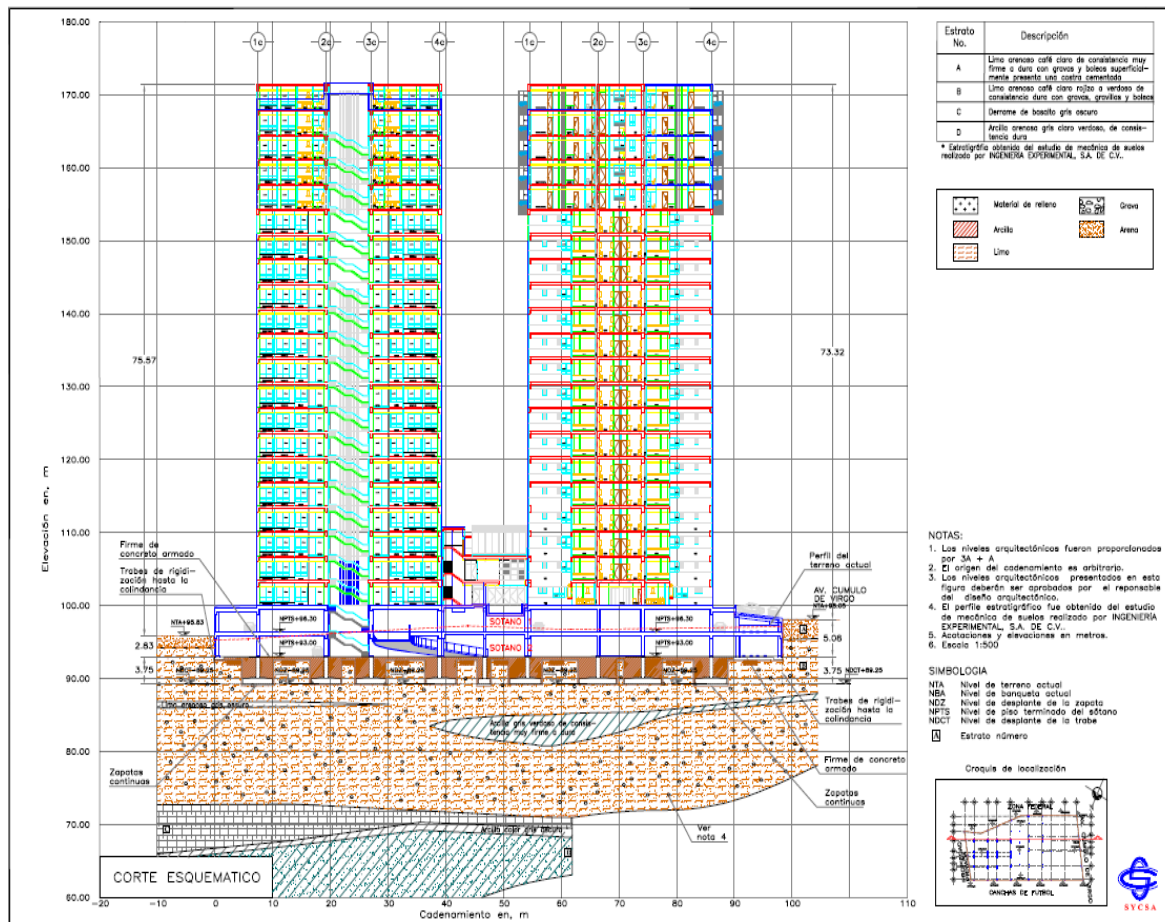


Figura 10: Corte esquemático de la cimentación propuesta

2.8 Coeficiente sísmico

De acuerdo a la información proporcionada por la empresa Seismo Control S.A. de C.V., empresa responsable de realizar un espectro de sitio, el coeficiente sísmico es $c = 0.22$.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE CARGAS

3.1 Clasificación de los pesos

En este capítulo se presentan los pesos de los principales elementos estructurales y no estructurales, con la finalidad de mostrar de manera ordenada y resumida las distintas cargas muertas del proyecto estructural. Por fines del manejo de la información, los pesos fueron catalogados como:

a) Pesos Propios (PP)

Son los evaluadas automáticamente por el programa ETABS®, y se obtienen directamente del modelo estructural. Para este proyecto, los pesos de los elementos que fueron calculados automáticamente por el programa son:

- Columnas
- Trabes

b) Pesos Propios Superpuestos (PPS)

Son los pesos propios de los elementos que se obtuvieron de los manuales de los fabricantes, o se calcularon en función de sus dimensiones y pesos volumétricos, estos elementos son:

- Losas prefabricadas
- Capa de compresión colada en sitio
- Losa maciza colada en sitio
- Muros

c) Pesos Permanentes Adicionales Superpuestos (PPAS)

Son los generados debido a los elementos no estructurales de peso considerable, que se pretenden colocar sobre los sistemas de losas, para este proyecto se consideraron los siguientes:

- Tinacos
- Plafón
- Agua para alberca
- Acabados en azotea
- Acabados en entresijos
- Acabados en gimnasio
- Acabados en roofgarden
- Acabados en estacionamiento

Es muy común cometer errores en el cálculo de los pesos y sobretodo en el ingreso de las cargas en los programas de análisis estructural, por lo que debe tenerse especial cuidado en diferenciar lo calculado por el software y lo calculado manualmente.

3.2 Pesos propios (PP)

Son calculados automáticamente por el programa y no se muestran en este documento.

3.3 Pesos Propios Superpuestos (PPS)

Los sistemas de losa están compuestos por el sistema prefabricado SPANCRETE® con una capa de compresión colada en sitio, además del sistema convencional de losa maciza. Los muros fueron fabricados artesanalmente.

3.3.1 Losas prefabricadas

El departamento técnico del sistema SPANCRETE® recomendó los siguientes espesores de losa en función del destino y de los mayores claros.

Peralte 15 cm

- a) Azotea
- b) Departamentos

Peralte 20 cm

- c) Gimnasio

Peralte 25 cm

- d) Roofgarden
- e) Estacionamiento

PROPIEDADES SPANCRETE®				
	PERALTE (cm)	PESO PROPIO (kg/m ²)	ÁREA (cm ²)	INERCIA (cm ⁴)
SPANCRETE® 15	15	243	1,213	30,424
SPANCRETE® 20	20	309	1,544	70,398
SPANCRETE® 25	25	383	1,915	135,161

Tabla 5: Peso propio de losas



Figura 11: Vista esquemática del sistema de losa

3.3.2 Capa de compresión colada en sitio

El sistema prefabricado de losa SPANCRETE® requiere de una capa de compresión de 5 cm colada en sitio (Figura 12), para asegurar el sistema a las trabes y cubrir las juntas entre los paneles. El valor de la carga se estimó a partir del peso volumétrico y del espesor de la losa.

a) Espesor de capa de compresión	5 cm
b) Peso volumétrico	2400 Kg/m ³
c) Peso final	120 Kg/m ²

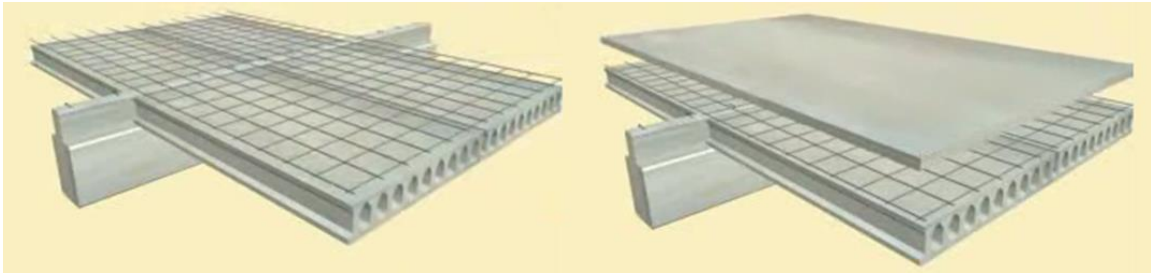


Figura 12: Vista esquemática de la capa de compresión colada en sitio

3.3.3 Losa maciza colada en sitio

La losa maciza fue contemplada para el destino de alberca, con la finalidad de garantizar un buen comportamiento ante humedad y filtraciones. En base al diseño, se requirió de una losa maciza de concreto reforzado de 20 cm de espesor, resultando en el siguiente peso:

a) Espesor de losa	20 cm
b) Peso volumétrico	2400 Kg/m ³
b) Peso final	480 Kg/m ²

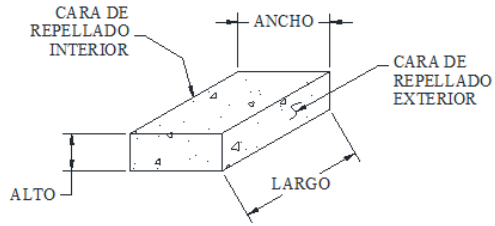
3.3.4 Muros de tabique rojo recocido

El peso de los muros se calculó con el siguiente formato y se presenta en unidades de kilogramos por metro lineal.

Muro exterior con repellado de mortero y yeso:

a) Tabique rojo recocido

Largo	24	cm
Alto	6	cm
Ancho	12	cm
Material	Tezontle	
Peso	2.4	Kg



b) Pesos volumétricos

Mortero	2000	Kg/m ³
Yeso	1800	Kg/m ³

e) Pesos finales

Por módulo	4.0	Kg/m ²
Por m ²	227.7	Kg/m ²

c) Junta de mortero

Espesor	1	cm
---------	---	----

f) Peso por metro lineal

d) Repellados

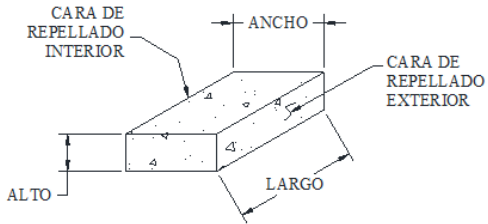
Exterior	Mortero	1.5	cm
Interior	Yeso	1.0	cm

	Alturas	Peso	Finales
	m	Kg/m	Kg/m
Sótano 1	3.3	751.3	755
Sótano 2	3.7	842.3	845
Entrepisos	3.4	774.0	775
Pretíl	1	227.7	230

Muro interior con doble repellado de yeso:

a) Tabique rojo recocido

Largo	24	cm
Alto	6	cm
Ancho	12	cm
Material	Tezontle	
Peso	2.4	Kg



b) Pesos volumétricos

Mortero	2000	Kg/m ³
Yeso	1800	Kg/m ³

e) Pesos finales

Por módulo	3.8	Kg/m ²
Por m ²	215.7	Kg/m ²

c) Junta de mortero

Espesor	1	cm
---------	---	----

f) Peso por metro lineal

d) Repellados

Exterior	Yeso	1.0	cm
Interior	Yeso	1.0	cm

	Alturas	Peso	Finales
	m	Kg/m	Kg/m
Sótano 1	3.3	711.7	715
Sótano 2	3.7	797.9	800
Entrepisos	3.4	733.2	735
Pretíl	1	215.7	220

3.4 Pesos Permanentes Adicionales Superpuestos (PPAS)

Para su evaluación se utilizaron pesos volumétricos promedio, valores según catálogos de fabricantes, incrementos por reglamentación y solicitudes según el proyecto arquitectónico.

3.4.1 Tinacos

Los responsables del proyecto de instalaciones hidráulicas solicitaron considerar una carga adicional de 300 Kg/m² en azotea para contemplar de manera preliminar el peso de los tinacos.

3.4.2 Plafón

Se utilizó plafón falso para fines estéticos y acústicos de marca USG ® con medidas 2' x 2' x 3/4' y con un peso por metro cuadrado igual a 7.13 Kg/m², éste peso incluye los elementos de instalación.



Figura 13: Imagen del tipo de plafón considerado

3.4.3 Agua para alberca

La alberca semi olímpica tiene una profundidad de 1.2 m por lo que se considera un peso adicional debido al agua de 1200 Kg/m² que corresponde al caso más desfavorable.

3.4.4 Acabados en azotea

El peso de los acabados de azotea se calculó con el siguiente formato y se presenta en unidades de kilogramos por metro cuadrado.

		Espesor cm	Peso Vol Kg/m ³	Peso/m ² Kg/m ²
Estimados	Mortero	1.5	2000	30
	Relleno	7	1100	77
Catálogos	Loseta antiderrapante			45.70
	Plafon			7.13
Reglamento				40
Total				199.83 Kg/m ²

3.4.5 Acabados en entrepiso

El peso de los acabados de los entrepisos que corresponde a los departamentos, se calculó con el siguiente formato y se presenta en unidades de kilogramos por metro cuadrado.

		Espesor cm	Peso Vol Kg/m ³	Peso/m ² Kg/m ²
Estimados	Mortero	1.5	2000	30
Catálogos	Loseta			35.30
	Plafon			7.13
Reglamento				40
Total				112.43 Kg/m ²

3.4.6 Acabados en gimnasio

El peso de los acabados de la zona de gimnasio es el mismo que el calculado anteriormente para para entrepisos.

3.4.7 Acabados en roofgarden

El peso de los acabados para la zona de roofgarden se calculó con el siguiente formato y se presenta en unidades de kilogramos por metro cuadrado.

		Espesor cm	Peso Vol Kg/m ³	Peso Kg/m ²
Estimados	Tierra	20	1500	300
	Relleno	40	1100	440
Reglamento				0
Total				740.00 Kg/m ²

3.4.8 Acabados en estacionamiento

El estacionamiento únicamente presenta un incremento por la capa de compresión de 5 cm colada en sitio, es decir, 120 Kg/m².

3.5 Resumen de PPS y PPAS

Se muestra un resumen del cálculo de estos pesos

3.5.1 Resumen de Pesos Propios Superpuestos (PPS)

a) Losas

SPANCRETE ® 15	243 Kg/m ²	(a)
SPANCRETE ® 20	309 Kg/m ²	(b)
SPANCRETE ® 25	383 Kg/m ²	(c)
Capa de compresión colada en sitio	120 Kg/m ²	(d)
Maciza 20 cm	480 Kg/m ²	(e)

b) Muros

Exteriores		Interiores	
h = 3.3 m	755 Kg/m	h = 3.3 m	715 Kg/m
h = 3.7 m	845 Kg/m	h = 3.7 m	800 Kg/m
h = 3.4 m	775 Kg/m	h = 3.4 m	735 Kg/m
h = 1.0 m	230 Kg/m	h = 1.0 m	220 Kg/m

3.5.2 Resumen de los Pesos Permanentes Adicionales Superpuestos PPAS

Tinacos	300 Kg/m ²	(f)
Plafón	7.13 Kg/m ²	(g)
Agua para alberca	1200 Kg/m ²	(h)
Acabados en azotea	199.83 Kg/m ²	(i)
Acabados en entrepiso	112.43 Kg/m ²	(j)
Acabados en gimnasio	112.43 Kg/m ²	(k)
Acabados en roofgarden	740 Kg/m ²	(l)
Acabados en estacionamiento	120 Kg/m ²	(m)

Se asignó a cada valor una letra entre paréntesis “()” para ubicarlo fácilmente. El peso del plafón ya está incluido en los acabados de azotea, entrepiso y gimnasio como se muestra en el análisis de pesos.

3.6 Cargas muertas en losas según el destino

Las cargas muertas para colocar en los sistemas de losas se obtuvieron de la sumatoria del Peso Propio Superpuesto (PPS) y el Peso Permanente Adicional Superpuesto (PPAS), es decir:

$$\text{Carga muerta (CM)} = \text{PPS} + \text{PPAS}$$

	(a)	(d)	(i)	(f)	SUMA
CM _{azotea}	243	120	199.83	300	862.83 Kg/m ²
* CM _{departamentos}	243	120	112.43		475.43 Kg/m ²
CM _{gimnasio}	309	120	112.43		541.43 Kg/m ²
CM _{roofgarden}	383	120	740		1243 Kg/m ²
CM _{estacionamiento}	383	120	120		623 Kg/m ²
CM _{alberca}	480	1200			1680 Kg/m ²

*La carga mostrada aún no es la definitiva ya que falta incrementar el peso de los muros apoyados directamente sobre la losa.

3.7 Cargas de muros apoyados directamente sobre losas

Los efectos de los muros apoyados directamente sobre la losa fueron considerados como cargas distribuidas, esto aplicando la tabla 6.2 de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto. De los análisis considerados según la distribución arquitectónica en los departamentos con mayor densidad de muros, la carga más desfavorable resultó en 77 Kg/m². Por fines prácticos se sumó esta carga a todos los tableros con distribución similar de muros, los cuales son únicamente los entresijos de departamentos, por lo tanto se tiene:

$$CM_{\text{departamentos}} = 552.43 \text{ Kg/m}^2$$

3.8 Cargas muertas finales

Las cargas muertas finales de este proyecto son:

CM _{azotea}	865 Kg/m ²
CM _{departamentos}	555 Kg/m ²
CM _{gimnasio}	545 Kg/m ²
CM _{roofgarden}	1245 Kg/m ²
CM _{estacionamiento}	625 Kg/m ²
CM _{alberca}	1680 Kg/m ²

CAPÍTULO 4

MODELO POR COMPUTADORA

4.1 Programa comercial ETABS

De acuerdo a sus siglas en inglés, ETABS significa: Extended Three Dimensional Analysis of Building Systems, que se traduce como Análisis Tridimensional Extendido de Sistemas de Edificaciones. Es un paquete innovador y revolucionario de software integrado para el diseño estructural de edificios, y es producto de cerca de 40 años de investigación y desarrollo continuo, que brinda una herramienta confiable, sofisticada, versátil y fácil de usar para desarrollar específicamente la construcción de estructuras comerciales y residenciales de varios pisos.

ETABS pertenece a la familia de programas desarrollados por la compañía estadounidense Computers and Structures, Inc. (CSI) fundada en 1975 y la cual es reconocida mundialmente por ser la empresa líder y pionera en herramientas de software para la ingeniería estructural e ingeniería sísmica. Los software de CSI son utilizados por miles de empresas de ingeniería en más de 160 países para el diseño de importantes proyectos, entre ellos: la Torre Taipei 101 en Taiwán, el One World Trade Center en Nueva York, el estadio Birds Nest Stadium de las olimpiadas de Beijing y el Burj Khalifa de Dubai, que es el edificio más alto del mundo actualmente.

Los modelos aquí presentados fueron desarrollados nuevamente para los objetivos de este documento, en la versión de evaluación del programa ETABS2013v13.1.4eval. El programa fue descargado gratuitamente de la página oficial de CSI:

<http://www.csiamerica.com/support/downloads>



Figura 14: Imagen al abrir el programa de evaluación ETABS

4.2 Modelo matemático

El modelo matemático utilizado corresponde a un análisis tridimensional con elementos barra de comportamiento deformable de 12 grados de libertad, éstas son analizadas por el método general de rigideces. Los elementos área son de 3 y 4 nudos con 18 y 24 grados de libertad respectivamente, y son analizados por el método del elemento finito. El análisis sísmico dinámico está desarrollado con 3 grados de libertad por piso y corresponde a un análisis espectral fue realizado mediante un análisis modal con combinación CQC. El comportamiento mecánico utilizado para el modelo fue elástico-lineal.

4.3 Modelo de las Torres T1 y T2

A continuación se muestra el modelo por computadora desarrollado en el programa ETABS, se muestran las torres por separado y en conjunto.

4.3.1 Torre T1

Es una torre con 2 sótanos más 21 pisos. El modelo para el análisis estructural por computadora consiste de: 1572 nudos, 1697 barras y 765 áreas con 3048 lados.

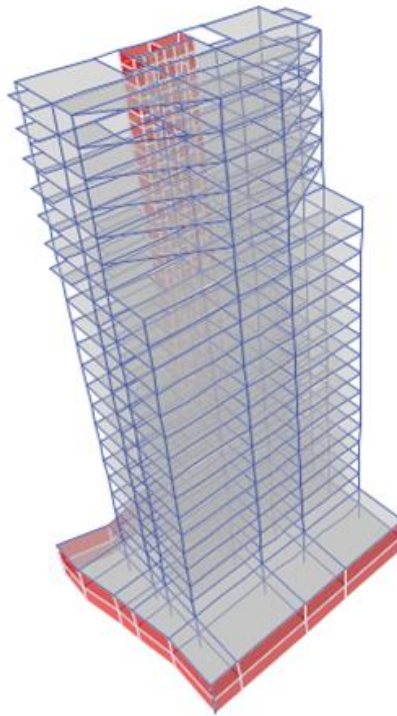


Figura 15: Modelo por computadora de la Torre T1

4.3.2 Torre T2

Es una torre con 2 sótanos más 21 pisos. El modelo para el análisis estructural por computadora consiste de: 1587 nudos, 1725 barras y 771 áreas con 3072 lados.

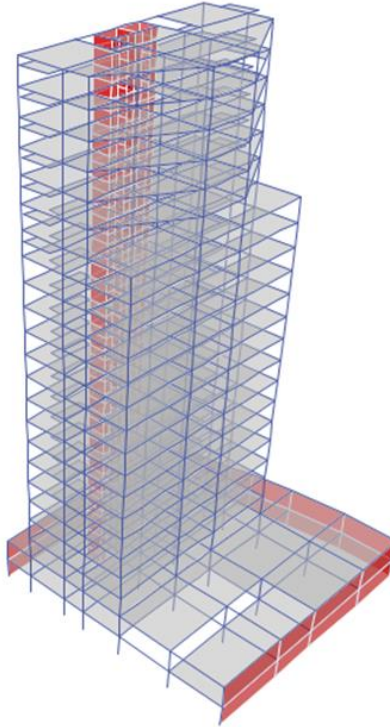


Figura 16: Modelo por computadora de la Torre T2

4.4 Modelo de la Torre T3

Aquí se muestra el edificio destinado a las amenidades del complejo residencial que se resume como una torre con 2 sótanos más 3 pisos. El modelo para el análisis estructural por computadora consiste de: 89 nudos, 174 barras y 44 áreas con 174 lados.

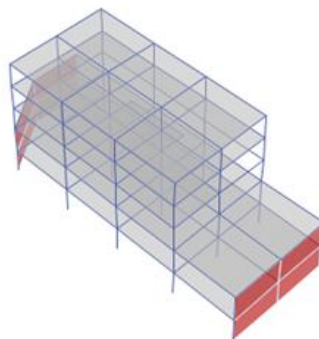


Figura 17: Modelo por computadora de la Torre T3

4.5 Modelo del complejo residencial Torres Arts

Se presenta el modelo general del complejo residencial Torres Arts, que consiste en: 3248 nudos, 3596 barras y 1580 áreas con 6294 lados. Del modelo mostrado, se tienen 98 nudos restringidos con una unión empotrada tridimensional en la base, por lo que se tienen 3150 nudos libres, y con esto 18900 grados de libertad.

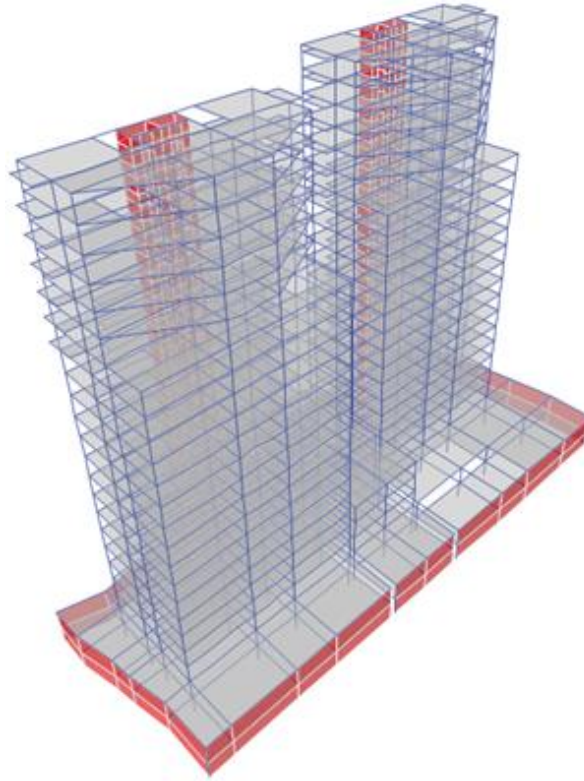


Figura 18: Modelo por computadora del complejo residencial Torres Arts

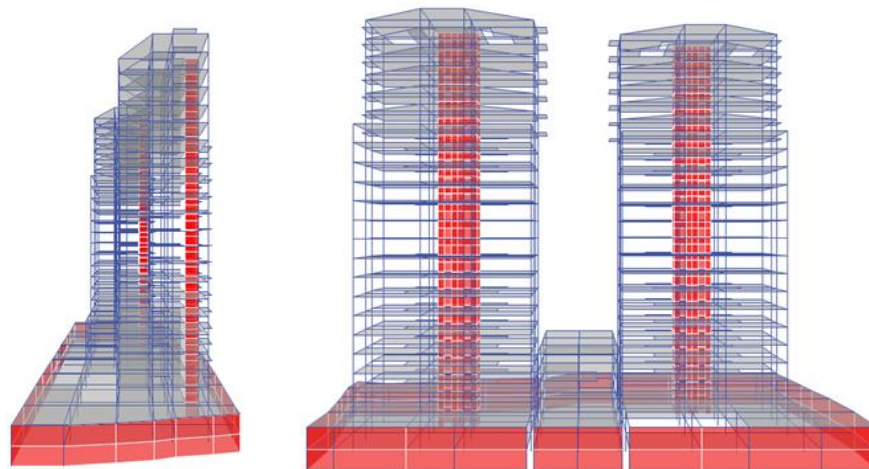


Figura 19: Vista lateral y frontal

4.6 Datos ingresados y datos calculados

A parte de determinar el modelo geométrico por computadora a base de elementos nudo, barra y área, así como sus dimensiones y materiales, se presentan por separado algunos de los datos más relevantes que se ingresaron manualmente y los que se obtuvieron automáticamente por el programa. Esto refleja específicamente la forma en que se decidió trabajar para este proyecto, la cual no es absoluta y puede diferir según la complejidad del proyecto, la ubicación del mismo, la reglamentación aplicada y el criterio del modelador, entre otros.

4.6.1 Datos ingresados manualmente

Para este proyecto se decidió ingresar manualmente los siguientes datos:

- a) Cargas muertas
- b) Cargas vivas
- c) Factores de carga
- d) Combinaciones de carga
- e) Dirección de losas
- f) Diafragmas
- g) Espectro de diseño sísmico de sitio

4.6.2 Datos calculados automáticamente

Se presentan algunos de los datos más relevantes que se calcularon automáticamente:

- a) Pesos propios de barras
- b) Bajada de cargas
- c) Fuerzas internas y externas
- d) Desplazamientos
- e) Drifts
- f) Masas
- g) Centros de masa
- h) Centros de rigidez
- i) Modos de vibrar
- j) Combinación modal
- k) Cortantes sísmicos
- l) Diseño de los elementos

Como se muestra, el programa resuelve un alto porcentaje del problema estructural aunque siempre va acompañado del criterio de análisis y diseño del ingeniero estructural que en este caso es el modelador.

4.7 Secciones

Se obtuvieron finalmente las siguientes secciones de columnas y trabes, a las cuales no fue sencillo llegar ya que se dieron muchas modificaciones a las dimensiones, armados, recubrimientos, materiales y orientación entre otras, para garantizar el cumplimiento de las condiciones de resistencia y servicio.

4.7.1 Secciones de columnas

SECCIONES DE COLUMNAS										
SectionName	Material	Depth	With	As	p	Cover	NumBars3Dir	NumBars2Dir	BarSize	CornerBarSize
		m	m	cm2	%	m			#	#
C-1	FC450	0.7	0.7	81.1	1.65%	0.072	5	5	8	8
C-2	FC450	0.75	1.3	250.8	2.57%	0.072	8	5	12	12
C-3	FC450	0.75	1.3	182.4	1.87%	0.072	6	4	12	12
C-4	FC350	0.75	1.3	124.8	1.28%	0.072	5	4	10	12
C-5	FC350	0.75	1.3	102.6	1.05%	0.072	6	5	8	10
C-6	FC450	0.75	1.3	205.2	2.10%	0.072	7	4	12	12
C-7	FC450	0.75	1.3	140.6	1.44%	0.072	6	4	10	12
C-8	FC350	0.75	1.3	110.8	1.14%	0.072	5	4	10	10
C-9	FC350	0.75	1.3	102.6	1.05%	0.072	6	5	8	10
C-10	FC450	0.75	1.7	250.8	1.97%	0.072	8	5	12	12
C-11	FC450	0.75	1.7	156.4	1.23%	0.072	7	4	10	12
C-12	FC350	0.75	1.7	126.7	0.99%	0.072	6	4	10	10
C-13	FC450	0.75	1.3	182.4	1.87%	0.072	6	4	12	12
C-14	FC450	0.75	1.3	124.8	1.28%	0.072	5	4	10	12
C-15	FC350	0.75	1.3	110.8	1.14%	0.072	5	4	10	10
C-16	FC350	0.75	1.3	102.6	1.05%	0.072	6	5	8	10
C-17	FC450	0.75	1.3	250.8	2.57%	0.072	8	5	12	12
C-18	FC450	0.75	1.3	140.6	1.44%	0.072	6	4	10	12
C-19	FC350	0.75	1.3	126.7	1.30%	0.072	6	4	10	10
C-20	FC350	0.75	1.3	102.6	1.05%	0.072	7	4	8	10

Tabla 6: Secciones finales de columnas

4.7.2 Secciones de trabes

SECCIONES DE TRABES					
SectionName	Material	FromFile	Shape	Depth	WidthTop
T-1	FC350	No	Rectangular	0.7	0.5
T-2	FC350	No	Rectangular	0.7	0.6
T-3	FC350	No	Rectangular	0.7	0.4
T-4	FC350	No	Rectangular	0.7	0.65
T-5	FC350	No	Rectangular	0.6	0.3
T-6	FC350	No	SD Section	0.7	0.55
T-7	FC350	No	SD Section	0.7	0.5

Tabla 7: Secciones finales de trabes

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS SÍSMICO

5.1 Introducción

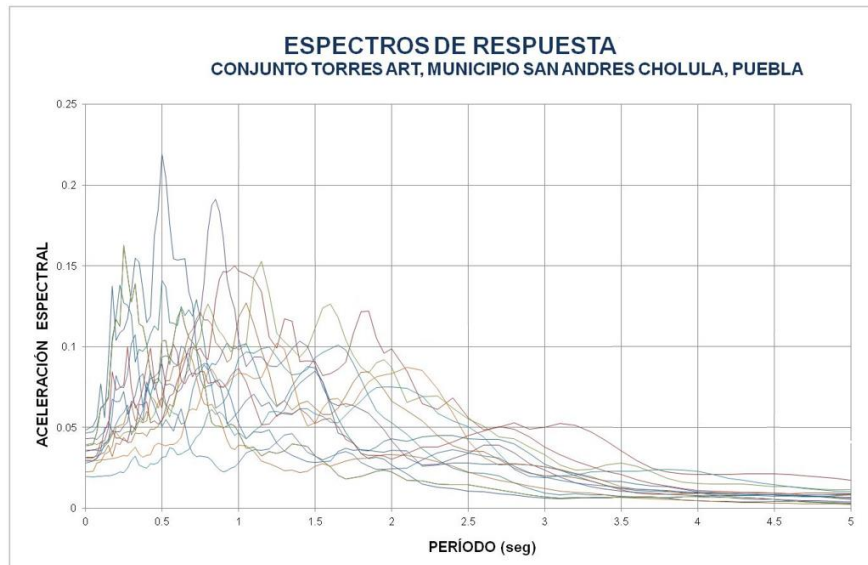
Se realizó un análisis sísmico con el propósito de brindar la seguridad y el servicio adecuado, que garantice que ante algún evento sísmico de relativa importancia, no habrá fallas estructurales considerables que conlleven a pérdidas de vidas y/o daños que afecten el funcionamiento permanente de la edificación.

5.2 Método utilizado

Debido a las características de la estructura se requiere de un análisis sísmico dinámico, el cual, para este proyecto consistió en un análisis modal espectral.

5.3 Espectro de respuesta y de diseño en sitio

La empresa Seismo Control, S.A. de C.V., realizó un espectro de respuesta de sitio para porcentajes de amortiguamiento de 1% a 10 % y hasta un periodo de 5 s.



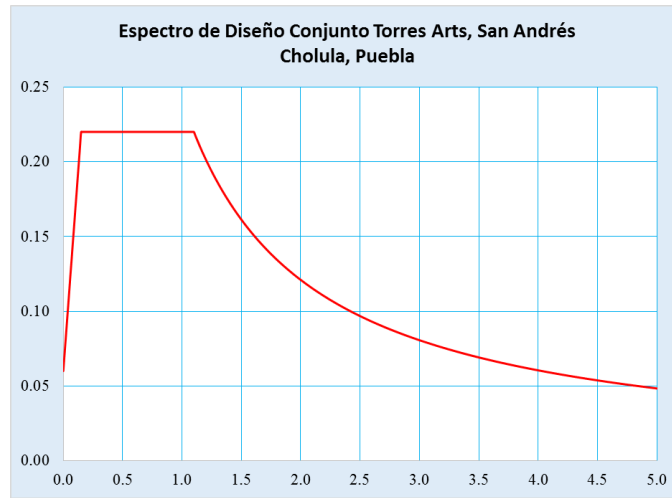
Gráfica 1: Espectros de respuesta de sitio

Aunado al espectro de respuesta, fue proporcionada la siguiente tabla para determinar el espectro de diseño del sitio:

Espectro de Diseño Torres Arts				
a_0	c	T_a	T_b	r
0.06	0.22	0.15	1.1	1

Tabla 8: Datos para generar el espectro de diseño de sitio

Numéricamente para periodos con intervalos desde 0.01 a 5 segundos, se obtiene la siguiente gráfica con 501 coeficientes.



Gráfica 2: Espectro de diseño de sitio

5.4 Diafragmas

Para el análisis sísmico, se asignó el comportamiento de diafragma a los sistemas de piso del modelo. ETABS puede trabajar con un diafragma por torre, por lo que en total se tuvieron 3 diafragmas: D1, D2 y D3 para las torres T1, T2, y T3 respectivamente.

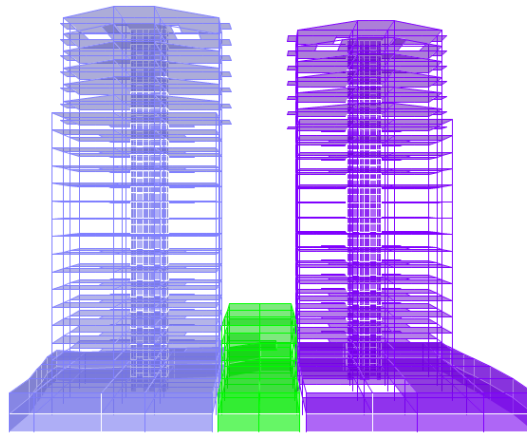


Figura 20: Torres T1, T3 y T2 (Desde la Izquierda) con colores Azul, Verde y Morado, respectivamente

Los diafragmas trabajan únicamente con 3 grados de libertad por nivel, los cuales son dos ortogonales horizontales y un angular. Las torres T1 y T2 son de 23 niveles, y la torre T3 es de 5 niveles, por lo que cada torre T1 y T2 tendrá un total de 69 grados de libertad y la torre T3 un total de 15 grados de libertad. Esto lleva a que en el modelo se tendrán 153 grados de libertad en total y por lo tanto 153 modos de vibrar. Esto debe indicarse manualmente.

5.5 Masas laterales

Las masas para realizar el análisis modal espectral, se calculan automáticamente a partir de las sumatoria de las cargas de peso propio (Dead), carga muerta (CM) y carga viva instantánea (Wa). Por lo tanto, la masa queda en función de: $M = f(\text{Dead} + \text{CM} + \text{Wa})$

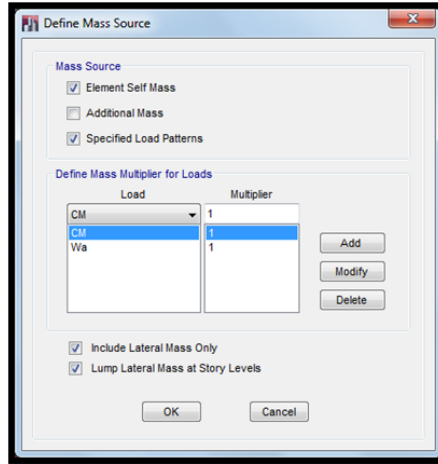


Figura 21: Definición de la fuente de masa

Este paso es uno de los más delicados y en mi experiencia profesional me he dado cuenta de que muchas veces se realizan análisis sísmicos, ya sean estáticos o dinámicos, y no se tiene adecuadamente definida la fuente de masa, en ocasiones el calculista revisa la masa a partir del peso del edificio, sin embargo esto es un grave error ya que peso y masa son conceptos completamente distintos.

Story	Diaphragm	Mass X	Mass Y	Cumulative X	Cumulative Y
		tonf-s ² /m	tonf-s ² /m	tonf-s ² /m	tonf-s ² /m
TORRE T1					
T1-Roof	D1	67.47898	67.47898	67.47898	67.47898
T1-Level20	D1	62.39834	62.39834	129.87732	129.87732
T1-Level19	D1	64.78389	64.78389	194.66121	194.66121
T1-Level18	D1	64.78389	64.78389	259.4451	259.4451
T1-Level17	D1	64.78389	64.78389	324.22898	324.22898
T1-Level16	D1	64.78389	64.78389	389.01287	389.01287
T1-Level15	D1	74.23268	74.23268	463.24555	463.24555
T1-Level14	D1	70.16421	70.16421	533.40976	533.40976
T1-Level13	D1	70.16421	70.16421	603.57397	603.57397
T1-Level12	D1	70.16421	70.16421	673.73819	673.73819
T1-Level11	D1	70.16421	70.16421	743.9024	743.9024
T1-Level10	D1	70.16421	70.16421	814.06661	814.06661
T1-Level9	D1	70.16421	70.16421	884.23083	884.23083
T1-Level8	D1	70.16421	70.16421	954.39504	954.39504
T1-Level7	D1	70.16421	70.16421	1024.55925	1024.55925

CAPITULO 5 ANÁLISIS SÍSMICO

T1-Level6	D1	70.54673	70.54673	1095.10598	1095.10598
T1-Level5	D1	71.02518	71.02518	1166.13116	1166.13116
T1-Level4	D1	71.02518	71.02518	1237.15634	1237.15634
T1-Level3	D1	71.02518	71.02518	1308.18152	1308.18152
T1-Level2	D1	71.20799	71.20799	1379.38952	1379.38952
T1-Level1	D1	71.45762	71.45762	1450.84714	1450.84714
T1-Ground Floor (L0)	D1	199.44642	199.44642	1650.29356	1650.29356
T1-Basement(L-1)	D1	157.47078	157.47078	1807.76434	1807.76434

Story	Diaphragm	Mass X	Mass Y	Cumulative X	Cumulative Y
		tonf-s ² /m	tonf-s ² /m	tonf-s ² /m	tonf-s ² /m
TORRE T2					
T2-Roof	D2	67.47898	67.47898	67.47898	67.47898
T2-Level20	D2	62.39834	62.39834	129.87732	129.87732
T2-Level19	D2	64.78389	64.78389	194.66121	194.66121
T2-Level18	D2	64.78389	64.78389	259.4451	259.4451
T2-Level17	D2	64.78389	64.78389	324.22898	324.22898
T2-Level16	D2	64.78389	64.78389	389.01287	389.01287
T2-Level15	D2	74.23268	74.23268	463.24555	463.24555
T2-Level14	D2	70.16421	70.16421	533.40976	533.40976
T2-Level13	D2	70.16421	70.16421	603.57397	603.57397
T2-Level12	D2	70.16421	70.16421	673.73819	673.73819
T2-Level11	D2	70.16421	70.16421	743.9024	743.9024
T2-Level10	D2	70.16421	70.16421	814.06661	814.06661
T2-Level9	D2	70.16421	70.16421	884.23083	884.23083
T2-Level8	D2	70.16421	70.16421	954.39504	954.39504
T2-Level7	D2	70.16421	70.16421	1024.55925	1024.55925
T2-Level6	D2	70.54673	70.54673	1095.10598	1095.10598
T2-Level5	D2	71.02518	71.02518	1166.13116	1166.13116
T2-Level4	D2	71.02518	71.02518	1237.15634	1237.15634
T2-Level3	D2	71.02518	71.02518	1308.18152	1308.18152
T2-Level2	D2	71.20799	71.20799	1379.38952	1379.38952
T2-Level1	D2	71.45762	71.45762	1450.84714	1450.84714
T2-Ground Floor (L0)	D2	204.55945	204.55945	1655.40659	1655.40659
T2-Basement(L-1)	D2	179.80346	179.80346	1835.21005	1835.21005

Story	Diaphragm	Mass X	Mass Y	Cumulative X	Cumulative Y
		tonf-s ² /m	tonf-s ² /m	tonf-s ² /m	tonf-s ² /m
TORRE T3					
T3-Roof	D3	38.83969	38.83969	38.83969	38.83969
T3-Level2	D3	47.67585	47.67585	86.51554	86.51554
T3-Level1	D3	31.39542	31.39542	117.91096	117.91096
T3-Ground Floor (L0)	D3	101.19272	101.19272	219.10368	219.10368
T3-Basement(L-1)	D3	68.52134	68.52134	287.62502	287.62502

Tabla 9: Masas laterales concentradas en los diafragmas D1, D2 y D3

5.6 Rigideces de entrepiso

Las rigideces de entrepiso son evaluadas automáticamente y se presentan dos casos:

- a) Columnas con I_g y traveses con I_g

Para evaluar las rigideces de entrepiso, se considera en una primera etapa un estado no agrietado en los elementos de concreto reforzado utilizando las inercias brutas de las secciones de columnas y traveses.

- b) Columnas con I_g y traveses con $0.5 I_g$

Para tomar en cuenta el efecto del agrietamiento en el concreto, el cual afecta la rigidez, se consideró la inercia bruta de las columnas y la mitad de la inercia bruta de las traveses, obteniendo así en una segunda etapa, un estado agrietado de los elementos de concreto reforzado.

5.6.1 Rigideces de entrepiso sin el efecto del agrietamiento

Modelando las columnas y las traveses con momento de inercia bruta I_g .

Story	Stiffness X tonf/m	Stiffness Y tonf/m	Story	Stiffness X tonf/m	Stiffness Y tonf/m
TORRE T1			TORRE T2		
T1-Roof	21203.742	29269.91	T2-Roof	21563.394	29715.75
T1-Level20	35062.694	47524.304	T2-Level20	35449.077	48087.346
T1-Level19	45520.121	59940.049	T2-Level19	45807.489	60435.748
T1-Level18	53049.958	68271.503	T2-Level18	53237.974	68652.546
T1-Level17	59058.006	74456.063	T2-Level17	59183.417	74766.973
T1-Level16	64642.9	79889.68	T2-Level16	64741.872	80194.427
T1-Level15	72619.512	87602.191	T2-Level15	72722.853	87947.684
T1-Level14	77784.369	91484.593	T2-Level14	77897.666	91869.63
T1-Level13	82509.764	94769.988	T2-Level13	82639.331	95153.149
T1-Level12	86995.454	97771.13	T2-Level12	87102.328	98115.298
T1-Level11	91563.252	100788.773	T2-Level11	91620.517	101074.315
T1-Level10	96509.725	104047.591	T2-Level10	96545.977	104291.984
T1-Level9	102100.567	107797.682	T2-Level9	102188.25	108055.365
T1-Level8	108624.828	112659.289	T2-Level8	108851.783	112974.487
T1-Level7	116469.54	118979.929	T2-Level7	116874.848	119368.141
T1-Level6	125853.748	126550.004	T2-Level6	126388.575	126996.194
T1-Level5	135097.276	133954.131	T2-Level5	135688.966	134478.773
T1-Level4	146499.676	143394.784	T2-Level4	147193.476	144182.785
T1-Level3	161986.997	156755.931	T2-Level3	163098.008	158188.076
T1-Level2	186239.486	178445.404	T2-Level2	188814.204	181671.88
T1-Level1	234417.51	212738.658	T2-Level1	243211.862	221215.926
T1-Ground Floor (L0)	343644.902	308537.242	T2-Ground Floor (L0)	361264.475	342284.648
T1-Basement(L-1)	802361.562	775780.818	T2-Basement(L-1)	845905.367	874815.859

Story	Stiffness X	Stiffness Y
	tonf/m	tonf/m
TORRE T3		
T3-Roof	33017.207	31894.49
T3-Level2	44776.842	42878.132
T3-Level1	56708.468	58432.914
T3-Ground Floor (L0)	99877.32	78702.413
T3-Basement(L-1)	201022.617	140466.994

Tabla 10: Rigideces de entepiso sin considerar el efecto de agrietamiento

5.6.2 Rigideces de entepiso con el efecto del agrietamiento

Modelando las columnas con momento de inercia bruta I_g y las trabes la mitad de momento de inercia bruta $0.5 I_g$.

Story	Stiffness X	Stiffness Y	Story	Stiffness X	Stiffness Y
	tonf/m	tonf/m		tonf/m	tonf/m
TORRE T1			TORRE T2		
T1-Roof	15143.802	21006.324	T2-Roof	15338.732	21165.931
T1-Level20	25029.016	33546.834	T2-Level20	25213.437	33750.635
T1-Level19	32378.123	41616.514	T2-Level19	32536.51	41830.85
T1-Level18	37772.751	46789.35	T2-Level18	37944.934	46993.693
T1-Level17	42193.571	50527.246	T2-Level17	42413.431	50723.389
T1-Level16	46309.833	53650.219	T2-Level16	46543.513	53863.23
T1-Level15	52012.051	58119.522	T2-Level15	52186.874	58369.978
T1-Level14	56132.879	60324.451	T2-Level14	56198.349	60658.232
T1-Level13	59958.52	62170.633	T2-Level13	59940.614	62561.098
T1-Level12	63618.272	63916.169	T2-Level12	63562.33	64317.172
T1-Level11	67303.537	65762.611	T2-Level11	67252.884	66155.118
T1-Level10	71188.108	67848.8	T2-Level10	71169.511	68257.723
T1-Level9	75459.246	70374.55	T2-Level9	75507.355	70852.487
T1-Level8	80433.056	73625.365	T2-Level8	80587.376	74207.435
T1-Level7	86566.287	77916.046	T2-Level7	86838.483	78598.49
T1-Level6	93912.562	83104.291	T2-Level6	94268.106	83872.966
T1-Level5	101703.48	88820.761	T2-Level5	102083.626	89690.588
T1-Level4	111493.864	96457.024	T2-Level4	111892.967	97526.167
T1-Level3	125008.05	107722.769	T2-Level3	125630.672	109192.63
T1-Level2	146513.541	126802.857	T2-Level2	148202.171	129292.523
T1-Level1	189445.795	155035.015	T2-Level1	196315.688	161289.138
T1-Ground Floor (L0)	285031.328	231786.382	T2-Ground Floor (L0)	294834.192	254969.359
T1-Basement(L-1)	712522.944	624027.97	T2-Basement(L-1)	738556.186	695032.724

Story	Stiffness X	Stiffness Y
	tonf/m	tonf/m
TORRE T3		
T3-Roof	19356.565	18328.022
T3-Level2	28921.723	27177.707
T3-Level1	38514.941	38318.449
T3-Ground Floor (L0)	74681.271	55401.026
T3-Basement(L-1)	167858.135	107964.415

Tabla 11: Rigideces de entepiso considerando el efecto de agrietamiento

La consideración sobre el agrietamiento del concreto es importante, lo que orilla a los siguientes efectos principales en la estructura:

- a) Disminución de la rigidez lateral
- b) Aumento en los desplazamientos laterales y drifts
- c) Incremento en el periodo fundamental
- d) Afectación de las fuerzas sísmicas
- e) Cambios en el diseño de los elementos

Lo que se recomienda realizar dada esta situación es realizar dos diseños y revisiones considerando ambos casos (no agrietamiento y agrietamiento) dominando la condición más desfavorable en cuanto a resistencia y servicio. Esto debido a que ante algún evento sísmico de relativa importancia, inicialmente la estructura no se encuentra dañada (agrietada) y recibe una fase de acciones sísmicas acorde a su estado inicial, pero conforme las acciones sísmicas pudiesen dañar a la estructura (agrietarla), estas irán cambiando debido a la nueva respuesta de la estructura; es por esta reflexión que se realizaron dos análisis, dos diseños y dos revisiones en este proyecto.

5.7 Análisis modal

Se realizó un análisis modal en función de las masas y las rigideces de entrepiso mostradas previamente, resultando en 153 modos de vibrar. Por obvias razones se muestran únicamente los primeros 3 modos de vibrar de cada torre sin y con los efectos del agrietamiento.

Debido a la modelación simultánea de las tres torres, el programa enumera secuencialmente desde el periodo mayor (T_1) al periodo menor (T_{153}). Para mayor claridad, se presentan 15 modos de vibrar generales y los tres primeros modos de vibrar por torre.

5.7.1 Modos de vibrar sin el efecto de agrietamiento

Multiple Tower Mode	Period	Frequency	Circular Frequency	Eigenvalue
	sec	cyc/sec	rad/sec	rad ² /sec ²
1	2.128	0.47	2.9526	8.7181
2	2.119	0.472	2.9653	8.7931
3	2.01	0.498	3.1265	9.7749
4	2.004	0.499	3.1348	9.8269
5	1.45	0.69	4.3325	18.7707
6	1.442	0.693	4.357	18.9837
7	0.645	1.551	9.7445	94.9544
8	0.64	1.563	9.8236	96.5038
9	0.612	1.633	10.2626	105.3216

10	0.61	1.639	10.2952	105.9904
11	0.546	1.831	11.5073	132.417
12	0.506	1.974	12.4057	153.9014
13	0.408	2.451	15.3995	237.1446
14	0.405	2.466	15.4961	240.1284
15	0.369	2.711	17.0365	290.2417
.
.
.
153	0.016	64.29	403.9443	163171.011

Tabla 12: Modos de vibrar de múltiples torres sin el efecto de agrietamiento

Single Tower Mode	Multiple Tower Mode	Period sec	Frequency cyc/sec	Circular Frequency rad/sec	Eigenvalue rad ² /sec ²
TORRE T1					
1	1	2.128	0.47	2.9526	8.7181
2	3	2.01	0.498	3.1265	9.7749
3	5	1.45	0.69	4.3325	18.7707

Single Tower Mode	General Mode	Period sec	Frequency cyc/sec	Circular Frequency rad/sec	Eigenvalue rad ² /sec ²
TORRE T2					
1	2	2.119	0.472	2.9653	8.7931
2	4	2.004	0.499	3.1348	9.8269
3	6	1.442	0.693	4.357	18.9837

Single Tower Mode	General Mode	Period sec	Frequency cyc/sec	Circular Frequency rad/sec	Eigenvalue rad ² /sec ²
TORRE T3					
1	11	0.546	1.831	11.5073	132.417
2	12	0.506	1.974	12.4057	153.9014
3	15	0.369	2.711	17.0365	290.2417

Tabla 13: Modos de vibrar por torre sin el efecto de agrietamiento

A continuación se describen gráficamente los tres primeros modos de vibrar de la Torre T1, T2 y T3 sin el efecto de agrietamiento.

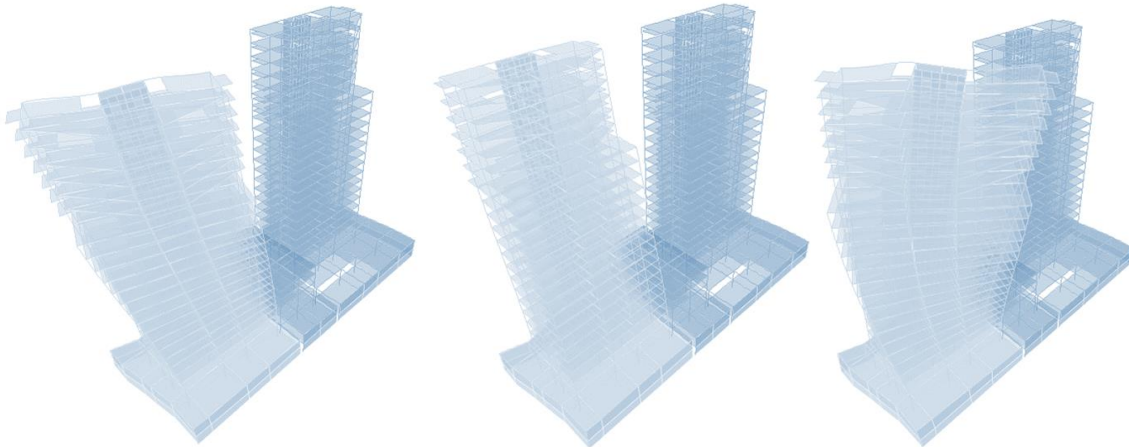


Figura 22: Modos de vibrar de la torre T1; T₁ = 2.128 s, T₂ = 2.010 s, T₃ = 1.450 s

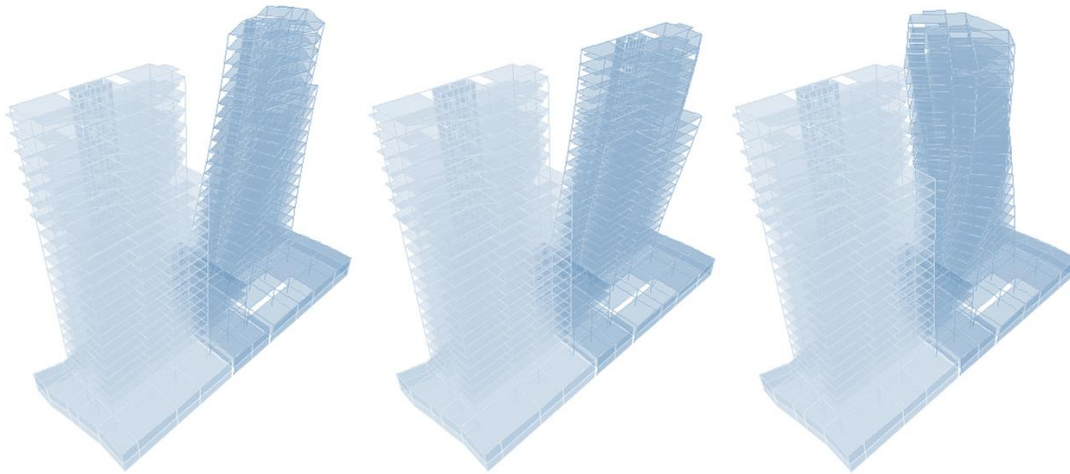


Figura 23: Modos de vibrar de la torre T2; $T_1 = 2.119$ s, $T_2 = 2.004$ s, $T_3 = 1.442$ s

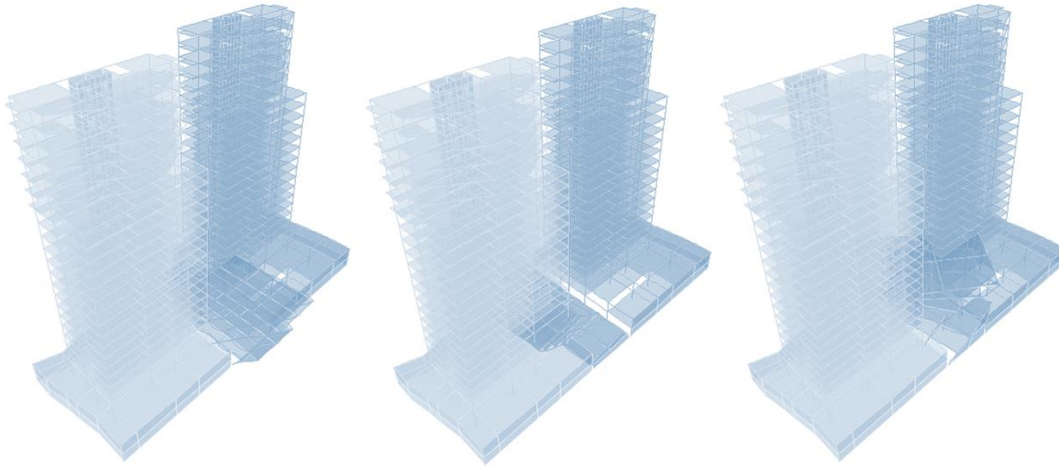


Figura 24: Modos de vibrar de la torre T3; $T_1 = 0.546$ s, $T_2 = 0.506$ s, $T_3 = 0.369$ s

5.7.2 Modos de vibrar con el efecto de agrietamiento

Multiple Tower Mode	Period	Frequency	Circular Frequency	Eigenvalue
	sec	cyc/sec	rad/sec	rad ² /sec ²
1	2.489	0.402	2.5243	6.3718
2	2.477	0.404	2.5368	6.4352
3	2.456	0.407	2.5585	6.5457
4	2.451	0.408	2.5632	6.5698
5	1.644	0.608	3.8227	14.613
6	1.635	0.612	3.8438	14.7751
7	0.741	1.35	8.482	71.9435
8	0.734	1.362	8.555	73.1872
9	0.726	1.378	8.6598	74.9916
10	0.724	1.381	8.6799	75.3409
11	0.665	1.504	9.4506	89.3129
12	0.609	1.642	10.3184	106.4702

13	0.443	2.255	14.1708	200.8107
14	0.439	2.277	14.3048	204.6264
15	0.438	2.284	14.3528	206.0015
.
.
.
153	0.016	64.226	403.5448	162848.425

Tabla 14: Modos de vibrar de múltiples torres con el efecto de agrietamiento

Single Tower Mode	Multiple Tower Mode	Period	Frequency	Circular Frequency	Eigenvalue
		sec	cyc/sec	rad/sec	rad ² /sec ²
TORRE T1					
1	1	2.489	0.402	2.5243	6.3718
2	3	2.456	0.407	2.5585	6.5457
3	5	1.644	0.608	3.8227	14.613
TORRE T2					
Single Tower Mode	General Mode	Period	Frequency	Circular Frequency	Eigenvalue
		sec	cyc/sec	rad/sec	rad ² /sec ²
1	2	2.477	0.404	2.5368	6.4352
2	4	2.451	0.408	2.5632	6.5698
3	6	1.635	0.612	3.8438	14.7751
TORRE T3					
Single Tower Mode	General Mode	Period	Frequency	Circular Frequency	Eigenvalue
		sec	cyc/sec	rad/sec	rad ² /sec ²
1	11	0.665	1.504	9.4506	89.3129
2	12	0.609	1.642	10.3184	106.4702
3	15	0.438	2.284	14.3528	206.0015

Tabla 15: Modos de vibrar por torre con el efecto de agrietamiento

A continuación se describen gráficamente los tres primeros modos de vibrar de la Torre T1, T2 y T3 considerando el efecto de agrietamiento.

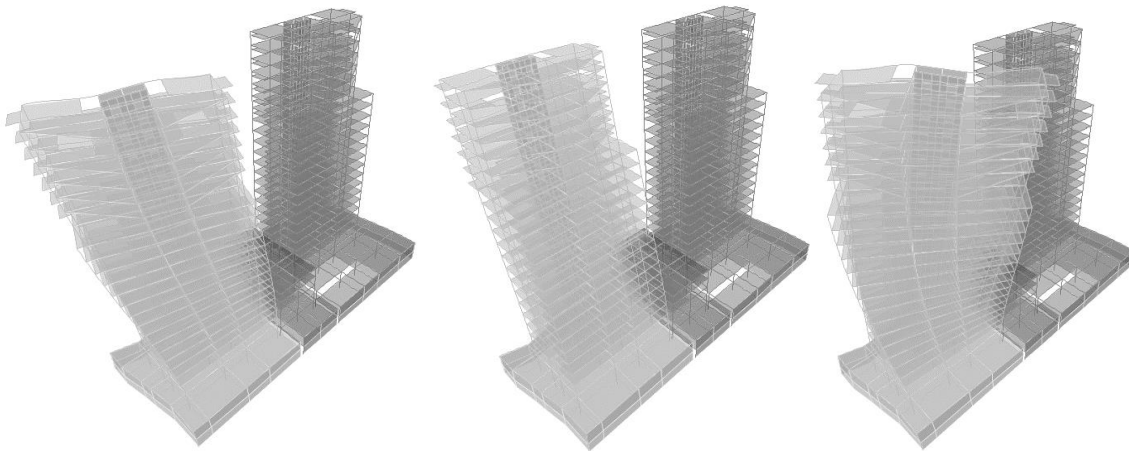


Figura 25: Modos de vibrar de la torre T1; T₁ = 2.489 s, T₂ = 2.456 s, T₃ = 1.644 s

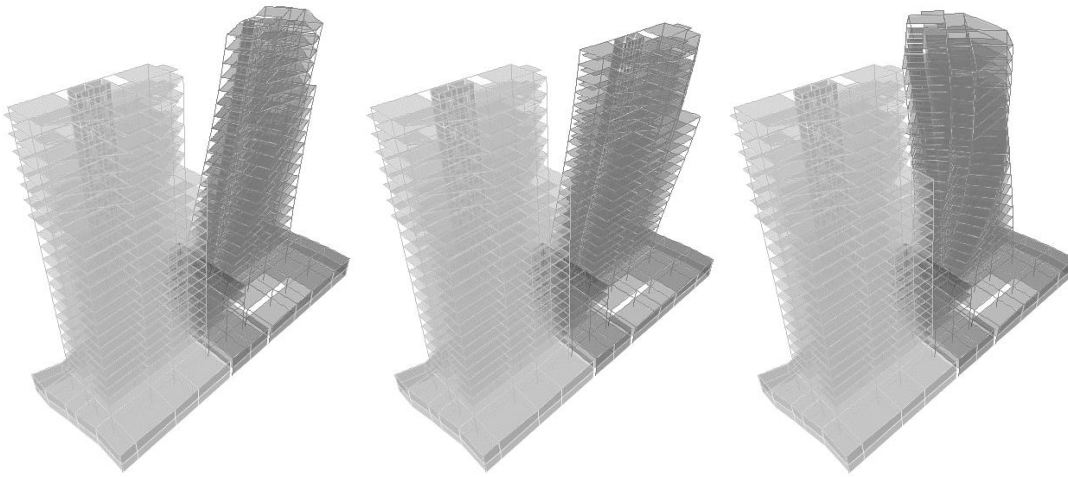


Figura 26: Modos de vibrar de la torre T2; $T_1 = 2.477$ s, $T_2 = 2.451$ s, $T_3 = 1.635$ s

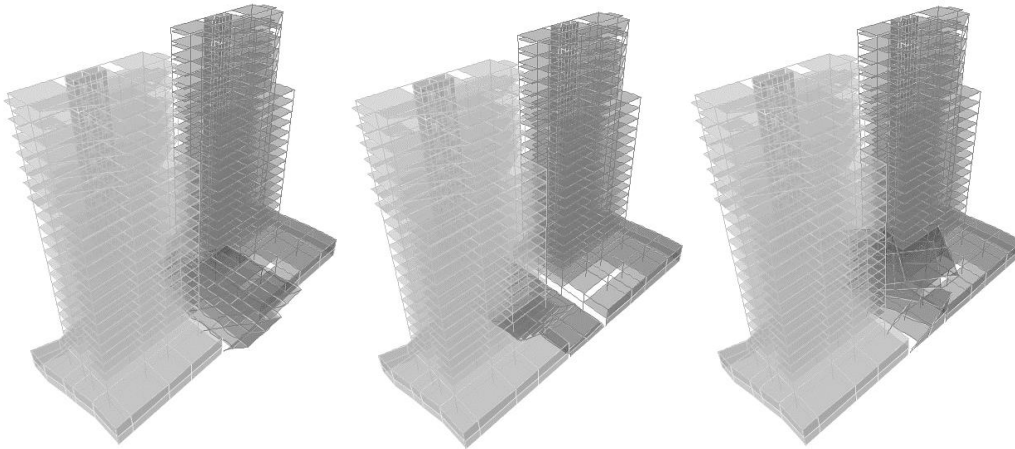


Figura 27: Modos de vibrar de la torre T3; $T_1 = 0.665$ s, $T_2 = 0.609$ s, $T_3 = 0.438$ s

En ambos casos (agrietado y no agrietado), los tres primeros modos de las torres coinciden en perfil o forma modal, asemejando una “configuración por cortante” para el primero y segundo modo, y una “configuración por torsión” en el tercero. Hay que recordar que es incorrecto suponer que los modos de vibrar son desplazamientos ya que solo dependen de la masa y la rigidez de la estructura y deben ser considerados como propiedades dinámicas de la misma.

5.8 Método de combinación modal

Para la obtención aproximada de la máxima respuesta de la estructura, se aplicó la combinación modal CQC (Complete Quadratic Combination) que por sus siglas en inglés significa Combinación Cuadrática Completa y que fue desarrollada como una mejora a la combinación desarrollada por el Dr. Emilio Rosenblueth Deutsch en su tesis doctoral de

1953, conocida ampliamente como la regla SRSS (Square Root of the Sum of the Squares). La razón de aplicar la combinación CQC, es por la aproximación presentada entre los modos de vibrar, la cual en los primeros dos modos consecutivos no difiere más del 10%.

Cortantes sísmicos

Aplicando el espectro de diseño sísmico de sitio y la regla de combinación modal CQC se obtienen los siguientes cortantes en la dirección X y Y, estos valores son obtenidos directamente de la combinación modal y aún no están considerados los aspectos como el factor de comportamiento sísmico Q o el cortante basal mínimo. Los cortantes mostrados están expresados en toneladas para las direcciones X y Y y fue considerando el caso agrietado y no agrietado.

5.8.1 Cortantes sísmicos sin el efecto de agrietamiento

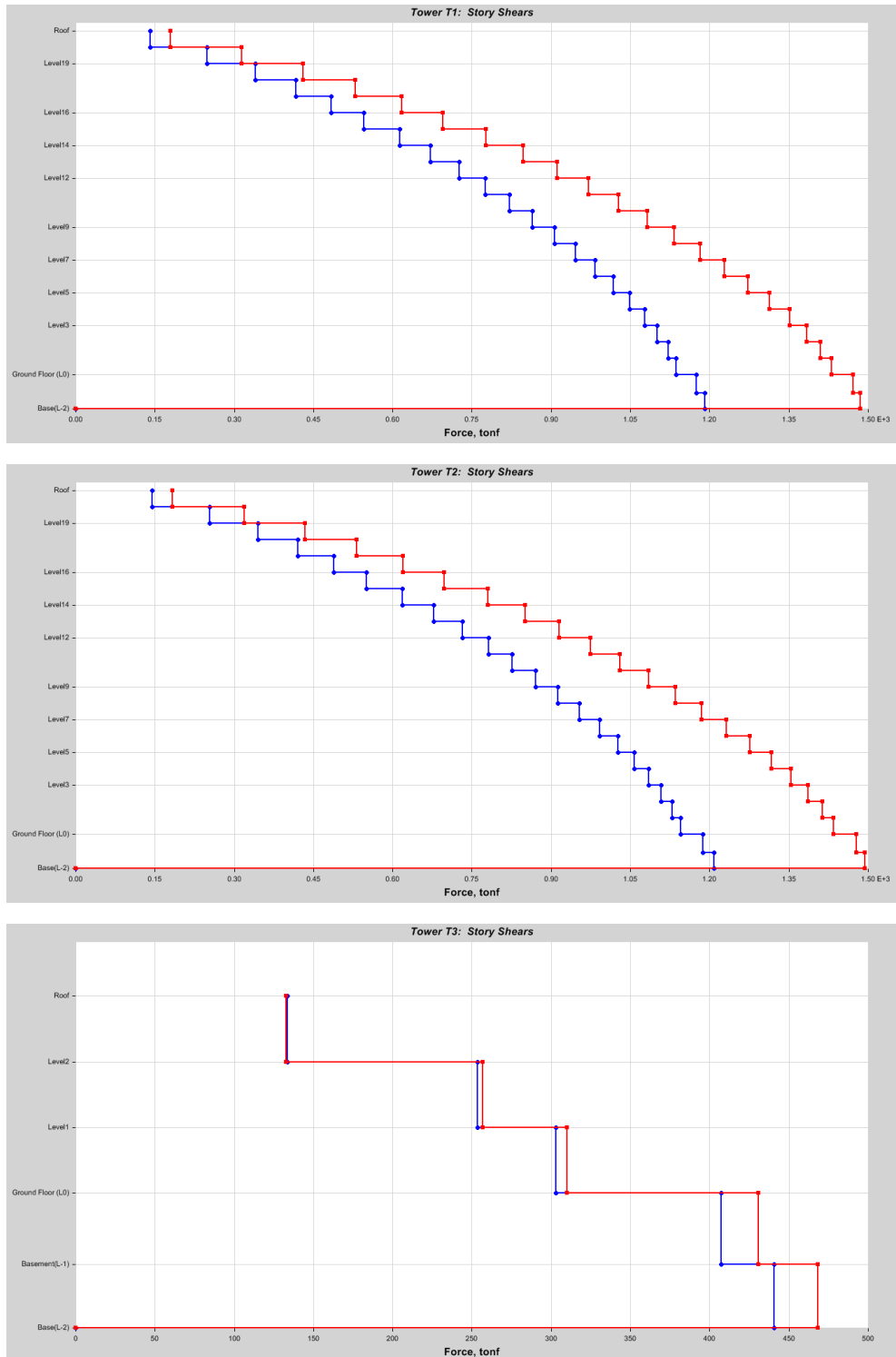
Se muestran los cortantes sísmicos obtenidos en forma tabular y gráfica para el caso sin agrietamiento.

Story	Load Case/Combo	VX	VY
		tonf	tonf
TORRE T1			
T1-Roof	ASDEDSSTorresArts Max	141.088	179.4146
T1-Level20	ASDEDSSTorresArts Max	248.1254	314.6614
T1-Level19	ASDEDSSTorresArts Max	339.7735	430.3745
T1-Level18	ASDEDSSTorresArts Max	416.4086	529.2395
T1-Level17	ASDEDSSTorresArts Max	483.563	616.8355
T1-Level16	ASDEDSSTorresArts Max	545.2824	695.4287
T1-Level15	ASDEDSSTorresArts Max	612.8023	776.9457
T1-Level14	ASDEDSSTorresArts Max	672.0714	847.0707
T1-Level13	ASDEDSSTorresArts Max	725.8626	911.2418
T1-Level12	ASDEDSSTorresArts Max	775.1146	971.046
T1-Level11	ASDEDSSTorresArts Max	821.1242	1027.682
T1-Level10	ASDEDSSTorresArts Max	864.9065	1081.5921
T1-Level9	ASDEDSSTorresArts Max	906.771	1132.8773
T1-Level8	ASDEDSSTorresArts Max	946.3727	1181.6843
T1-Level7	ASDEDSSTorresArts Max	983.2971	1228.1898
T1-Level6	ASDEDSSTorresArts Max	1017.5684	1272.4501
T1-Level5	ASDEDSSTorresArts Max	1049.1122	1313.8223
T1-Level4	ASDEDSSTorresArts Max	1077.1696	1351.0659
T1-Level3	ASDEDSSTorresArts Max	1101.1811	1383.4352
T1-Level2	ASDEDSSTorresArts Max	1121.1084	1410.3278
T1-Level1	ASDEDSSTorresArts Max	1136.9403	1430.8819
T1-Ground Floor (L0)	ASDEDSSTorresArts Max	1175.2952	1471.9379
T1-Basement(L-1)	ASDEDSSTorresArts Max	1191.3875	1485.7522

Story	Load Case/Combo	VX	VY
		tonf	tonf
TORRE T2			
T2-Roof	ASDEDSSTorresArts Max	144.6914	182.483
T2-Level20	ASDEDSSTorresArts Max	252.9311	318.6523
T2-Level19	ASDEDSSTorresArts Max	344.6101	433.9762
T2-Level18	ASDEDSSTorresArts Max	421.0219	531.9997
T2-Level17	ASDEDSSTorresArts Max	488.1245	619.0794
T2-Level16	ASDEDSSTorresArts Max	550.0692	697.7246
T2-Level15	ASDEDSSTorresArts Max	617.9914	779.8549
T2-Level14	ASDEDSSTorresArts Max	677.6826	850.5833
T2-Level13	ASDEDSSTorresArts Max	731.8641	914.9912
T2-Level12	ASDEDSSTorresArts Max	781.0401	974.5439
T2-Level11	ASDEDSSTorresArts Max	826.5962	1030.7009
T2-Level10	ASDEDSSTorresArts Max	870.1148	1084.3279
T2-Level9	ASDEDSSTorresArts Max	912.3777	1135.7676
T2-Level8	ASDEDSSTorresArts Max	953.1802	1185.0294
T2-Level7	ASDEDSSTorresArts Max	991.5456	1231.9072
T2-Level6	ASDEDSSTorresArts Max	1026.5479	1276.1722
T2-Level5	ASDEDSSTorresArts Max	1057.7876	1317.2197
T2-Level4	ASDEDSSTorresArts Max	1085.0605	1354.0435
T2-Level3	ASDEDSSTorresArts Max	1108.5443	1386.1713
T2-Level2	ASDEDSSTorresArts Max	1128.5433	1413.116
T2-Level1	ASDEDSSTorresArts Max	1144.6832	1433.9101
T2-Ground Floor (L0)	ASDEDSSTorresArts Max	1187.2509	1477.3797
T2-Basement(L-1)	ASDEDSSTorresArts Max	1208.0251	1494.3828

Story	Load Case/Combo	VX	VY
		tonf	tonf
TORRE T3			
T3-Roof	ASDEDSSTorresArts Max	133.6128	132.9134
T3-Level2	ASDEDSSTorresArts Max	253.6355	256.771
T3-Level1	ASDEDSSTorresArts Max	302.922	309.9855
T3-Ground Floor (L0)	ASDEDSSTorresArts Max	407.2447	430.8256
T3-Basement(L-1)	ASDEDSSTorresArts Max	440.7706	468.1212

Tabla 16: Cortantes sísmicos sin el efecto de agrietamiento



Gráfica 3: Cortantes sísmicos sin el efecto de agrietamiento (Azul VX; Rojo VY)

5.8.2 Cortantes sísmicos con el efecto de agrietamiento

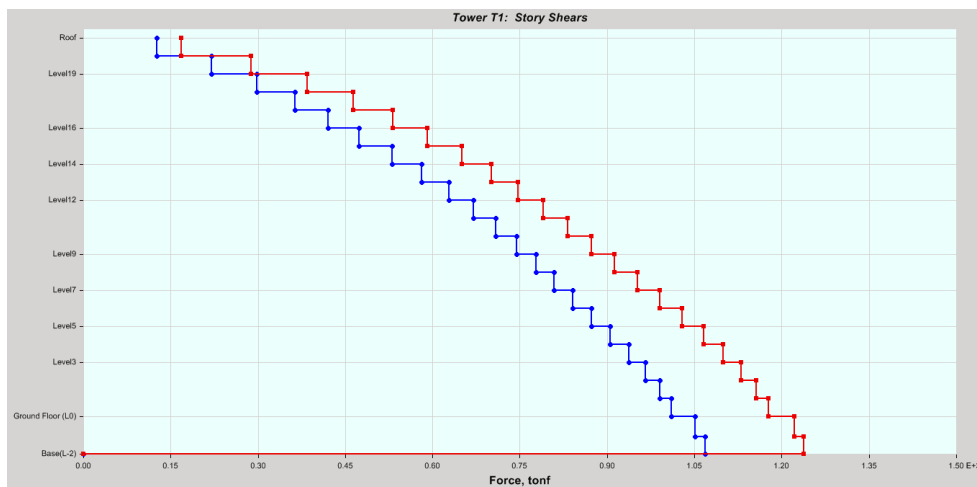
Se muestran cortantes sísmicos obtenidos en forma tabular y gráfica para el caso con agrietamiento.

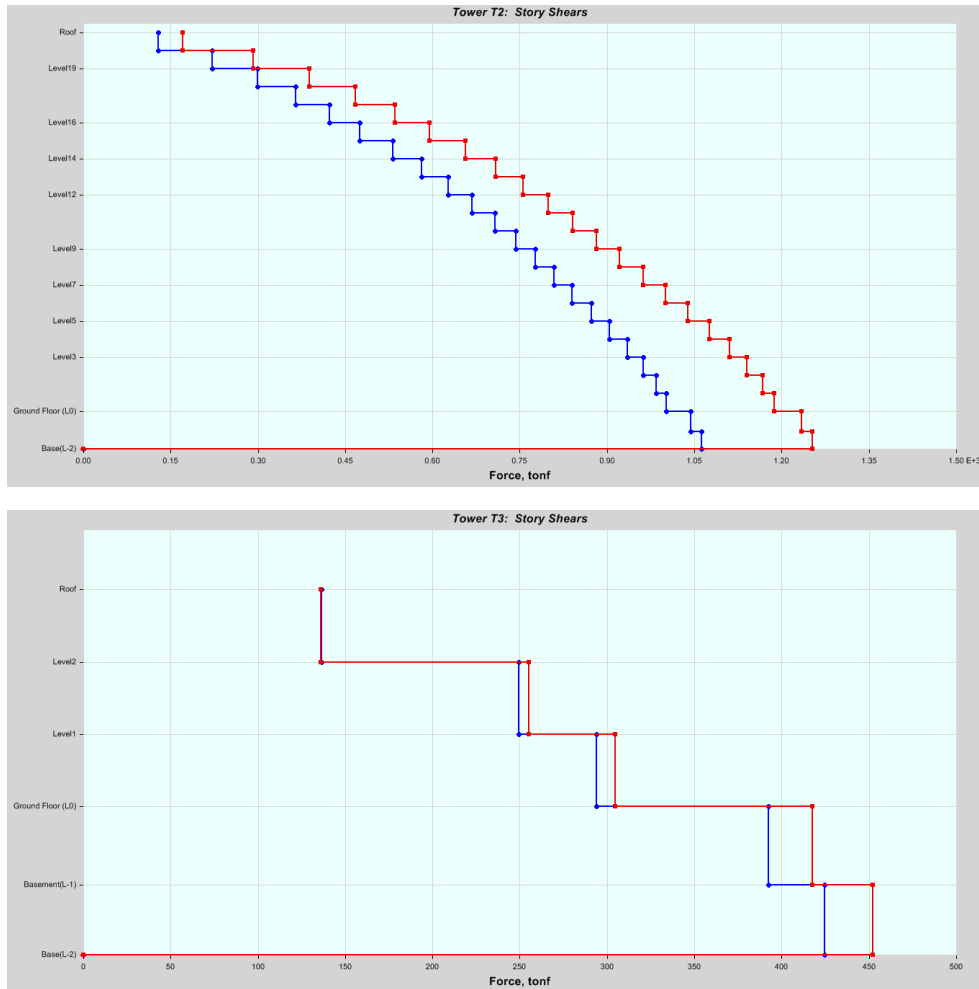
Story	Load Case/Combo	VX	VY
		tonf	tonf
TORRE T1			
T1-Roof	ASDEDSSTorresArts Max	126.5943	168.5076
T1-Level20	ASDEDSSTorresArts Max	219.886	288.1146
T1-Level19	ASDEDSSTorresArts Max	298.0736	384.4539
T1-Level18	ASDEDSSTorresArts Max	363.385	463.2638
T1-Level17	ASDEDSSTorresArts Max	420.8305	531.2684
T1-Level16	ASDEDSSTorresArts Max	473.3229	590.6627
T1-Level15	ASDEDSSTorresArts Max	530.8928	650.6031
T1-Level14	ASDEDSSTorresArts Max	581.7596	701.0967
T1-Level13	ASDEDSSTorresArts Max	628.0333	747.0112
T1-Level12	ASDEDSSTorresArts Max	670.2013	790.3
T1-Level11	ASDEDSSTorresArts Max	708.9921	832.1765
T1-Level10	ASDEDSSTorresArts Max	744.8102	872.9942
T1-Level9	ASDEDSSTorresArts Max	777.9098	912.8536
T1-Level8	ASDEDSSTorresArts Max	809.2539	951.9874
T1-Level7	ASDEDSSTorresArts Max	840.4419	990.64
T1-Level6	ASDEDSSTorresArts Max	872.5463	1028.7987
T1-Level5	ASDEDSSTorresArts Max	905.2174	1065.6871
T1-Level4	ASDEDSSTorresArts Max	936.977	1099.8937
T1-Level3	ASDEDSSTorresArts Max	966.0692	1130.4655
T1-Level2	ASDEDSSTorresArts Max	990.7874	1156.6065
T1-Level1	ASDEDSSTorresArts Max	1009.8093	1177.2524
T1-Ground Floor (L0)	ASDEDSSTorresArts Max	1051.5139	1221.842
T1-Basement(L-1)	ASDEDSSTorresArts Max	1068.3828	1237.4955

Story	Load Case/Combo	VX	VY
		tonf	tonf
TORRE T2			
T2-Roof	ASDEDSSTorresArts Max	128.3195	171.0918
T2-Level20	ASDEDSSTorresArts Max	221.6754	291.8676
T2-Level19	ASDEDSSTorresArts Max	299.6392	388.6393
T2-Level18	ASDEDSSTorresArts Max	364.9715	467.4665
T2-Level17	ASDEDSSTorresArts Max	422.7574	535.5464
T2-Level16	ASDEDSSTorresArts Max	475.2491	595.38
T2-Level15	ASDEDSSTorresArts Max	531.9052	656.4175
T2-Level14	ASDEDSSTorresArts Max	581.4455	708.1523
T2-Level13	ASDEDSSTorresArts Max	626.64	754.9763
T2-Level12	ASDEDSSTorresArts Max	668.2138	798.5504
T2-Level11	ASDEDSSTorresArts Max	706.8655	840.3622
T2-Level10	ASDEDSSTorresArts Max	742.773	881.2981
T2-Level9	ASDEDSSTorresArts Max	776.2306	921.7624
T2-Level8	ASDEDSSTorresArts Max	808.2526	961.7497
T2-Level7	ASDEDSSTorresArts Max	840.1622	1001.0145
T2-Level6	ASDEDSSTorresArts Max	872.5239	1039.284
T2-Level5	ASDEDSSTorresArts Max	904.5568	1075.9226
T2-Level4	ASDEDSSTorresArts Max	934.7764	1109.8832
T2-Level3	ASDEDSSTorresArts Max	961.9438	1140.4652
T2-Level2	ASDEDSSTorresArts Max	984.7994	1166.8485
T2-Level1	ASDEDSSTorresArts Max	1002.2204	1187.7459
T2-Ground Floor (L0)	ASDEDSSTorresArts Max	1043.089	1234.3078
T2-Basement(L-1)	ASDEDSSTorresArts Max	1062.3105	1253.2383

Story	Load Case/Combo	VX	VY
		tonf	tonf
TORRE T3			
T3-Roof	ASDEDSSTorresArts Max	136.33	136.0788
T3-Level2	ASDEDSSTorresArts Max	249.4665	255.3281
T3-Level1	ASDEDSSTorresArts Max	294.0753	304.6989
T3-Ground Floor (L0)	ASDEDSSTorresArts Max	392.5545	417.5418
T3-Basement(L-1)	ASDEDSSTorresArts Max	424.7722	452.0854

Tabla 17: Cortantes sísmicos con el efecto de agrietamiento





Gráfica 4: Cortantes sísmicos con el efecto de agrietamiento (Azul VX; Rojo VY)

Como se logra apreciar en las tablas y gráficas, los cortantes sísmicos disminuyen considerablemente en las torres T1 y T2 si se considera el efecto del agrietamiento, esto se debe principalmente a que el periodo fundamental de ambas torres, ya sea en el caso agrietado o no agrietado, excede el periodo del espectro de diseño $T_b = 1.1$ s, es decir, el periodo fundamental se encuentra en la zona exponencial del espectro de diseño y por lo tanto, un incremento en el periodo disminuye la respuesta máxima de la estructura, consecuentemente hay una disminución en las fuerzas cortantes obtenidas.

Por otra parte el periodo fundamental de la torre T3 se encuentra en la zona de meseta del espectro de diseño, esto no evita la disminución de las fuerzas cortantes, aunque comparando con el caso de las torres T1 y T2, la disminución es relativamente baja.

5.9 Fuerzas sísmicas

Directamente de los datos de cortantes sísmicos mostrados previamente se obtienen las siguientes fuerzas sísmicas y se muestran solo de forma tabulada.

5.9.1 Fuerzas sísmicas sin el efecto de agrietamiento

Se muestran las fuerzas sísmicas sin reducir obtenidas en forma tabular para el caso sin agrietamiento.

Story	Load Case/Combo	FX	FY
		tonf	tonf
TORRE T1			
T1-Roof	ASDEDSSTorresArts Max	141.088	179.415
T1-Level20	ASDEDSSTorresArts Max	107.037	135.247
T1-Level19	ASDEDSSTorresArts Max	91.648	115.713
T1-Level18	ASDEDSSTorresArts Max	76.635	98.865
T1-Level17	ASDEDSSTorresArts Max	67.154	87.596
T1-Level16	ASDEDSSTorresArts Max	61.719	78.593
T1-Level15	ASDEDSSTorresArts Max	67.520	81.517
T1-Level14	ASDEDSSTorresArts Max	59.269	70.125
T1-Level13	ASDEDSSTorresArts Max	53.791	64.171
T1-Level12	ASDEDSSTorresArts Max	49.252	59.804
T1-Level11	ASDEDSSTorresArts Max	46.010	56.636
T1-Level10	ASDEDSSTorresArts Max	43.782	53.910
T1-Level9	ASDEDSSTorresArts Max	41.864	51.285
T1-Level8	ASDEDSSTorresArts Max	39.602	48.807
T1-Level7	ASDEDSSTorresArts Max	36.924	46.506
T1-Level6	ASDEDSSTorresArts Max	34.271	44.260
T1-Level5	ASDEDSSTorresArts Max	31.544	41.372
T1-Level4	ASDEDSSTorresArts Max	28.057	37.244
T1-Level3	ASDEDSSTorresArts Max	24.012	32.369
T1-Level2	ASDEDSSTorresArts Max	19.927	26.893
T1-Level1	ASDEDSSTorresArts Max	15.832	20.554
T1-Ground Floor (L0)	ASDEDSSTorresArts Max	38.355	41.056
T1-Basement(L-1)	ASDEDSSTorresArts Max	16.092	13.814

Story	Load Case/Combo	FX	FY
		tonf	tonf
TORRE T2			
T2-Roof	ASDEDSSTorresArts Max	144.691	182.483
T2-Level20	ASDEDSSTorresArts Max	108.240	136.169
T2-Level19	ASDEDSSTorresArts Max	91.679	115.324
T2-Level18	ASDEDSSTorresArts Max	76.412	98.024
T2-Level17	ASDEDSSTorresArts Max	67.103	87.080
T2-Level16	ASDEDSSTorresArts Max	61.945	78.645
T2-Level15	ASDEDSSTorresArts Max	67.922	82.130
T2-Level14	ASDEDSSTorresArts Max	59.691	70.728
T2-Level13	ASDEDSSTorresArts Max	54.182	64.408
T2-Level12	ASDEDSSTorresArts Max	49.176	59.553
T2-Level11	ASDEDSSTorresArts Max	45.556	56.157
T2-Level10	ASDEDSSTorresArts Max	43.519	53.627
T2-Level9	ASDEDSSTorresArts Max	42.263	51.440
T2-Level8	ASDEDSSTorresArts Max	40.803	49.262
T2-Level7	ASDEDSSTorresArts Max	38.365	46.878
T2-Level6	ASDEDSSTorresArts Max	35.002	44.265
T2-Level5	ASDEDSSTorresArts Max	31.240	41.048
T2-Level4	ASDEDSSTorresArts Max	27.273	36.824
T2-Level3	ASDEDSSTorresArts Max	23.484	32.128
T2-Level2	ASDEDSSTorresArts Max	19.999	26.945
T2-Level1	ASDEDSSTorresArts Max	16.140	20.794
T2-Ground Floor (L0)	ASDEDSSTorresArts Max	42.568	43.470
T2-Basement(L-1)	ASDEDSSTorresArts Max	20.774	17.003

Story	Load Case/Combo	FX	FY
		tonf	tonf
TORRE T3			
T3-Roof	ASDEDSSTorresArts Max	133.613	132.913
T3-Level2	ASDEDSSTorresArts Max	120.023	123.858
T3-Level1	ASDEDSSTorresArts Max	49.287	53.215
T3-Ground Floor (L0)	ASDEDSSTorresArts Max	104.323	120.840
T3-Basement(L-1)	ASDEDSSTorresArts Max	33.526	37.296

Tabla 18: Fuerzas sísmicas sin el efecto de agrietamiento

5.9.2 Fuerzas sísmicas con el efecto de agrietamiento

Se muestran las fuerzas sísmicas sin reducir obtenidas en forma tabular para el caso con agrietamiento.

Story	Load Case/Combo	FX	FY
		tonf	tonf
TORRE T1			
T1-Roof	ASDEDSSTorresArts Max	126.594	168.508
T1-Level20	ASDEDSSTorresArts Max	93.292	119.607
T1-Level19	ASDEDSSTorresArts Max	78.188	96.339
T1-Level18	ASDEDSSTorresArts Max	65.311	78.810
T1-Level17	ASDEDSSTorresArts Max	57.446	68.005
T1-Level16	ASDEDSSTorresArts Max	52.492	59.394
T1-Level15	ASDEDSSTorresArts Max	57.570	59.940
T1-Level14	ASDEDSSTorresArts Max	50.867	50.494
T1-Level13	ASDEDSSTorresArts Max	46.274	45.915
T1-Level12	ASDEDSSTorresArts Max	42.168	43.289
T1-Level11	ASDEDSSTorresArts Max	38.791	41.877
T1-Level10	ASDEDSSTorresArts Max	35.818	40.818
T1-Level9	ASDEDSSTorresArts Max	33.100	39.859
T1-Level8	ASDEDSSTorresArts Max	31.344	39.134
T1-Level7	ASDEDSSTorresArts Max	31.188	38.653
T1-Level6	ASDEDSSTorresArts Max	32.104	38.159
T1-Level5	ASDEDSSTorresArts Max	32.671	36.888
T1-Level4	ASDEDSSTorresArts Max	31.760	34.207
T1-Level3	ASDEDSSTorresArts Max	29.092	30.572
T1-Level2	ASDEDSSTorresArts Max	24.718	26.141
T1-Level1	ASDEDSSTorresArts Max	19.022	20.646
T1-Ground Floor (L0)	ASDEDSSTorresArts Max	41.705	44.590
T1-Basement(L-1)	ASDEDSSTorresArts Max	16.869	15.653

Story	Load Case/Combo	FX	FY
		tonf	tonf
TORRE T2			
T2-Roof	ASDEDSSTorresArts Max	128.320	171.092
T2-Level20	ASDEDSSTorresArts Max	93.356	120.776
T2-Level19	ASDEDSSTorresArts Max	77.964	96.772
T2-Level18	ASDEDSSTorresArts Max	65.332	78.827
T2-Level17	ASDEDSSTorresArts Max	57.786	68.080
T2-Level16	ASDEDSSTorresArts Max	52.492	59.834
T2-Level15	ASDEDSSTorresArts Max	56.656	61.038
T2-Level14	ASDEDSSTorresArts Max	49.540	51.735
T2-Level13	ASDEDSSTorresArts Max	45.194	46.824
T2-Level12	ASDEDSSTorresArts Max	41.574	43.574
T2-Level11	ASDEDSSTorresArts Max	38.652	41.812
T2-Level10	ASDEDSSTorresArts Max	35.908	40.936
T2-Level9	ASDEDSSTorresArts Max	33.458	40.464
T2-Level8	ASDEDSSTorresArts Max	32.022	39.987
T2-Level7	ASDEDSSTorresArts Max	31.910	39.265
T2-Level6	ASDEDSSTorresArts Max	32.362	38.270
T2-Level5	ASDEDSSTorresArts Max	32.033	36.639
T2-Level4	ASDEDSSTorresArts Max	30.220	33.961
T2-Level3	ASDEDSSTorresArts Max	27.167	30.582
T2-Level2	ASDEDSSTorresArts Max	22.856	26.383
T2-Level1	ASDEDSSTorresArts Max	17.421	20.897
T2-Ground Floor (L0)	ASDEDSSTorresArts Max	40.869	46.562
T2-Basement(L-1)	ASDEDSSTorresArts Max	19.222	18.930

Story	Load Case/Combo	FX	FY
		tonf	tonf
TORRE T3			
T3-Roof	ASDEDSSTorresArts Max	136.330	136.079
T3-Level2	ASDEDSSTorresArts Max	113.137	119.249
T3-Level1	ASDEDSSTorresArts Max	44.609	49.371
T3-Ground Floor (L0)	ASDEDSSTorresArts Max	98.479	112.843
T3-Basement(L-1)	ASDEDSSTorresArts Max	32.218	34.544

Tabla 19: Fuerzas sísmicas con el efecto de agrietamiento

5.10 Reducción de fuerzas sísmicas

De acuerdo a lo establecido en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo deberá aplicarse un factor de reducción denominado Q', el cual para este proyecto se consideró como:

$$Q' = Q$$

5.11 Factor de comportamiento sísmico

Se descarta $Q = 4$ debido principalmente a que el edificio sin muros de concreto reforzado no es capaz de resistir el 50% de las fuerzas sísmicas reducidas.

Debido a que existen elementos estructurales no colados en el lugar, es decir elementos prefabricados, queda descartado el uso de $Q = 3$.

Se descarga $Q = 1.5$ debido a que no se cuenta con muros de mampostería que resistan las fuerzas laterales.

$Q = 1$ no aplica en ningún caso.

Finalmente se usó un $Q = 2$ para ambas torres debido al uso de elementos estructurales de concreto reforzado y prefabricado.

5.12 Condiciones de regularidad

Las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo establecen los siguientes requisitos para considerar a una estructura como regular, se presenta la siguiente tabla y se pretende justificar en un breve comentario o análisis el estado acerca del cumplimiento de cada punto.

Requisito	Torres 1 y 2		Torre 3	
	Cumple (SI/NO)	Comentario/Análisis	Cumple (SI/NO)	Comentario/Análisis
1 Su planta es sensiblemente simétrica con respecto a dos ejes ortogonales por lo que toca a masas, así como a muros y otros elementos resistentes. Éstos son, además, sensiblemente paralelos a los ejes ortogonales principales del edificio.	NO	No hay simetría con respecto al eje X a partir del nivel 16	NO	No se cumple en el nivel de alberca debido a la masa
2 La relación de su altura a la dimensión menor de su base no pasa de 2.5	NO	$h = 71.4 \text{ m}$; $a = 17.52 \text{ m}$	SI	$h = 10.2 \text{ m}$; $a = 14.46 \text{ m}$
3 La relación de largo a ancho de la base no excede de 2.5.	SI	$l = 31.33 \text{ m}$; $a = 17.52 \text{ m}$	SI	$l = 26.52 \text{ m}$; $a = 14.46 \text{ m}$
4 En planta no tiene entrantes ni salientes cuya dimensión exceda de 20 por ciento de la dimensión de la planta medida paralelamente a la dirección que se considera del entrante o saliente.	SI	Saliente mayor con una longitud igual a 1.88 m; menor a $0.2 \times 17.52 \text{ m}$ (3.5 m)	SI	No hay salientes
5 En cada nivel tiene un sistema de techo o piso rígido y resistente.	SI		SI	
6 No tiene aberturas en sus sistemas de techo o piso cuya dimensión exceda de 20 por ciento de la dimensión en planta medida paralelamente a la abertura; las áreas huecas no ocasionan asimetrías significativas ni difieren en posición de un piso a otro, y el área total de aberturas no excede en ningún nivel de 20 por ciento del área de la planta.	SI	Área total de aberturas = 72 m^2 ; menor a $0.2 \times 550 \text{ m}^2$ (110 m^2)	NO	Área total de aberturas = 160 m^2 ; mayor a $0.2 \times 380 \text{ m}^2$ (76 m^2)
7 El peso de cada nivel, incluyendo la carga viva que debe considerarse para diseño sísmico, no es mayor que 110 por ciento del correspondiente al piso inmediato inferior ni, excepción hecha del último nivel de la construcción, es menor que 70 por ciento de dicho peso.	SI		NO	El peso del nivel con alberca difiere considerablemente
8 Ningún piso tiene un área, delimitada por los paños exteriores de sus elementos resistentes verticales, mayor que 110 por ciento de la del piso inmediato inferior ni menor que 70 por ciento de ésta. Se exige de este último requisito únicamente al último piso de la construcción. Además, el área de ningún entrepiso excede en más de 50 por ciento a la menor de los pisos inferiores.	SI	Los paños exteriores son constantes en todos los entrepisos	SI	Los paños exteriores son constantes en todos los entrepisos
9 Todas las columnas están restringidas en todos los pisos en dos direcciones sensiblemente ortogonales por diafragmas horizontales y por trabes o losas planas.	SI		NO	No se cumple en el nivel de alberca
10 Ni la rigidez ni la resistencia al corte de ningún entrepiso difieren en más de 50 por ciento de la del entrepiso inmediatamente inferior. El último entrepiso queda excluido de este requisito.	NO	No se cumple en el primer entrepiso pero no se difiere en más del 100 %	NO	No se cumple en el primer entrepiso pero no se difiere en más del 100 %
11 En ningún entrepiso la excentricidad torsional calculada estáticamente, e_s , excede del diez por ciento de la dimensión en planta de ese entrepiso medida paralelamente a la excentricidad mencionada.	SI		NO	Las cargas por la alberca ocasionan excentricidad superior al 20% en la dirección X

Tabla 20: Condiciones de regularidad y comentarios

5.12.1 Requisitos incumplidos en torres 1 y 2

Las torres 1 y 2 por ser prácticamente idénticas se evaluaron de igual forma, resultando en un incumplimiento de 3 requisitos: 1, 2 y 10.

5.12.2 Requisitos incumplidos en torre 3

La torre 3 corresponde al edificio de amenidades y no satisface 6 requisitos, esto en gran parte a la incorporación de la alberca. Los requisitos que no se cumplen son: 1, 6, 7, 9, 10 y 11.

5.13 Estructura irregular

De acuerdo a la tabla anterior, se establece que una estructura que no satisfaga 1 o más requisitos será considerada como irregular.

5.14 Estructura fuertemente irregular

Una estructura que no cumpla los requisitos 10 y 11 de la tabla anterior, aumentando las restricciones al doble, será considerada como fuertemente irregular, es decir 100% de diferencia de rigidez lateral y 20% de excentricidad.

5.15 Conclusión sobre las condiciones de regularidad por torre

En base a los incisos 5.14 y 5.15, las torres 1 y 2 serán consideradas como estructuras irregulares y la torre 3 será considerada como estructura fuertemente irregular.

5.16 Corrección por irregularidad

Se establece que si no se cumple con dos o más requisitos de la tabla 20, el valor de Q' deberá multiplicarse por 0.8 para estructuras irregulares, e indistintamente por 0.7 para estructuras fuertemente irregulares. Se recuerda que las tres torres tienen un factor de comportamiento sísmico $Q = 2$, por lo que en resumen se tiene:

Torres 1 y 2	$Q' = Q \times 0.8$	es decir $Q' = 1.6$
Torre 3	$Q' = Q \times 0.7$	es decir $Q' = 1.4$

5.17 Fuerzas sísmicas reducidas

Las fuerzas sísmicas sin reducir mostradas en las tablas de los incisos 5.10.1 y 5.10.2 se dividen entre los respectivos valores de Q' .

5.17.1 Fuerzas sísmicas reducidas sin el efecto de agrietamiento

Se muestran las fuerzas sísmicas reducidas obtenidas en forma tabular para el caso sin agrietamiento.

Story	Load Case/Combo	FX	FY
		tonf	tonf
TORRE T1			
T1-Roof	ASDEDSSTorresArts Max	88.180	112.134
T1-Level20	ASDEDSSTorresArts Max	66.898	84.529
T1-Level19	ASDEDSSTorresArts Max	57.280	72.321
T1-Level18	ASDEDSSTorresArts Max	47.897	61.791
T1-Level17	ASDEDSSTorresArts Max	41.972	54.748
T1-Level16	ASDEDSSTorresArts Max	38.575	49.121
T1-Level15	ASDEDSSTorresArts Max	42.200	50.948
T1-Level14	ASDEDSSTorresArts Max	37.043	43.828
T1-Level13	ASDEDSSTorresArts Max	33.620	40.107
T1-Level12	ASDEDSSTorresArts Max	30.783	37.378
T1-Level11	ASDEDSSTorresArts Max	28.756	35.398
T1-Level10	ASDEDSSTorresArts Max	27.364	33.694
T1-Level9	ASDEDSSTorresArts Max	26.165	32.053
T1-Level8	ASDEDSSTorresArts Max	24.751	30.504
T1-Level7	ASDEDSSTorresArts Max	23.078	29.066
T1-Level6	ASDEDSSTorresArts Max	21.420	27.663
T1-Level5	ASDEDSSTorresArts Max	19.715	25.858
T1-Level4	ASDEDSSTorresArts Max	17.536	23.277
T1-Level3	ASDEDSSTorresArts Max	15.007	20.231
T1-Level2	ASDEDSSTorresArts Max	12.455	16.808
T1-Level1	ASDEDSSTorresArts Max	9.895	12.846
T1-Ground Floor (L0)	ASDEDSSTorresArts Max	23.972	25.660
T1-Basement(L-1)	ASDEDSSTorresArts Max	10.058	8.634
Cortante basal V₀		744.617	928.595

Story	Load Case/Combo	FX	FY
		tonf	tonf
TORRE T2			
T2-Roof	ASDEDSSTorresArts Max	90.432	114.052
T2-Level20	ASDEDSSTorresArts Max	67.650	85.106
T2-Level19	ASDEDSSTorresArts Max	57.299	72.077
T2-Level18	ASDEDSSTorresArts Max	47.757	61.265
T2-Level17	ASDEDSSTorresArts Max	41.939	54.425
T2-Level16	ASDEDSSTorresArts Max	38.715	49.153
T2-Level15	ASDEDSSTorresArts Max	42.451	51.331
T2-Level14	ASDEDSSTorresArts Max	37.307	44.205
T2-Level13	ASDEDSSTorresArts Max	33.863	40.255
T2-Level12	ASDEDSSTorresArts Max	30.735	37.220
T2-Level11	ASDEDSSTorresArts Max	28.473	35.098
T2-Level10	ASDEDSSTorresArts Max	27.199	33.517
T2-Level9	ASDEDSSTorresArts Max	26.414	32.150
T2-Level8	ASDEDSSTorresArts Max	25.502	30.789
T2-Level7	ASDEDSSTorresArts Max	23.978	29.299
T2-Level6	ASDEDSSTorresArts Max	21.876	27.666
T2-Level5	ASDEDSSTorresArts Max	19.525	25.655
T2-Level4	ASDEDSSTorresArts Max	17.046	23.015
T2-Level3	ASDEDSSTorresArts Max	14.677	20.080
T2-Level2	ASDEDSSTorresArts Max	12.499	16.840
T2-Level1	ASDEDSSTorresArts Max	10.087	12.996
T2-Ground Floor (L0)	ASDEDSSTorresArts Max	26.605	27.168
T2-Basement(L-1)	ASDEDSSTorresArts Max	12.984	10.627
Cortante basal V₀		755.016	933.989

Story	Load Case/Combo	FX	FY
		tonf	tonf
TORRE T3			
T3-Roof	ASDEDSSTorresArts Max	95.438	94.938
T3-Level2	ASDEDSSTorresArts Max	85.731	88.470
T3-Level1	ASDEDSSTorresArts Max	35.205	38.010
T3-Ground Floor (L0)	ASDEDSSTorresArts Max	74.516	86.314
T3-Basement(L-1)	ASDEDSSTorresArts Max	23.947	26.640
Cortante basal V₀		314.836	334.372

Tabla 21: Fuerzas sísmicas reducidas sin el efecto de agrietamiento

5.17.2 Fuerzas sísmicas reducidas con el efecto de agrietamiento

Se muestran las fuerzas sísmicas reducidas obtenidas en forma tabular para el caso con agrietamiento.

Story	Load Case/Combo	FX	FY
		tonf	tonf
TORRE T1			
T1-Roof	ASDEDSSTorresArts Max	79.121	105.317
T1-Level20	ASDEDSSTorresArts Max	58.307	74.754
T1-Level19	ASDEDSSTorresArts Max	48.867	60.212
T1-Level18	ASDEDSSTorresArts Max	40.820	49.256
T1-Level17	ASDEDSSTorresArts Max	35.903	42.503
T1-Level16	ASDEDSSTorresArts Max	32.808	37.121
T1-Level15	ASDEDSSTorresArts Max	35.981	37.463
T1-Level14	ASDEDSSTorresArts Max	31.792	31.559
T1-Level13	ASDEDSSTorresArts Max	28.921	28.697
T1-Level12	ASDEDSSTorresArts Max	26.355	27.056
T1-Level11	ASDEDSSTorresArts Max	24.244	26.173
T1-Level10	ASDEDSSTorresArts Max	22.386	25.511
T1-Level9	ASDEDSSTorresArts Max	20.687	24.912
T1-Level8	ASDEDSSTorresArts Max	19.590	24.459
T1-Level7	ASDEDSSTorresArts Max	19.493	24.158
T1-Level6	ASDEDSSTorresArts Max	20.065	23.849
T1-Level5	ASDEDSSTorresArts Max	20.419	23.055
T1-Level4	ASDEDSSTorresArts Max	19.850	21.379
T1-Level3	ASDEDSSTorresArts Max	18.183	19.107
T1-Level2	ASDEDSSTorresArts Max	15.449	16.338
T1-Level1	ASDEDSSTorresArts Max	11.889	12.904
T1-Ground Floor (L0)	ASDEDSSTorresArts Max	26.065	27.869
T1-Basement(L-1)	ASDEDSSTorresArts Max	10.543	9.783
Cortante basal V ₀		667.739	773.435

Story	Load Case/Combo	FX	FY
		tonf	tonf
TORRE T2			
T2-Roof	ASDEDSSTorresArts Max	80.200	106.932
T2-Level20	ASDEDSSTorresArts Max	58.347	75.485
T2-Level19	ASDEDSSTorresArts Max	48.727	60.482
T2-Level18	ASDEDSSTorresArts Max	40.833	49.267
T2-Level17	ASDEDSSTorresArts Max	36.116	42.550
T2-Level16	ASDEDSSTorresArts Max	32.807	37.396
T2-Level15	ASDEDSSTorresArts Max	35.410	38.148
T2-Level14	ASDEDSSTorresArts Max	30.963	32.334
T2-Level13	ASDEDSSTorresArts Max	28.247	29.265
T2-Level12	ASDEDSSTorresArts Max	25.984	27.234
T2-Level11	ASDEDSSTorresArts Max	24.157	26.132
T2-Level10	ASDEDSSTorresArts Max	22.442	25.585
T2-Level9	ASDEDSSTorresArts Max	20.911	25.290
T2-Level8	ASDEDSSTorresArts Max	20.014	24.992
T2-Level7	ASDEDSSTorresArts Max	19.944	24.541
T2-Level6	ASDEDSSTorresArts Max	20.226	23.918
T2-Level5	ASDEDSSTorresArts Max	20.021	22.899
T2-Level4	ASDEDSSTorresArts Max	18.887	21.225
T2-Level3	ASDEDSSTorresArts Max	16.980	19.114
T2-Level2	ASDEDSSTorresArts Max	14.285	16.490
T2-Level1	ASDEDSSTorresArts Max	10.888	13.061
T2-Ground Floor (L0)	ASDEDSSTorresArts Max	25.543	29.101
T2-Basement(L-1)	ASDEDSSTorresArts Max	12.013	11.832
Cortante basal V ₀		663.944	783.274

Story	Load Case/Combo	FX	FY
		tonf	tonf
TORRE T3			
T3-Roof	ASDEDSSTorresArts Max	97.379	97.199
T3-Level2	ASDEDSSTorresArts Max	80.812	85.178
T3-Level1	ASDEDSSTorresArts Max	31.863	35.265
T3-Ground Floor (L0)	ASDEDSSTorresArts Max	70.342	80.602
T3-Basement(L-1)	ASDEDSSTorresArts Max	23.013	24.674
Cortante basal V ₀		303.409	322.918

Tabla 22: Fuerzas sísmicas reducidas con el efecto de agrietamiento

5.18 Cortante basal mínimo

En la dirección de análisis, el cortante basal de las fuerzas sísmicas reducidas denominado V₀ no debe ser menor que

$$0.8 \text{ a } \frac{W_0}{Q'}$$

de ser el caso, todas las fuerzas sísmicas deberán incrementarse proporcionalmente de manera que el cortante basal V₀ iguale esta cantidad, la cual en este documento será denominada como V_{min 1}, en esta cantidad a es la aceleración espectral y W₀ es el peso del edificio considerado para el análisis sísmico.

Independientemente del valor anterior en ningún caso el cortante basal V₀ será menor que

$$a_0 W_0$$

a quien se denominó como V_{min 2} y donde a₀ es el valor de la ordenada espectral correspondiente a T = 0 s

5.19 Peso total de cada edificio

En la tabla 9 mostrada en la sección 5.5 se muestran valores de masa acumulada para cada torre, de ahí se obtendrá el peso de las mismas multiplicando el valor de masa acumulada en la base (*Basement (L-1)*) por la aceleración debida a la gravedad considerada en el análisis, la cual fue $g = 9.806650201 \text{ m/s}^2$, esto resulta en los siguientes valores:

Masas		
Torre T1	Torre T2	Torre T3
Cumulative Mass	Cumulative Mass	Cumulative Mass
tonf-s ² /m	tonf-s ² /m	tonf-s ² /m
1807.76434	1835.21005	287.62502
Pesos		
tonf	tonf	tonf
17728.11253	17997.26301	2820.63796

Tabla 23: Peso total de cada torre

5.20 Ordenadas espectrales

En la sección 5.3 se presenta el valor espectral $a_0 = 0.06$ y el espectro de diseño sísmico, de este último se obtienen las siguientes ordenadas espectrales que corresponden al periodo fundamental de cada torre para cada dirección de análisis.

Periodos Fundamentales					
Torre T1		Torre T2		Torre T3	
Tx	Ty	Tx	Ty	Tx	Ty
sec	sec	sec	sec	sec	sec
2.128	2.01	2.119	2.004	0.546	0.506
Ordenada espectral					
0.11372	0.12040	0.11420	0.12076	0.22000	0.22000

Tabla 24: Ordenadas espectrales sin el efecto de agrietamiento

Periodos Fundamentales					
Torre T1		Torre T2		Torre T3	
Tx	Ty	Tx	Ty	Tx	Ty
sec	sec	sec	sec	sec	sec
2.489	2.456	2.477	2.451	0.665	0.609
Ordenada espectral					
0.09723	0.09853	0.09770	0.09874	0.22000	0.22000

Tabla 25: Ordenadas espectrales con el efecto de agrietamiento

5.21 Cálculo del cortante basal mínimo

Se muestran los cálculos del cortante basal mínimo ($V_{\min 1}$ y $V_{\min 2}$) para cada dirección de análisis según lo establecido en la sección 5.19 donde para cada dirección deberá aplicarse el mayor de ambos valores, el cual se ha denominado como V_{\min} . Se muestran los valores obtenidos para cuando se considera el efecto del agrietamiento y cuando no.

Minimum base shear requirements						
Torre T1		Torre T2		Torre T3		
Xdir	Ydir	Xdir	Ydir	Xdir	Ydir	
tonf	tonf	tonf	tonf	tonf	tonf	
$V_{\min 1}$	1008.036	1067.215	1027.687	1086.661	354.594	354.594
$V_{\min 2}$	1063.687		1079.836		169.238	
V_{\min}	1063.687	1067.215	1079.836	1086.661	354.594	354.594

Tabla 26: Cortante basal mínimo sin el efecto de agrietamiento

Minimum base shear requirements						
Torre T1		Torre T2		Torre T3		
Xdir	Ydir	Xdir	Ydir	Xdir	Ydir	
tonf	tonf	tonf	tonf	tonf	tonf	
$V_{\min 1}$	861.833	873.413	879.156	888.482	354.594	354.594
$V_{\min 2}$	1063.687		1079.836		169.238	
V_{\min}	1063.687	1063.687	1079.836	1079.836	354.594	354.594

Tabla 27: Cortante basal mínimo con el efecto de agrietamiento

En las tablas de la sección 5.18 se muestra el cortante basal V_o de cada torre, comparando estos valores con los obtenidos en las tablas 26 y 27 se determina que todas las fuerzas sísmicas deberán aumentarse proporcionalmente para cumplir con lo establecido en la sección 5.19.

5.22 Factor de corrección

Como las fuerzas sísmicas reducidas no cumplen con el cortante basal mínimo se procede a aumentarlas proporcionalmente multiplicándolas por el factor

$$FC_{V_{\min}} = V_{\min} / V_o \quad ,$$

que por obvias razones es mayor que la unidad. Este paso fue necesario debido a que todos los cortantes basales están por debajo del mínimo, en caso contrario deberá omitirse.

Factor de corrección FC para cumplir con V_{min}					
TORRE T1					
Dirección X			Dirección Y		
V_o	V_{min}	FC_{Vmin}	V_o	V_{min}	FC_{Vmin}
tonf	tonf		tonf	tonf	
744.617	1063.687	1.42850	928.595	1067.215	1.14928
TORRE T2					
Dirección X			Dirección Y		
V_o	V_{min}	FC_{Vmin}	V_o	V_{min}	FC_{Vmin}
tonf	tonf		tonf	tonf	
755.016	1079.836	1.43022	933.989	1086.661	1.16346
TORRE T3					
Dirección X			Dirección Y		
V_o	V_{min}	FC_{Vmin}	V_o	V_{min}	FC_{Vmin}
tonf	tonf		tonf	tonf	
314.836	354.594	1.12628	334.372	354.594	1.06048

Tabla 28: Factores de corrección para cortante basal mínimo sin el efecto de agrietamiento

Factor de corrección FC para cumplir con V_{min}					
TORRE T1					
Dirección X			Dirección Y		
V_o	V_{min}	FC_{Vmin}	V_o	V_{min}	FC_{Vmin}
tonf	tonf		tonf	tonf	
667.739	1063.687	1.59297	773.435	1063.687	1.37528
TORRE T2					
Dirección X			Dirección Y		
V_o	V_{min}	FC_{Vmin}	V_o	V_{min}	FC_{Vmin}
tonf	tonf		tonf	tonf	
663.944	1079.836	1.62640	783.274	1079.836	1.37862
TORRE T3					
Dirección X			Dirección Y		
V_o	V_{min}	FC_{Vmin}	V_o	V_{min}	FC_{Vmin}
tonf	tonf		tonf	tonf	
303.409	354.594	1.16870	322.918	354.594	1.09809

Tabla 29: Factores de corrección para cortante basal mínimo con el efecto de agrietamiento

5.23 Fuerzas sísmicas finales

Las fuerzas sísmicas finales para el diseño de los elementos estructurales se obtienen multiplicando las fuerzas sísmicas reducidas de la sección 5.18 por los respectivos factores de corrección de la sección anterior. Debe recordarse que el procedimiento para su obtención fue en base a la aplicación de un reglamento de construcción que en este caso fue el de la ciudad de Puebla, con la ayuda de los lineamientos establecidos en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Distrito Federal del año 2004.

Story	Load Case/Combo	FX	FY
		tonf	tonf
TORRE T1			
T1-Roof	ASDEDSSTorresArts Max	125.965	128.873
T1-Level20	ASDEDSSTorresArts Max	95.564	97.148
T1-Level19	ASDEDSSTorresArts Max	81.825	83.117
T1-Level18	ASDEDSSTorresArts Max	68.421	71.015
T1-Level17	ASDEDSSTorresArts Max	59.956	62.920
T1-Level16	ASDEDSSTorresArts Max	55.104	56.453
T1-Level15	ASDEDSSTorresArts Max	60.283	58.554
T1-Level14	ASDEDSSTorresArts Max	52.916	50.371
T1-Level13	ASDEDSSTorresArts Max	48.026	46.094
T1-Level12	ASDEDSSTorresArts Max	43.973	42.957
T1-Level11	ASDEDSSTorresArts Max	41.078	40.682
T1-Level10	ASDEDSSTorresArts Max	39.089	38.724
T1-Level9	ASDEDSSTorresArts Max	37.377	36.838
T1-Level8	ASDEDSSTorresArts Max	35.357	35.058
T1-Level7	ASDEDSSTorresArts Max	32.967	33.405
T1-Level6	ASDEDSSTorresArts Max	30.598	31.792
T1-Level5	ASDEDSSTorresArts Max	28.163	29.718
T1-Level4	ASDEDSSTorresArts Max	25.050	26.752
T1-Level3	ASDEDSSTorresArts Max	21.438	23.251
T1-Level2	ASDEDSSTorresArts Max	17.791	19.317
T1-Level1	ASDEDSSTorresArts Max	14.135	14.764
T1-Ground Floor (L0)	ASDEDSSTorresArts Max	34.244	29.490
T1-Basement(L-1)	ASDEDSSTorresArts Max	14.367	9.923
Cortante basal V_{min}		1063.687	1067.215

Tabla 30: Fuerzas sísmicas finales en la torre T1 sin el efecto de agrietamiento

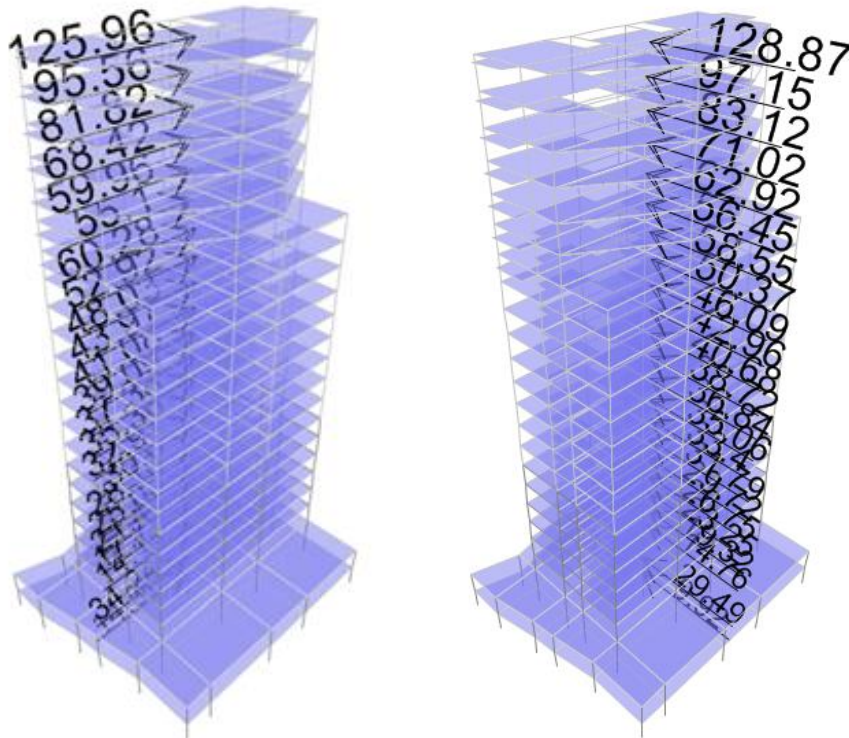


Figura 28: Fuerzas sísmicas finales en la torre T1 sin el efecto de agrietamiento

Story	Load Case/Combo	FX	FY
		tonf	tonf
TORRE T2			
T2-Roof	ASDEDSSTorresArts Max	129.338	132.695
T2-Level20	ASDEDSSTorresArts Max	96.754	99.017
T2-Level19	ASDEDSSTorresArts Max	81.951	83.859
T2-Level18	ASDEDSSTorresArts Max	68.303	71.279
T2-Level17	ASDEDSSTorresArts Max	59.982	63.321
T2-Level16	ASDEDSSTorresArts Max	55.371	57.188
T2-Level15	ASDEDSSTorresArts Max	60.715	59.722
T2-Level14	ASDEDSSTorresArts Max	53.357	51.431
T2-Level13	ASDEDSSTorresArts Max	48.432	46.835
T2-Level12	ASDEDSSTorresArts Max	43.958	43.305
T2-Level11	ASDEDSSTorresArts Max	40.722	40.835
T2-Level10	ASDEDSSTorresArts Max	38.901	38.996
T2-Level9	ASDEDSSTorresArts Max	37.778	37.405
T2-Level8	ASDEDSSTorresArts Max	36.473	35.821
T2-Level7	ASDEDSSTorresArts Max	34.294	34.088
T2-Level6	ASDEDSSTorresArts Max	31.288	32.188
T2-Level5	ASDEDSSTorresArts Max	27.925	29.848
T2-Level4	ASDEDSSTorresArts Max	24.379	26.777
T2-Level3	ASDEDSSTorresArts Max	20.992	23.362
T2-Level2	ASDEDSSTorresArts Max	17.877	19.593
T2-Level1	ASDEDSSTorresArts Max	14.427	15.121
T2-Ground Floor (L0)	ASDEDSSTorresArts Max	38.051	31.610
T2-Basement(L-1)	ASDEDSSTorresArts Max	18.570	12.364
Cortante basal V_{min}		1079.836	1086.661

Tabla 31: Fuerzas sísmicas finales en la torre T2 sin el efecto de agrietamiento

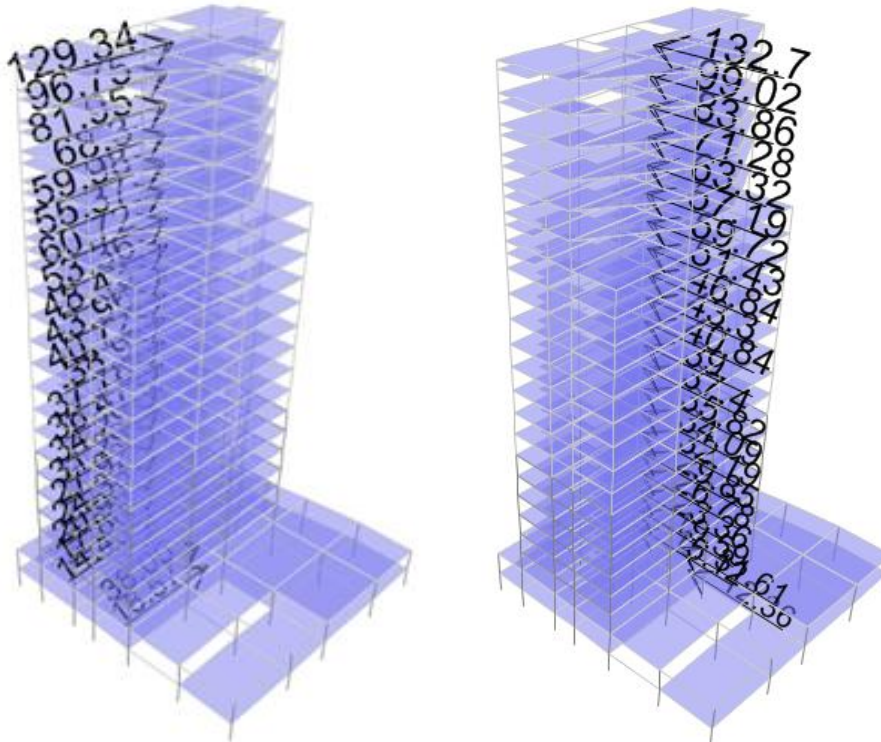


Figura 29: Fuerzas sísmicas finales en la torre T2 sin el efecto de agrietamiento

Story	Load Case/Combo	FX	FY
		tonf	tonf
TORRE T3			
T3-Roof	ASDEDSSTorresArts Max	107.490	100.680
T3-Level2	ASDEDSSTorresArts Max	96.557	93.820
T3-Level1	ASDEDSSTorresArts Max	39.650	40.309
T3-Ground Floor (L0)	ASDEDSSTorresArts Max	83.926	91.534
T3-Basement(L-1)	ASDEDSSTorresArts Max	26.971	28.251
Cortante basal V_{min}		354.594	354.594

Tabla 32: Fuerzas sísmicas finales en la torre T3 sin el efecto de agrietamiento

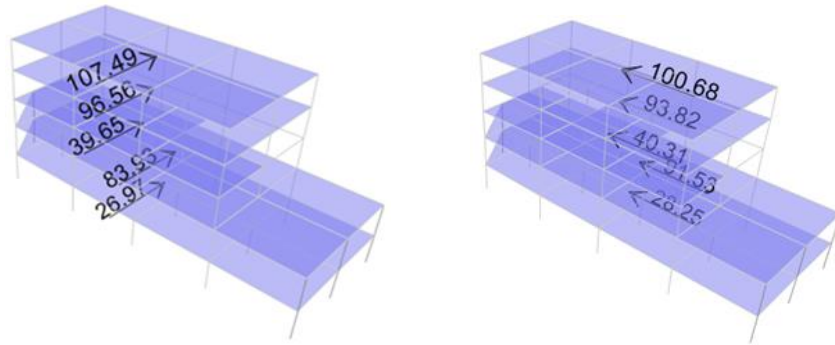


Figura 30: Fuerzas sísmicas finales en la torre T3 sin el efecto de agrietamiento

Story	Load Case/Combo	FX	FY
		tonf	tonf
TORRE T1			
T1-Roof	ASDEDSSTorresArts Max	126.038	144.840
T1-Level20	ASDEDSSTorresArts Max	92.882	102.808
T1-Level19	ASDEDSSTorresArts Max	77.844	82.808
T1-Level18	ASDEDSSTorresArts Max	65.024	67.741
T1-Level17	ASDEDSSTorresArts Max	57.193	58.453
T1-Level16	ASDEDSSTorresArts Max	52.262	51.052
T1-Level15	ASDEDSSTorresArts Max	57.317	51.522
T1-Level14	ASDEDSSTorresArts Max	50.643	43.402
T1-Level13	ASDEDSSTorresArts Max	46.070	39.466
T1-Level12	ASDEDSSTorresArts Max	41.983	37.209
T1-Level11	ASDEDSSTorresArts Max	38.620	35.995
T1-Level10	ASDEDSSTorresArts Max	35.661	35.085
T1-Level9	ASDEDSSTorresArts Max	32.954	34.261
T1-Level8	ASDEDSSTorresArts Max	31.206	33.637
T1-Level7	ASDEDSSTorresArts Max	31.051	33.224
T1-Level6	ASDEDSSTorresArts Max	31.963	32.799
T1-Level5	ASDEDSSTorresArts Max	32.527	31.707
T1-Level4	ASDEDSSTorresArts Max	31.620	29.402
T1-Level3	ASDEDSSTorresArts Max	28.964	26.278
T1-Level2	ASDEDSSTorresArts Max	24.610	22.469
T1-Level1	ASDEDSSTorresArts Max	18.938	17.746
T1-Ground Floor (L0)	ASDEDSSTorresArts Max	41.521	38.327
T1-Basement(L-1)	ASDEDSSTorresArts Max	16.795	13.455
Cortante basal V_{min}		1063.687	1063.687

Tabla 33: Fuerzas sísmicas finales en la torre T1 con el efecto de agrietamiento

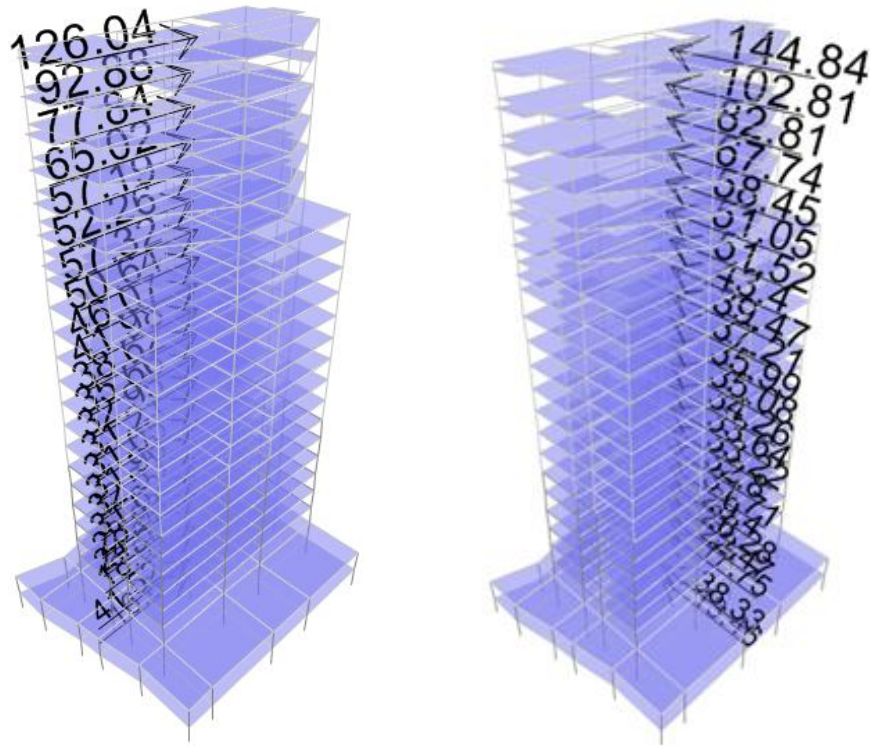


Figura 31: Fuerzas sísmicas finales en la torre T1 con el efecto de agrietamiento

Story	Load Case/Combo	FX	FY
		tonf	tonf
TORRE T2			
T2-Roof	ASDEDSSTorresArts Max	130.436	147.419
T2-Level20	ASDEDSSTorresArts Max	94.896	104.065
T2-Level19	ASDEDSSTorresArts Max	79.250	83.382
T2-Level18	ASDEDSSTorresArts Max	66.410	67.920
T2-Level17	ASDEDSSTorresArts Max	58.739	58.660
T2-Level16	ASDEDSSTorresArts Max	53.358	51.555
T2-Level15	ASDEDSSTorresArts Max	57.591	52.592
T2-Level14	ASDEDSSTorresArts Max	50.358	44.577
T2-Level13	ASDEDSSTorresArts Max	45.940	40.345
T2-Level12	ASDEDSSTorresArts Max	42.260	37.545
T2-Level11	ASDEDSSTorresArts Max	39.289	36.027
T2-Level10	ASDEDSSTorresArts Max	36.500	35.272
T2-Level9	ASDEDSSTorresArts Max	34.010	34.866
T2-Level8	ASDEDSSTorresArts Max	32.550	34.455
T2-Level7	ASDEDSSTorresArts Max	32.436	33.832
T2-Level6	ASDEDSSTorresArts Max	32.896	32.974
T2-Level5	ASDEDSSTorresArts Max	32.561	31.569
T2-Level4	ASDEDSSTorresArts Max	30.718	29.262
T2-Level3	ASDEDSSTorresArts Max	27.616	26.351
T2-Level2	ASDEDSSTorresArts Max	23.233	22.733
T2-Level1	ASDEDSSTorresArts Max	17.708	18.006
T2-Ground Floor (L0)	ASDEDSSTorresArts Max	41.543	40.119
T2-Basement(L-1)	ASDEDSSTorresArts Max	19.539	16.311
Cortante basal V_{min}		1079.836	1079.836

Tabla 34: Fuerzas sísmicas finales en la torre T2 con el efecto de agrietamiento

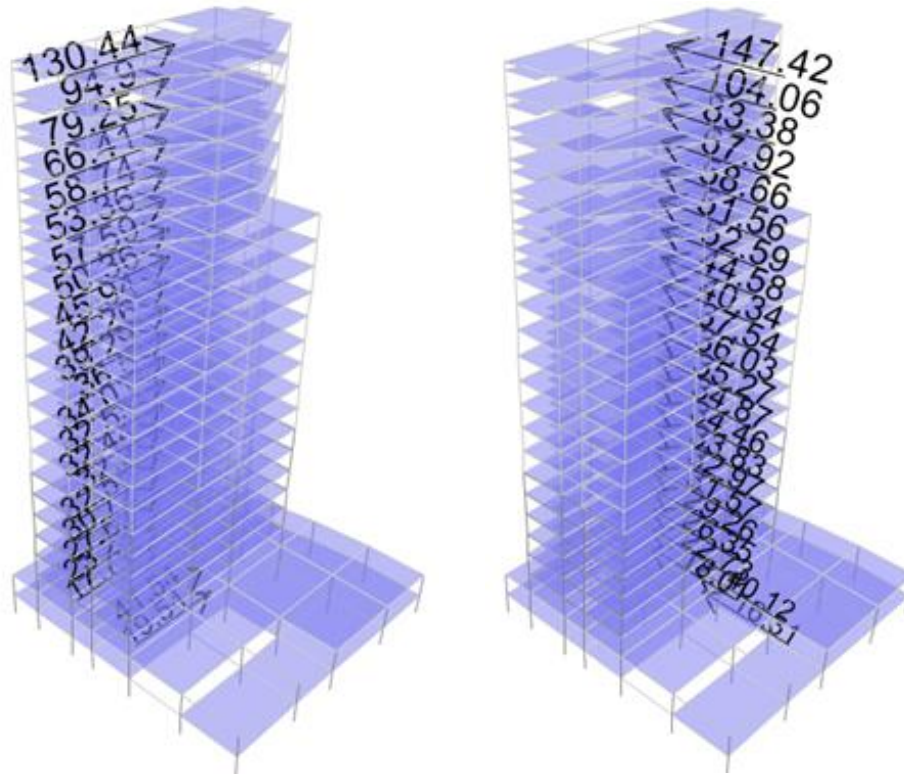


Figura 32: Fuerzas sísmicas finales en la torre T2 con el efecto de agrietamiento

Story	Load Case/Combo	FX	FY
		tonf	tonf
TORRE T3			
T3-Roof	ASDEDSSTorresArts Max	113.807	106.734
T3-Level2	ASDEDSSTorresArts Max	94.445	93.534
T3-Level1	ASDEDSSTorresArts Max	37.239	38.724
T3-Ground Floor (L0)	ASDEDSSTorresArts Max	82.209	88.509
T3-Basement(L-1)	ASDEDSSTorresArts Max	26.895	27.094
Cortante basal V_{min}		354.594	354.594

Tabla 35: Fuerzas sísmicas finales en la torre T3 con el efecto de agrietamiento

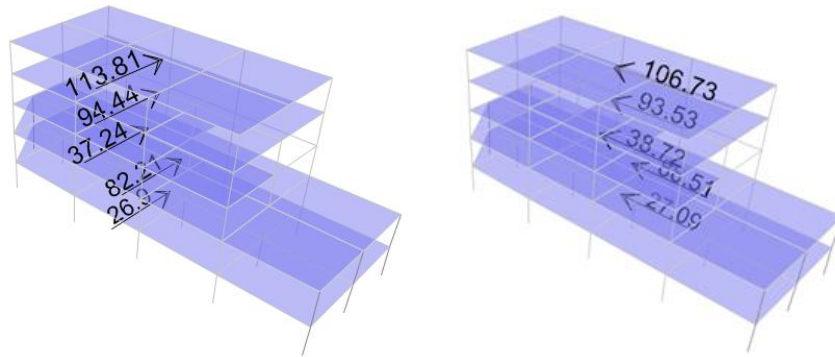


Figura 33: Fuerzas sísmicas finales en la torre T3 con el efecto de agrietamiento

5.24 Combinaciones de diseño por sismo

El diseño de los elementos debe tomar en cuenta efectos sísmicos bidireccionales, esto se realiza aplicando las fuerzas sísmicas como $\pm 100\%$ y $\pm 30\%$ en la dirección paralela y perpendicular de análisis, respectivamente, resultando en un total de 32 combinaciones posibles, además esto debe ser trasladando un $\pm 10\%$ a las fuerzas sísmicas para considerar una excentricidad accidental (b es la dimensión de la planta del entrepiso que se analiza, medida perpendicularmente a la dirección de análisis). Es necesario incorporar a las combinaciones anteriores el factor de carga para diseño por sismo $FC = 1.1$.

Se presentan a continuación las combinaciones utilizadas para diseño por sismo:

#	Combinaciones de diseño sísmico		
1	CombDS1-1	1.1	(Dead + CM + Wa) + (1.10 SXe+ + 0.33 SYe+)
2	CombDS1-2	1.1	(Dead + CM + Wa) + (1.10 SXe+ + -0.33 SYe+)
3	CombDS1-3	1.1	(Dead + CM + Wa) + (-1.10 SXe+ + 0.33 SYe+)
4	CombDS1-4	1.1	(Dead + CM + Wa) + (-1.10 SXe+ + -0.33 SYe+)
5	CombDS1-5	1.1	(Dead + CM + Wa) + (0.33 SXe+ + 1.10 SYe+)
6	CombDS1-6	1.1	(Dead + CM + Wa) + (0.33 SXe+ + -1.10 SYe+)
7	CombDS1-7	1.1	(Dead + CM + Wa) + (-0.33 SXe+ + 1.10 SYe+)
8	CombDS1-8	1.1	(Dead + CM + Wa) + (-0.33 SXe+ + -1.10 SYe+)
9	CombDS2-1	1.1	(Dead + CM + Wa) + (1.10 SXe+ + 0.33 SYe-)
10	CombDS2-2	1.1	(Dead + CM + Wa) + (1.10 SXe+ + -0.33 SYe-)
11	CombDS2-3	1.1	(Dead + CM + Wa) + (-1.10 SXe+ + 0.33 SYe-)
12	CombDS2-4	1.1	(Dead + CM + Wa) + (-1.10 SXe+ + -0.33 SYe-)
13	CombDS2-5	1.1	(Dead + CM + Wa) + (0.33 SXe+ + 1.10 SYe-)
14	CombDS2-6	1.1	(Dead + CM + Wa) + (0.33 SXe+ + -1.10 SYe-)
15	CombDS2-7	1.1	(Dead + CM + Wa) + (-0.33 SXe+ + 1.10 SYe-)
16	CombDS2-8	1.1	(Dead + CM + Wa) + (-0.33 SXe+ + -1.10 SYe-)
17	CombDS3-1	1.1	(Dead + CM + Wa) + (1.10 SXe- + 0.33 SYe-)
18	CombDS3-2	1.1	(Dead + CM + Wa) + (1.10 SXe- + -0.33 SYe-)
19	CombDS3-3	1.1	(Dead + CM + Wa) + (-1.10 SXe- + 0.33 SYe-)
20	CombDS3-4	1.1	(Dead + CM + Wa) + (-1.10 SXe- + -0.33 SYe-)
21	CombDS3-5	1.1	(Dead + CM + Wa) + (0.33 SXe- + 1.10 SYe-)
22	CombDS3-6	1.1	(Dead + CM + Wa) + (0.33 SXe- + -1.10 SYe-)
23	CombDS3-7	1.1	(Dead + CM + Wa) + (-0.33 SXe- + 1.10 SYe-)
24	CombDS3-8	1.1	(Dead + CM + Wa) + (-0.33 SXe- + -1.10 SYe-)
25	CombDS4-1	1.1	(Dead + CM + Wa) + (1.10 SXe- + 0.33 SYe+)
26	CombDS4-2	1.1	(Dead + CM + Wa) + (1.10 SXe- + -0.33 SYe+)
27	CombDS4-3	1.1	(Dead + CM + Wa) + (-1.10 SXe- + 0.33 SYe+)
28	CombDS4-4	1.1	(Dead + CM + Wa) + (-1.10 SXe- + -0.33 SYe+)
29	CombDS4-5	1.1	(Dead + CM + Wa) + (0.33 SXe- + 1.10 SYe+)
30	CombDS4-6	1.1	(Dead + CM + Wa) + (0.33 SXe- + -1.10 SYe+)
31	CombDS4-7	1.1	(Dead + CM + Wa) + (-0.33 SXe- + 1.10 SYe+)
32	CombDS4-8	1.1	(Dead + CM + Wa) + (-0.33 SXe- + -1.10 SYe+)

Tabla 36: Combinaciones sísmicas considerando factor de carga, efectos bidireccionales y excentricidad accidental

Aunque no corresponde a este capítulo y a esta sección, no debe olvidarse el diseño por gravedad incorporando un factor de carga $FC = 1.4$:

#	Combinacion de diseño por gravedad
33	CombDG 1.4 (Dead + CM + Wm)

Tabla 37: Combinación por gravedad considerando el factor de carga

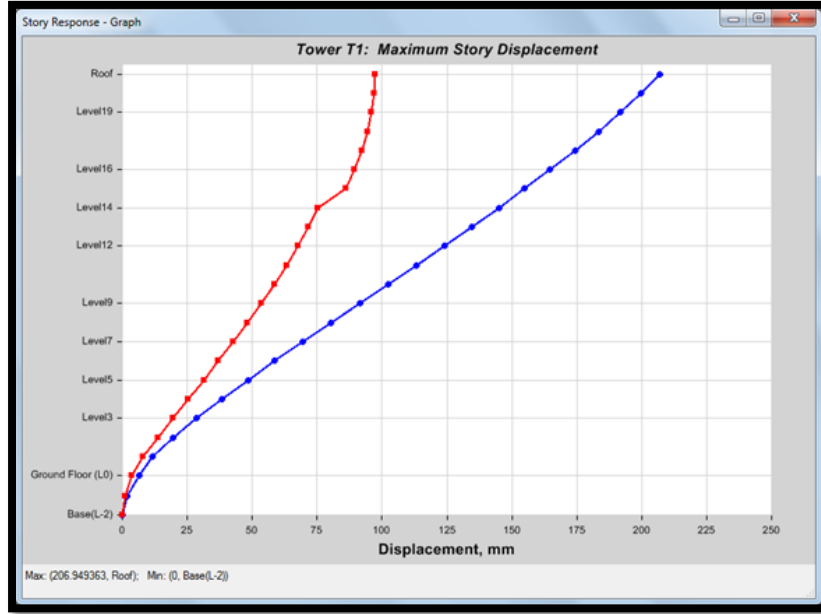
5.25 Revisión de desplazamientos laterales

El análisis de los desplazamientos laterales se realiza con un factor de carga $FC = 1$, además de un incremento igual al factor de comportamiento sísmico Q que para este proyecto se recuerda resultó igual a 2, resultando en un factor que se denominó como factor de corrección para los desplazamientos laterales y que es igual a

$$FC_{\Delta} = \frac{Q}{FC_{sis}} = \frac{2}{1.1} = \frac{20}{11},$$

este factor multiplica a los desplazamientos laterales producidos por las combinaciones de la sección 5.25 y así se obtienen los desplazamientos máximos corregidos. Se analizaron 32 combinaciones por lo que existe el mismo número de configuraciones de desplazamientos, para el objetivo de este documento solo se presentan los más desfavorables para la dirección X y Y por cada torre, además esto se presenta para los casos con y sin efectos de agrietamiento. Se muestran gráficas con los desplazamientos máximos absolutos y se muestra numéricamente el valor máximo de desplazamiento lateral que corresponde al obtenido en el nivel de azotea.

5.25.1 Desplazamientos máximos en Torre T1 sin el efecto de agrietamiento

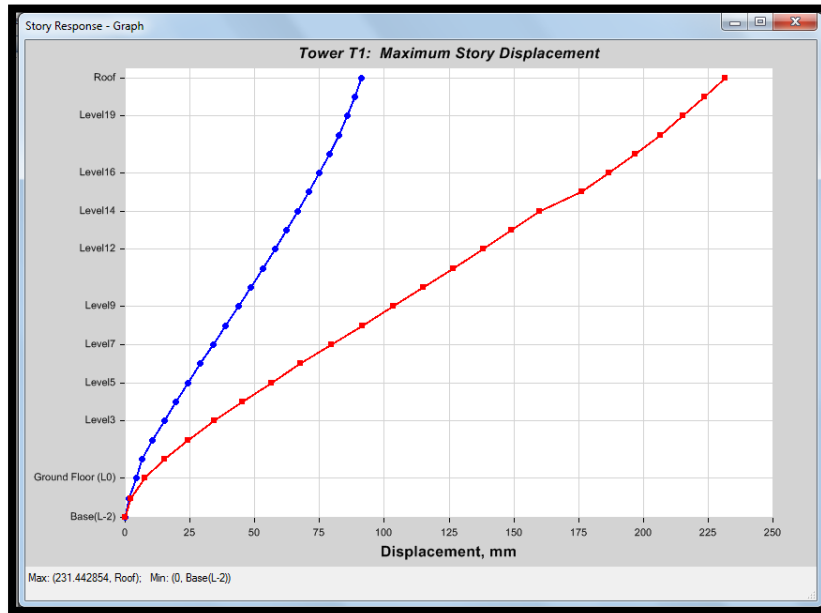


CombDS4-1

$$\Delta_{\text{máx } X} = 113.8 \text{ mm};$$

$$FC_{\Delta} * \Delta_{\text{máx } X} = 206.9 \text{ mm}$$

Gráfica 5: Torre T1: Desplazamientos máximos en X sin el efecto de agrietamiento (Azul Δ_x ; Rojo Δ_y)



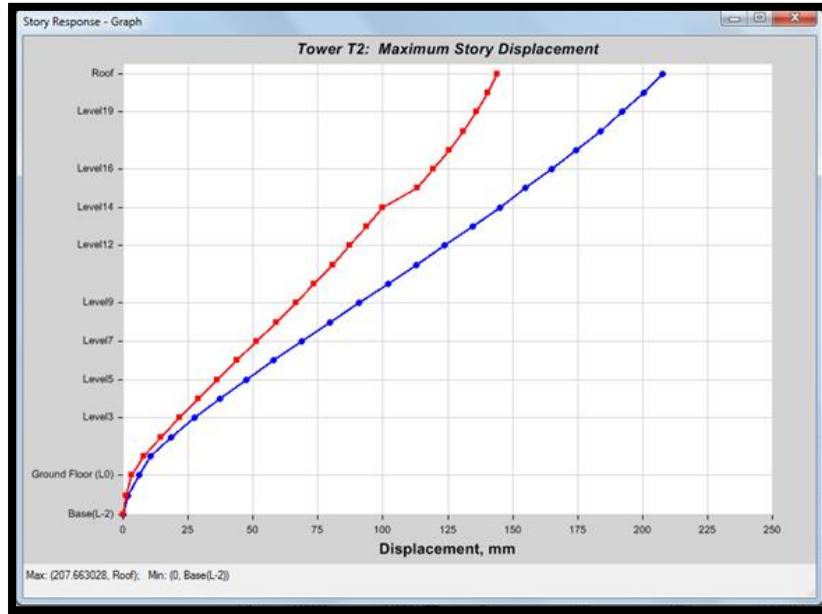
CombDS4-8

$$\Delta_{\text{máx } Y} = 127.3 \text{ mm};$$

$$FC_{\Delta} * \Delta_{\text{máx } Y} = 231.4 \text{ mm}$$

Gráfica 6: Torre T1: Desplazamientos máximos en Y sin el efecto de agrietamiento (Azul Δ_x ; Rojo Δ_y)

5.25.2 Desplazamientos máximos en Torre T2 sin el efecto de agrietamiento

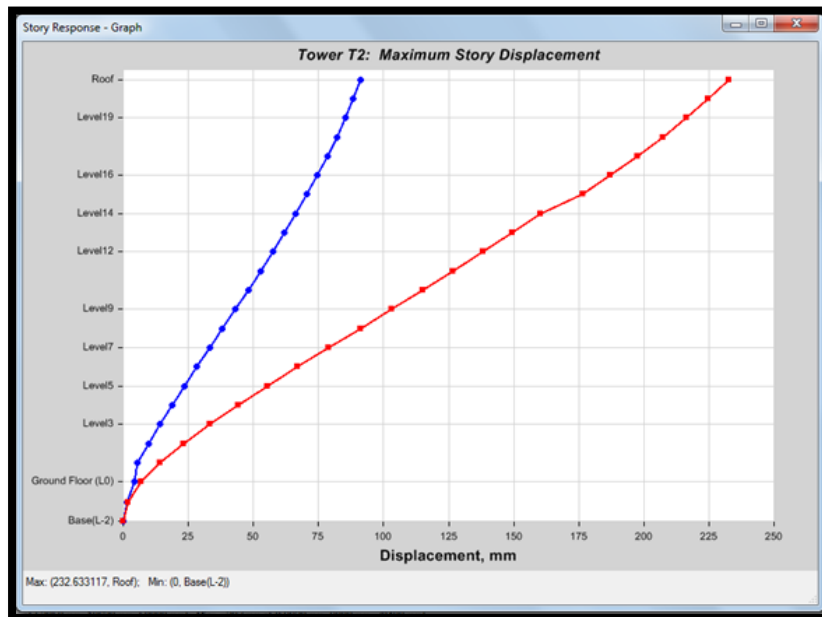


CombDS3-2

$$\Delta_{\text{máx } X} = 114.2 \text{ mm};$$

$$FC_{\Delta} * \Delta_{\text{máx } X} = 207.7 \text{ mm}$$

Gráfica 7: Torre T2: Desplazamientos máximos en X sin el efecto de agrietamiento (Azul Δ_x ; Rojo Δ_y)



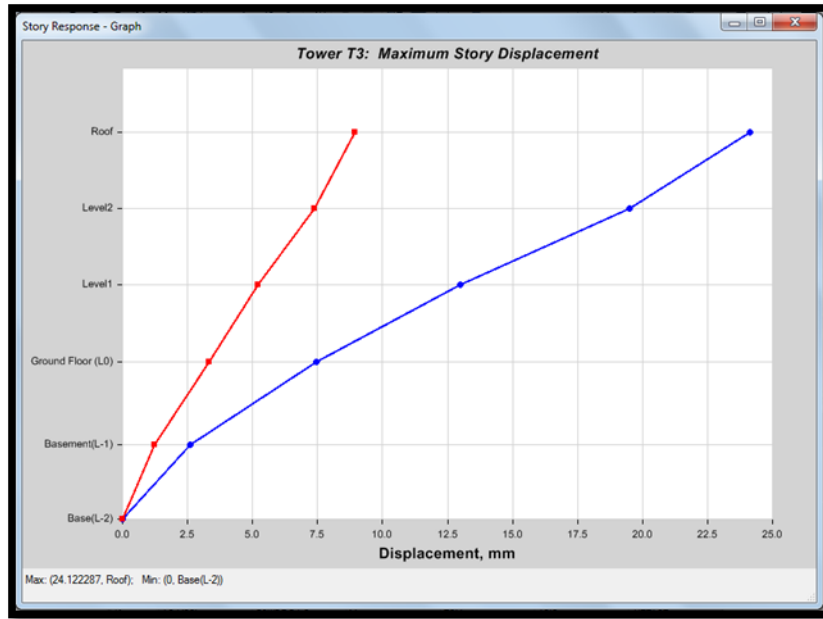
CombDS3-6

$$\Delta_{\text{máx } Y} = 127.9 \text{ mm};$$

$$FC_{\Delta} * \Delta_{\text{máx } Y} = 232.6 \text{ mm}$$

Gráfica 8: Torre T2: Desplazamientos máximos en Y sin el efecto de agrietamiento (Azul Δ_x ; Rojo Δ_y)

5.25.3 Desplazamientos máximos en Torre T3 sin el efecto de agrietamiento

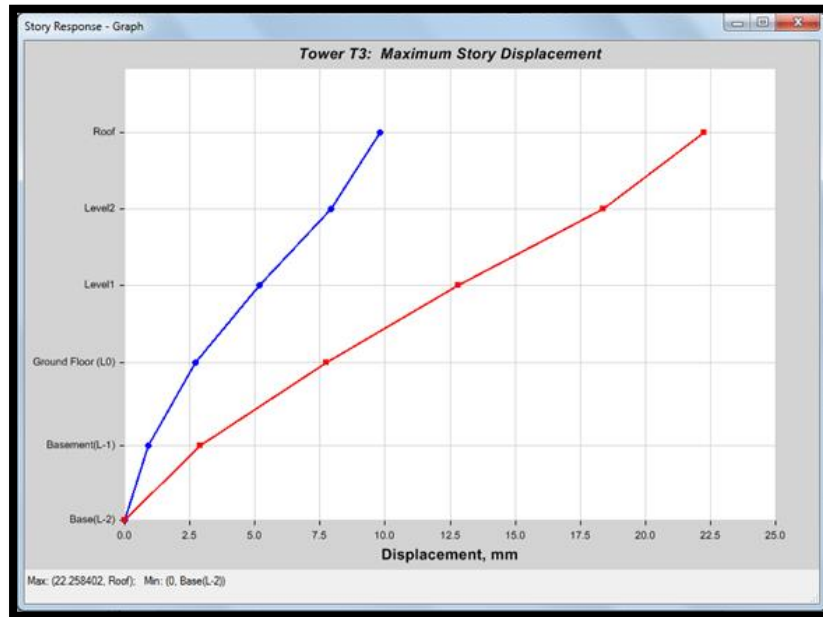


CombDS1-2

$$\Delta_{\text{máx X}} = 13.3 \text{ mm};$$

$$FC_{\Delta} * \Delta_{\text{máx X}} = 24.1 \text{ mm}$$

Gráfica 9: Torre T3: Desplazamientos máximos en X sin el efecto de agrietamiento (Azul Δ_x ; Rojo Δ_y)



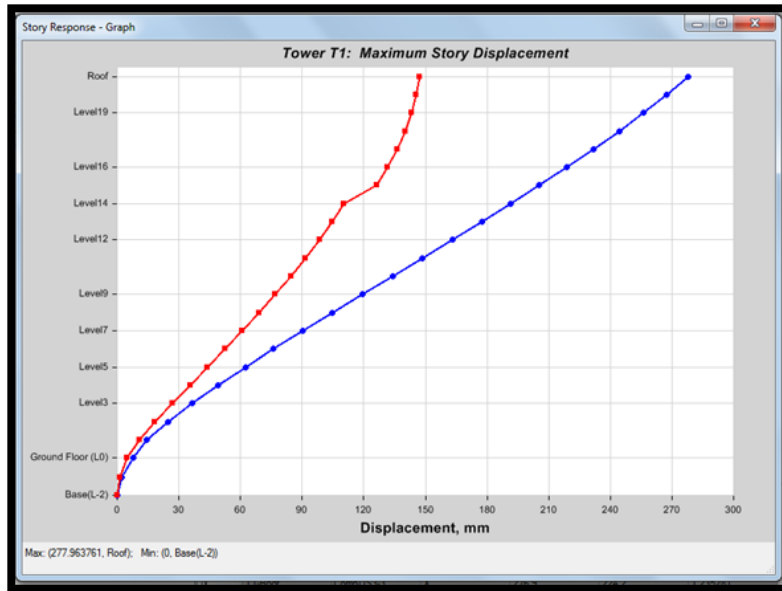
CombDS3-6

$$\Delta_{\text{máx Y}} = 12.3 \text{ mm};$$

$$FC_{\Delta} * \Delta_{\text{máx Y}} = 22.3 \text{ mm}$$

Gráfica 10: Torre T3: Desplazamientos máximos en Y sin el efecto de agrietamiento (Azul Δ_x ; Rojo Δ_y)

5.25.4 Desplazamientos máximos en Torre T1 con el efecto de agrietamiento

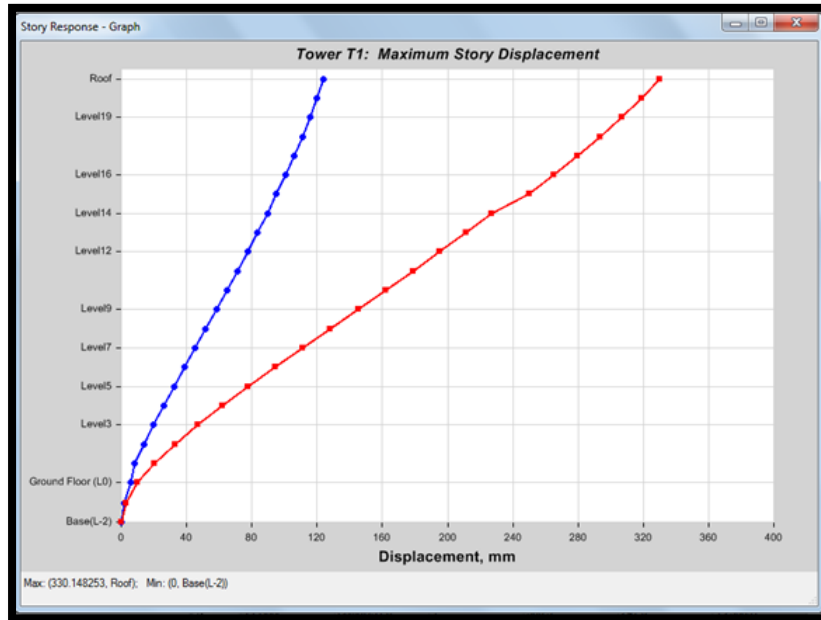


CombDS4-1

$$\Delta_{\text{máx X}} = 152.9 \text{ mm};$$

$$FC_{\Delta} * \Delta_{\text{máx X}} = 278.0 \text{ mm}$$

Gráfica 11: Torre T1: Desplazamientos máximos en X con el efecto de agrietamiento (Azul Δ_x ; Rojo Δ_y)



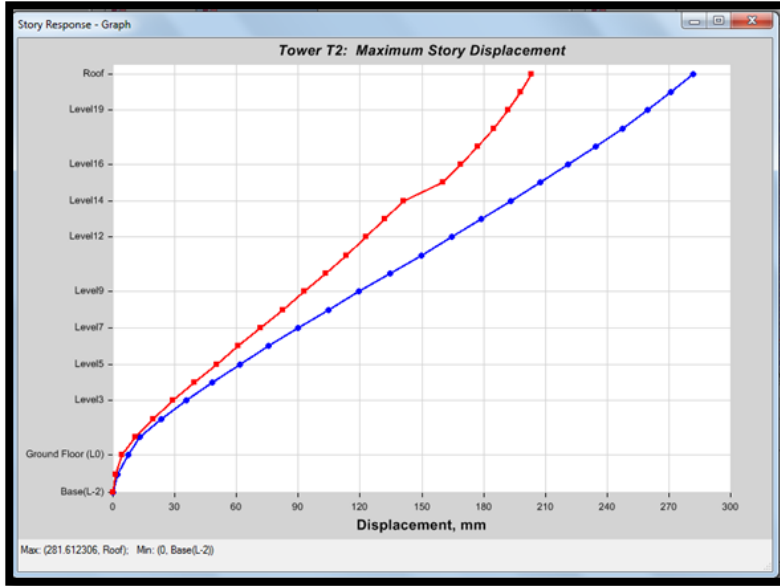
CombDS4-8

$$\Delta_{\text{máx Y}} = 181.6 \text{ mm};$$

$$FC_{\Delta} * \Delta_{\text{máx Y}} = 330.1 \text{ mm}$$

Gráfica 12: Torre T1: Desplazamientos máximos en Y con el efecto de agrietamiento (Azul Δ_x ; Rojo Δ_y)

5.25.5 Desplazamientos máximos en Torre T2 con el efecto de agrietamiento

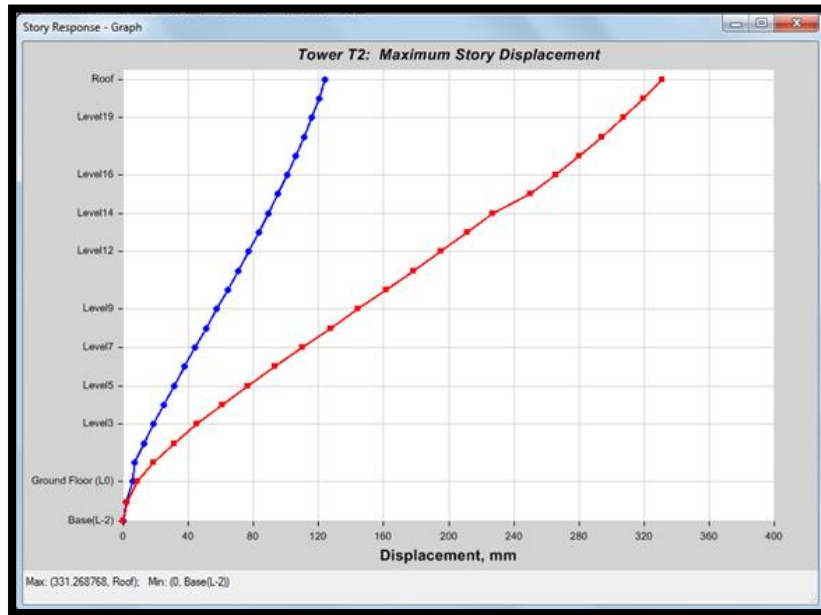


CombDS3-2

$\Delta_{\text{máx X}} = 154.9 \text{ mm};$

$FC_{\Delta} * \Delta_{\text{máx X}} = 281.6 \text{ mm}$

Gráfica 13: Torre T2: Desplazamientos máximos en X con el efecto de agrietamiento (Azul Δ_x ; Rojo Δ_y)



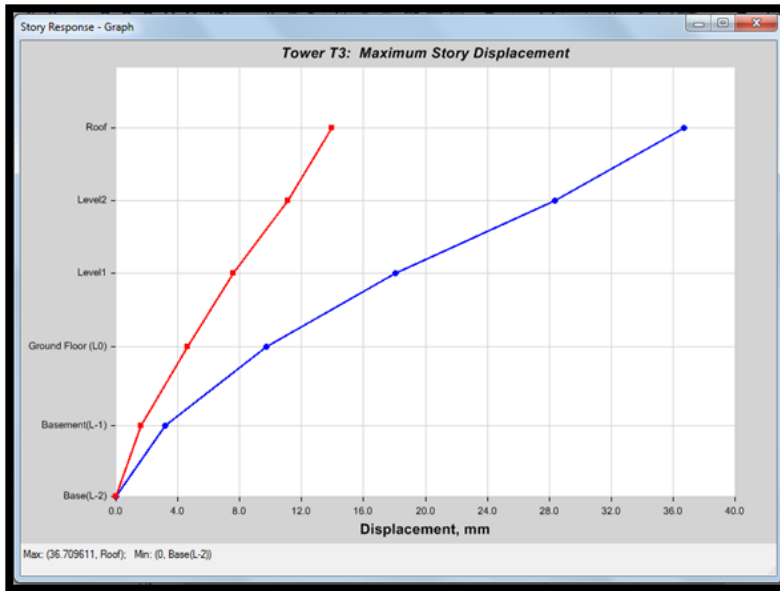
CombDS3-6

$\Delta_{\text{máx Y}} = 182.2 \text{ mm};$

$FC_{\Delta} * \Delta_{\text{máx Y}} = 331.3 \text{ mm}$

Gráfica 14: Torre T2: Desplazamientos máximos en Y con el efecto de agrietamiento (Azul Δ_x ; Rojo Δ_y)

5.25.6 Desplazamientos máximos en Torre T3 con el efecto de agrietamiento

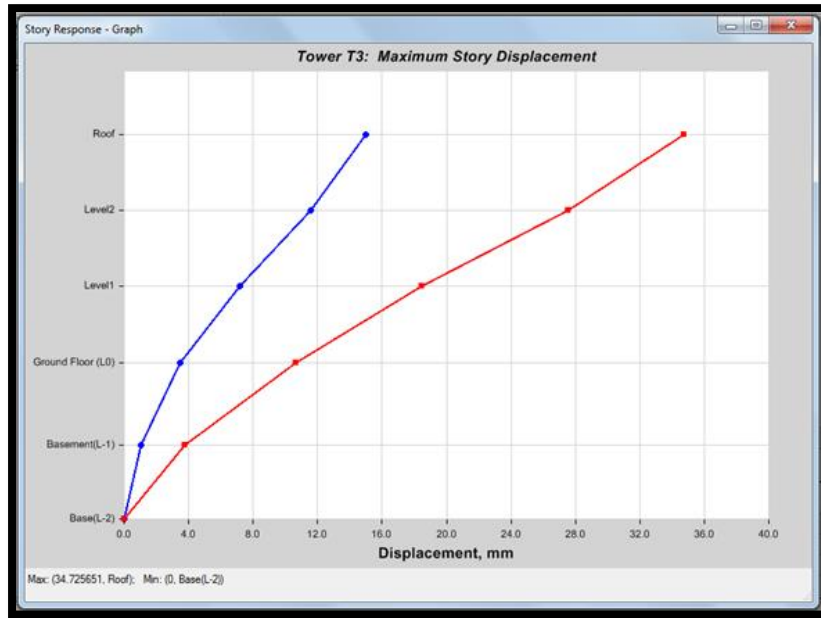


CombDS1-2

$$\Delta_{\text{máx } X} = 20.2 \text{ mm};$$

$$FC_{\Delta} * \Delta_{\text{máx } X} = 36.7 \text{ mm}$$

Gráfica 15: Torre T3: Desplazamientos máximos en X con el efecto de agrietamiento (Azul Δ_x ; Rojo Δ_y)



CombDS3-6

$$\Delta_{\text{máx } Y} = 19.1 \text{ mm};$$

$$FC_{\Delta} * \Delta_{\text{máx } Y} = 34.7 \text{ mm}$$

Gráfica 16: Torre T3: Desplazamientos máximos en Y con el efecto de agrietamiento (Azul Δ_x ; Rojo Δ_y)

5.26 Resumen de desplazamientos laterales

Se presenta un resumen de los desplazamientos máximos corregidos para el caso agrietado y no agrietado.

Sin efecto de agrietamiento		Con efecto de agrietamiento	
Torre T1		Torre T1	
FCD * Δmáx X	FCD * Δmáx Y	FCD * Δmáx X	FCD * Δmáx Y
CombDS4-1	CombDS4-8	CombDS4-1	CombDS4-8
mm	mm	mm	mm
206.9	231.4	278.0	330.1
Torre T2		Torre T2	
FCD * Δmáx X	FCD * Δmáx Y	FCD * Δmáx X	FCD * Δmáx Y
CombDS3-2	CombDS3-6	CombDS3-2	CombDS3-6
mm	mm	mm	mm
207.7	232.6	281.6	331.3
Torre T3		Torre T3	
FCD * Δmáx X	FCD * Δmáx Y	FCD * Δmáx X	FCD * Δmáx Y
CombDS1-2	CombDS3-6	CombDS1-2	CombDS3-6
mm	mm	mm	mm
24.1	22.3	36.7	34.7

Tabla 38: Resumen de desplazamientos máximos corregidos

Considerando el efecto de agrietamiento, la torre T1 presenta un incremento de 34% en dirección X y un 43% en dirección Y; la torre T2 presenta un incremento de 36% en dirección X y un 42% en dirección Y; y la torre T3 presenta un incremento de 52% en dirección X y un 56% en dirección Y.

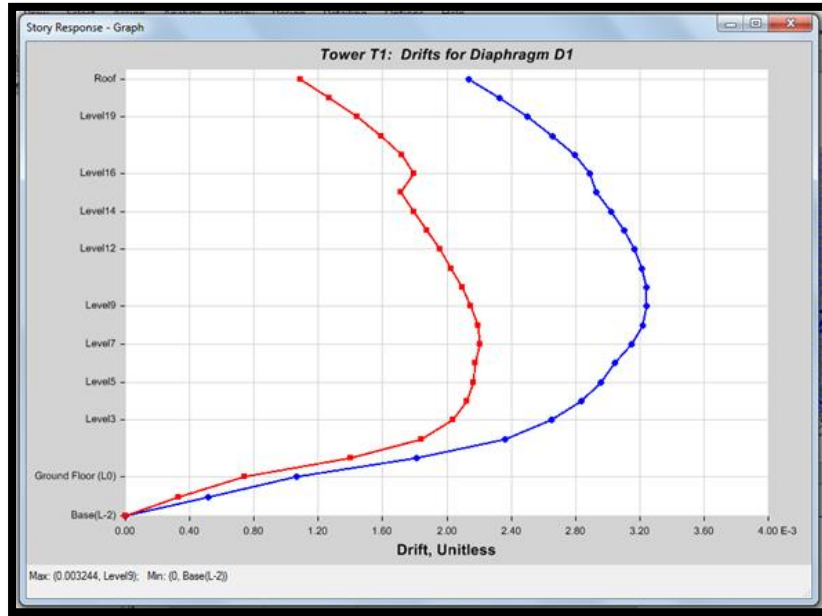
5.27 Revisión de drifts o derivas

Al igual que en el análisis de los desplazamientos laterales, los drifts deben ser calculados incorporando el mismo factor de corrección

$$FC_D = \frac{Q}{FC_{sis}} = \frac{2}{1.1} = \frac{20}{11} ,$$

a los drifts calculados con las combinaciones de diseño de la sección 5.25. A diferencia de los desplazamientos el Drift máximo generalmente no se encuentra en el último nivel. Posterior a este paso deben revisarse las condiciones de servicio establecidas en las Normas Técnicas Complementarias de Diseño Estructural y Diseño Sísmico.

5.27.1 Drift máximos en Torre T1 sin el efecto de agrietamiento

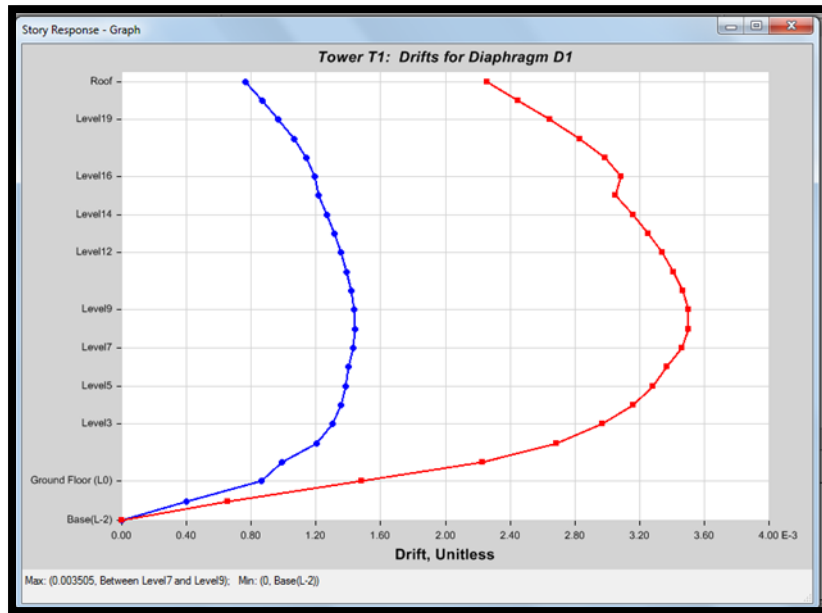


CombDS3-2

$$D_{\text{máx } X} = 0.001784;$$

$$FC_D * D_{\text{máx } X} = 0.003244$$

Gráfica 17: Torre T1: Drift máximo en X sin el efecto de agrietamiento (Azul Dx; Rojo Dy)



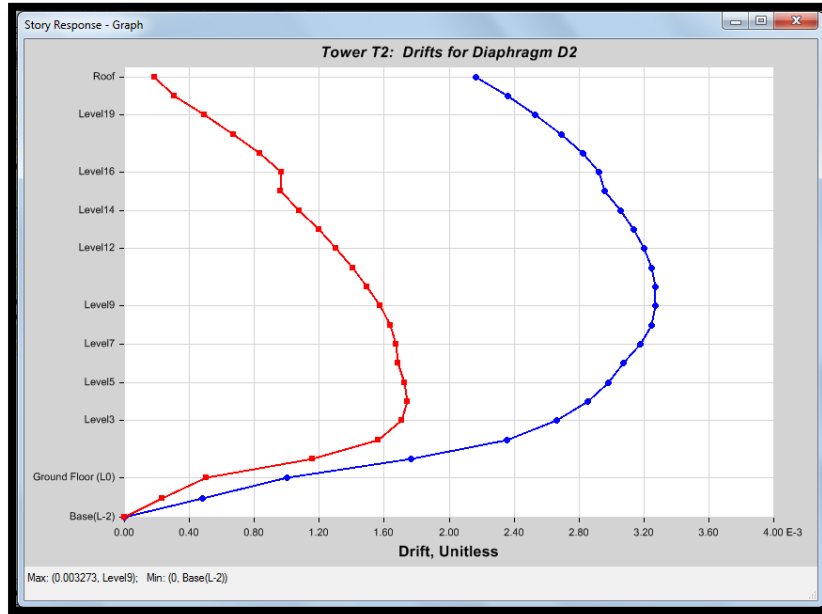
CombDS4-8

$$D_{\text{máx } Y} = 0.001928;$$

$$FC_D * D_{\text{máx } Y} = 0.003505$$

Gráfica 18: Torre T1: Drift máximo en Y sin el efecto de agrietamiento (Azul Dx; Rojo Dy)

5.27.2 Drift máximos en Torre T2 sin el efecto de agrietamiento

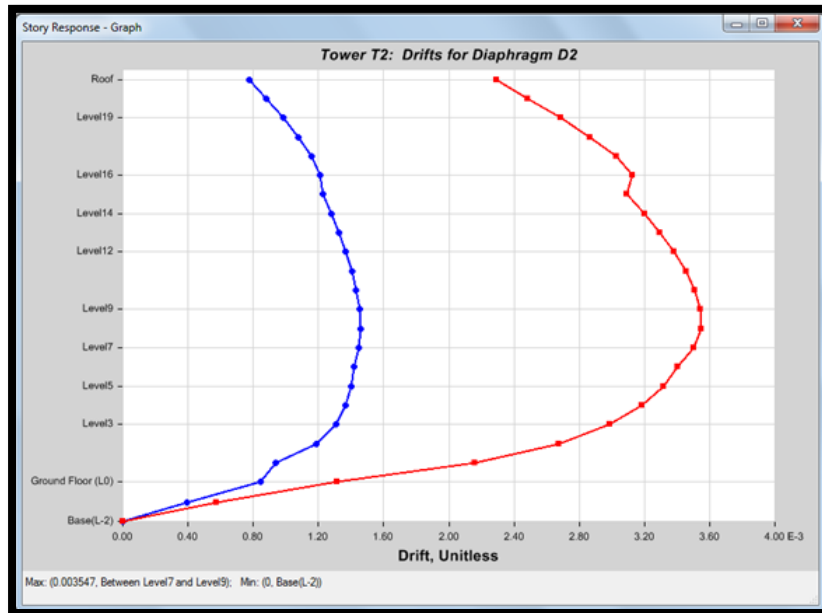


CombDS4-1

$$D_{\text{máx X}} = 0.001800;$$

$$FC_D * D_{\text{máx X}} = 0.003273$$

Gráfica 19: Torre T2: Drift máximo en X sin el efecto de agrietamiento (Azul Dx; Rojo Dy)



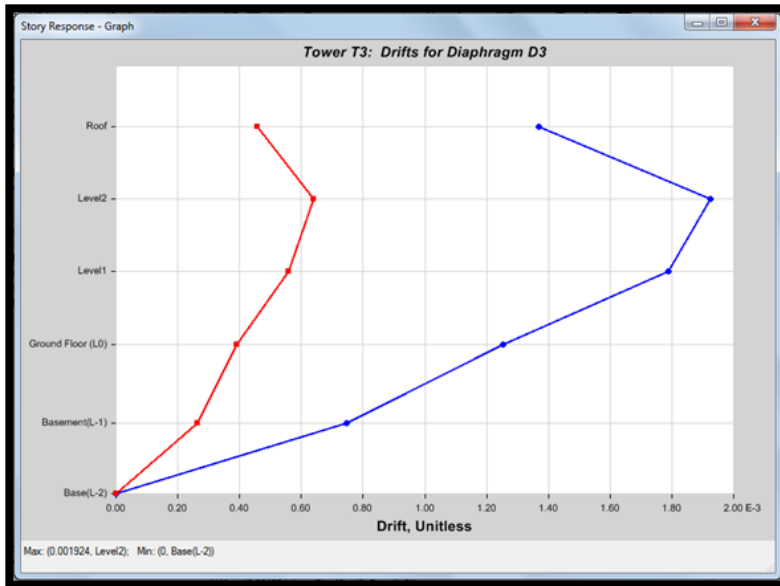
CombDS3-6

$$D_{\text{máx Y}} = 0.001951;$$

$$FC_D * D_{\text{máx Y}} = 0.003547$$

Gráfica 20: Torre T2: Drift máximo en Y sin el efecto de agrietamiento (Azul Dx; Rojo Dy)

5.27.3 Drift máximos en Torre T3 sin el efecto de agrietamiento

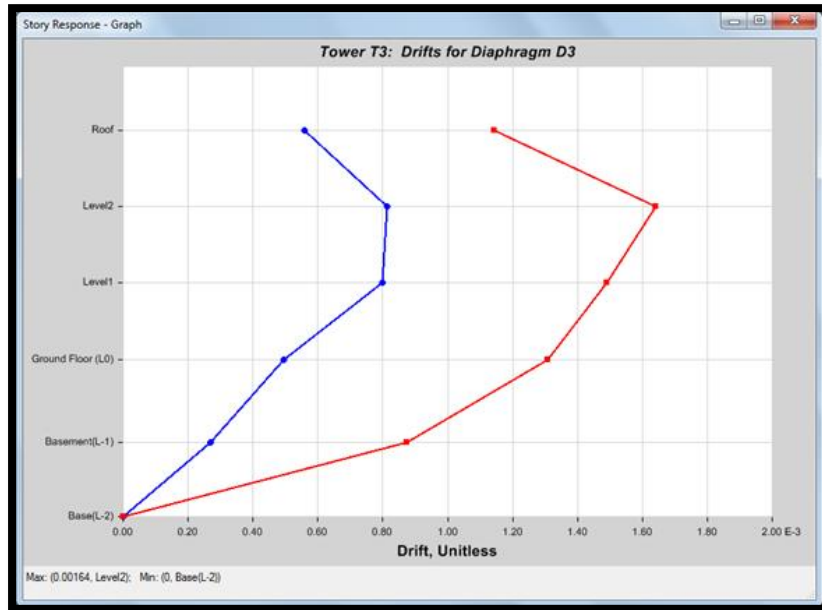


CombDS2-1

$$D_{\text{máx } X} = 0.001058;$$

$$F_{C_D} * D_{\text{máx } X} = 0.001924$$

Gráfica 21: Torre T3: Drift máximo en X sin el efecto de agrietamiento (Azul Dx; Rojo Dy)



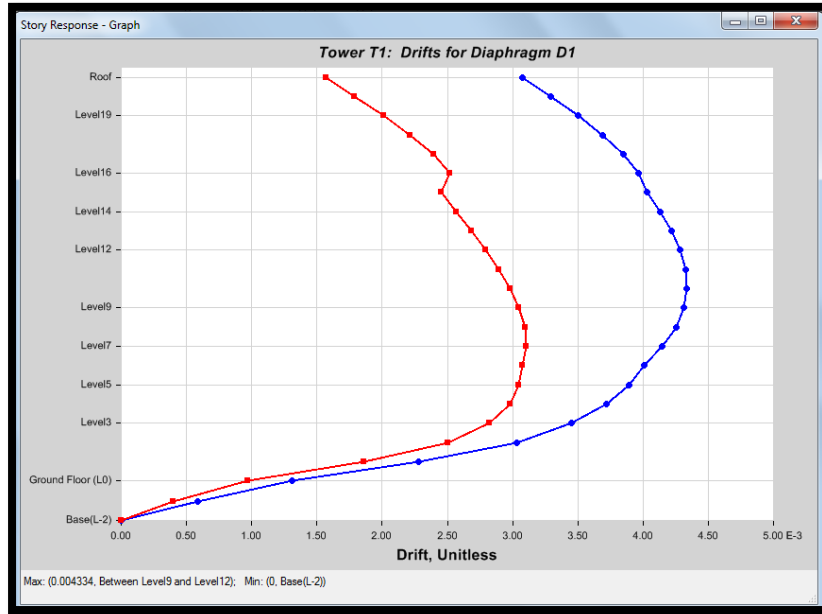
CombDS3-6

$$D_{\text{máx } Y} = 0.00090;$$

$$F_{C_D} * D_{\text{máx } Y} = 0.001640$$

Gráfica 22: Torre T3: Drift máximo en Y sin el efecto de agrietamiento (Azul Dx; Rojo Dy)

5.27.4 Drift máximos en Torre T1 con el efecto de agrietamiento

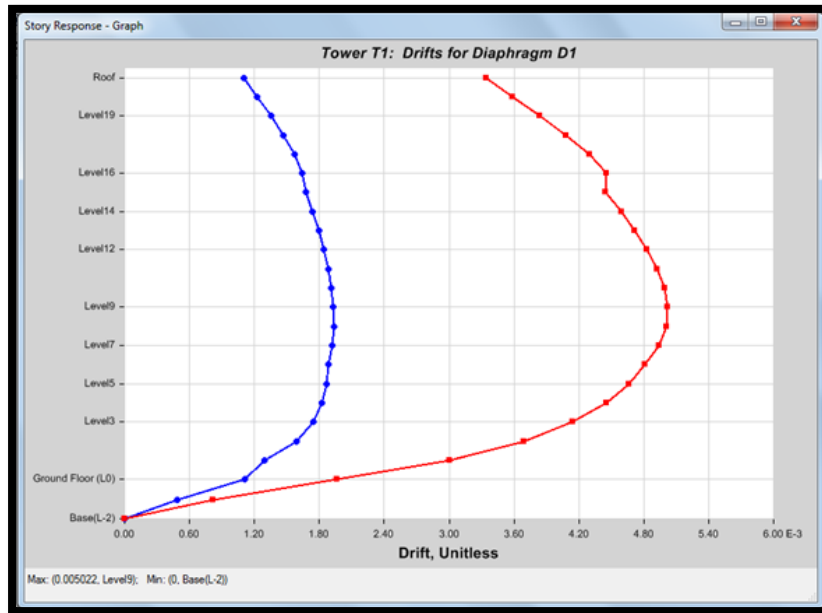


CombDS3-2

$$D_{\text{máx X}} = 0.002384;$$

$$FC_D * D_{\text{máx X}} = 0.004334$$

Gráfica 23: Torre T1: Drift máximo en X con el efecto de agrietamiento (Azul Dx; Rojo Dy)



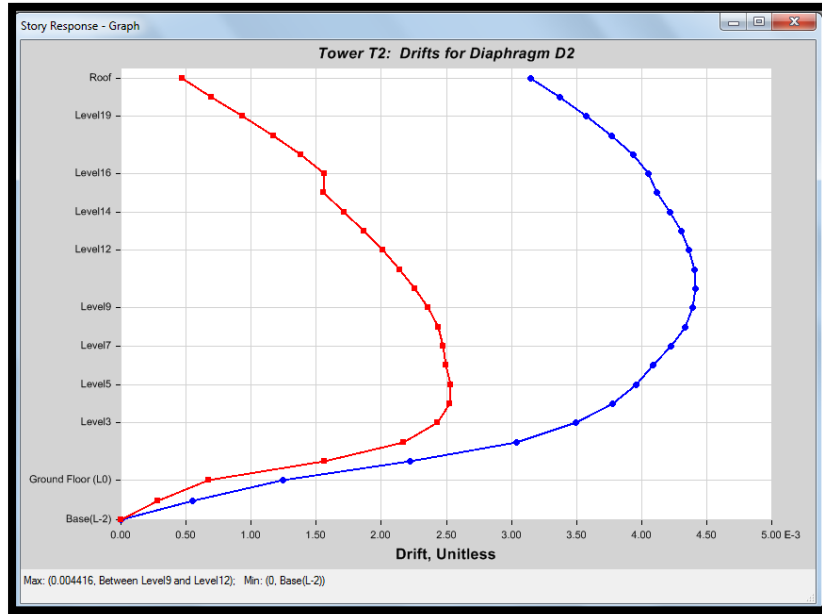
CombDS4-8

$$D_{\text{máx Y}} = 0.002762;$$

$$FC_D * D_{\text{máx Y}} = 0.005022$$

Gráfica 24: Torre T1: Drift máximo en Y con el efecto de agrietamiento (Azul Dx; Rojo Dy)

5.27.5 Drift máximos en Torre T2 con el efecto de agrietamiento

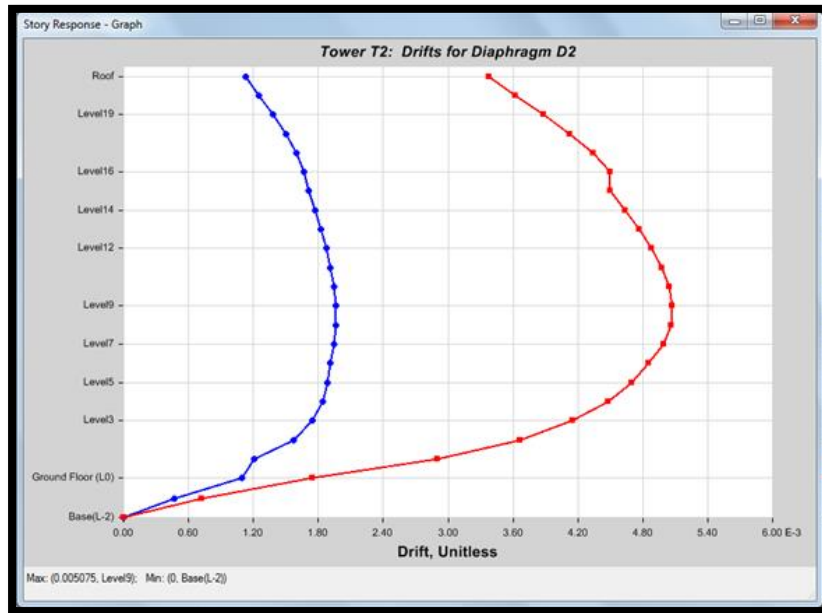


CombDS4-1

$$D_{\text{máx X}} = 0.002429;$$

$$F_{C_D} * D_{\text{máx X}} = 0.004416$$

Gráfica 25: Torre T2: Drift máximo en X con el efecto de agrietamiento (Azul Dx; Rojo Dy)



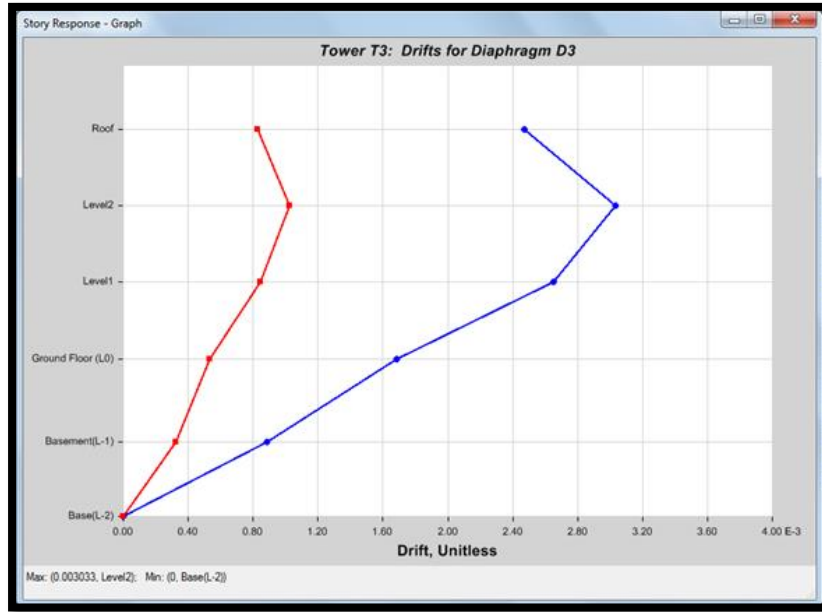
CombDS3-6

$$D_{\text{máx Y}} = 0.002791;$$

$$F_{C_D} * D_{\text{máx Y}} = 0.005075$$

Gráfica 26: Torre T2: Drift máximo en Y con el efecto de agrietamiento (Azul Dx; Rojo Dy)

5.27.6 Drift máximos en Torre T3 con el efecto de agrietamiento

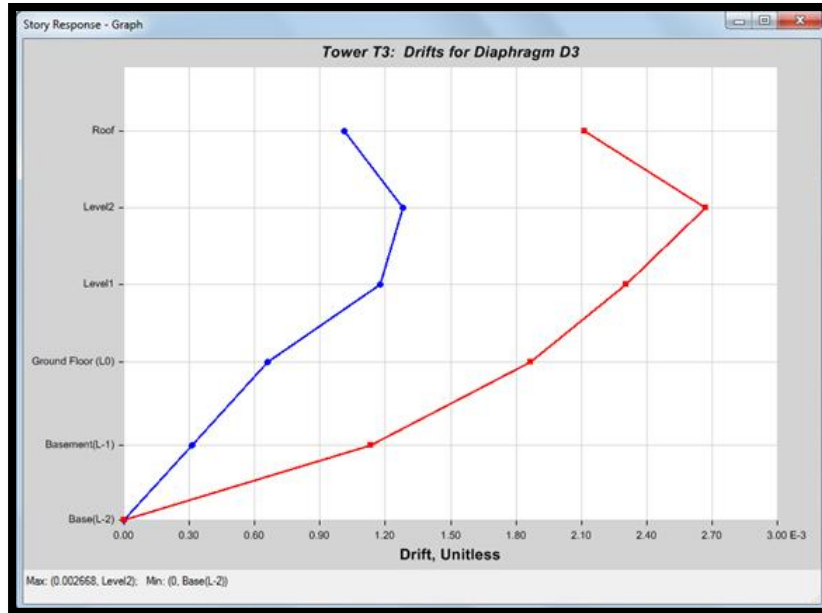


CombDS2-1

$$D_{\text{máx X}} = 0.001668;$$

$$F_{CD} * D_{\text{máx X}} = 0.003033$$

Gráfica 27: Torre T3: Drift máximo en X con el efecto de agrietamiento (Azul Dx; Rojo Dy)



CombDS3-6

$$D_{\text{máx Y}} = 0.001467;$$

$$F_{CD} * D_{\text{máx Y}} = 0.002668$$

Gráfica 28: Torre T3: Drift máximo en Y con el efecto de agrietamiento (Azul Dx; Rojo Dy)

5.28 Resumen de drifts

Se presenta un resumen de los drifts máximos corregidos para el caso agrietado y no agrietado.

Sin efecto de agrietamiento		Con efecto de agrietamiento	
Torre T1		Torre T1	
FCD * Dmáx X	FCD * Dmáx Y	FCD * Dmáx X	FCD * Dmáx Y
CombDS3-2	CombDS4-8	CombDS3-2	CombDS4-8
0.003244	0.003505	0.004334	0.005022
Torre T2		Torre T2	
FCD * Dmáx X	FCD * Dmáx Y	FCD * Dmáx X	FCD * Dmáx Y
CombDS4-1	CombDS3-6	CombDS4-1	CombDS3-6
0.003273	0.003547	0.004416	0.005075
Torre T3		Torre T3	
FCD * Dmáx X	FCD * Dmáx Y	FCD * Dmáx X	FCD * Dmáx Y
CombDS4-1	CombDS3-6	CombDS4-1	CombDS3-6
0.001924	0.001640	0.003033	0.002668

Tabla 39: Resumen de drifts máximos corregidos

Considerando el efecto de agrietamiento, la torre T1 presenta un incremento de 34% en dirección X y un 43% en dirección Y; la torre T2 presenta un incremento de 35% en dirección X y un 43% en dirección Y; y la torre T3 presenta un incremento de 58% en dirección X y un 63% en dirección Y.

Con esto se demuestra el cumplimiento entre los desplazamientos laterales de pisos consecutivos producidos por las fuerzas sísmicas sin y con el efecto de agrietamiento resultando en derivas o drifts menores a 0.006, que es el establecido por las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo. Aunque los muros y elementos no estructurales se planeó estén debidamente separados de la estructura se fijó esta limitante por parte del cliente debido a los acabados residenciales que se manejaron.

5.29 Revisión por volteo

Se realiza una revisión por volteo estableciendo las condiciones más desfavorables que se estipulan en las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones, donde se establece que la carga viva para la revisión por volteo resulta favorable para la estabilidad de la estructura, por lo que debe ser considerada como nula. El análisis se realizó estudiando las acciones en los ejes que a simple vista resultan más críticos ante esta evaluación, estos ejes son mostrados esquemáticamente en cada estudio. Finalmente, se tiene que los momentos actuantes de volteo son los que ocurren directamente por las fuerzas sísmicas cada dirección X y Y con un $FC = 1$; y los momentos resistentes son los proporcionados por el peso del edificio sin carga viva, es decir, en el programa se utilizó la combinación Dead + CM para resistir el volteo.

5.29.1 Revisión por volteo Torre T1 sin efectos de agrietamiento

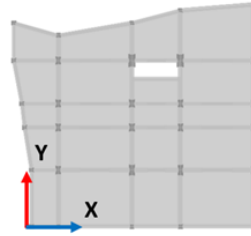
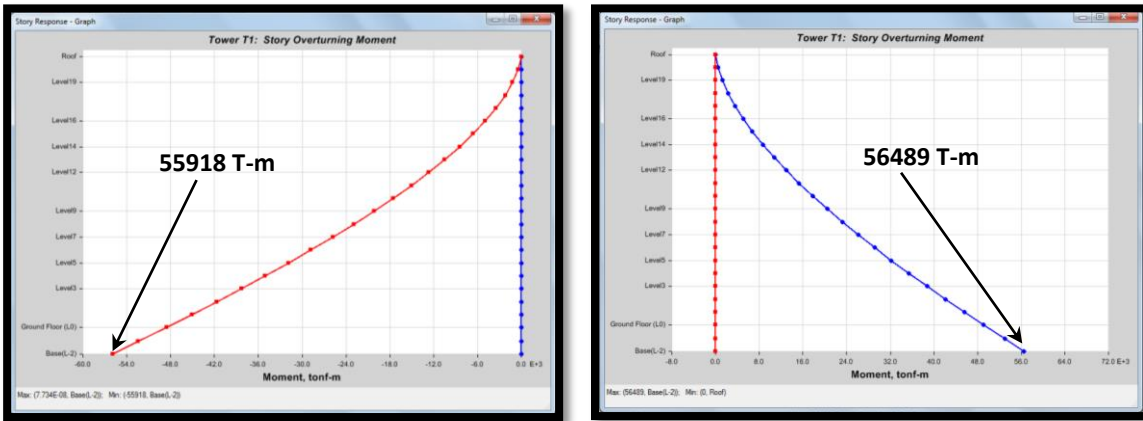
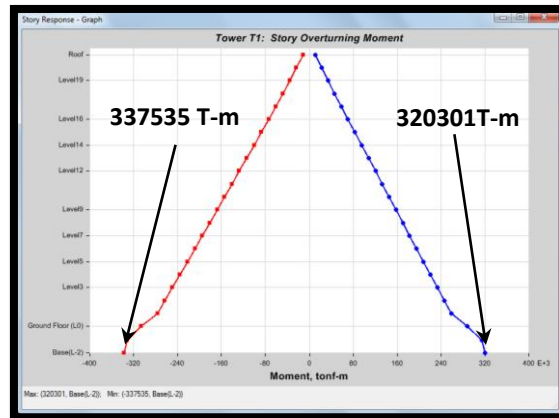


Figura 34: Ejes considerados para la revisión por volteo



Gráfica 29: Momentos de volteo actuantes



Gráfica 30: Momentos resistentes ante volteo

Factores de seguridad ante volteo					
Torre T1					
Volteo alrededor de Y			Volteo alrededor de X		
Actuante	Sx	55918	Actuante	Sy	56489
Resistente	Dead+CM	337535	Resistente	Dead+CM	320301
FS		6.0362	FS		5.6701

Tabla 40: Factores de seguridad

5.29.2 Revisión por volteo Torre T2 sin efectos de agrietamiento

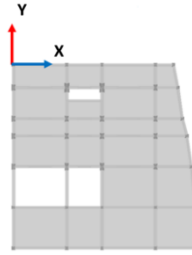
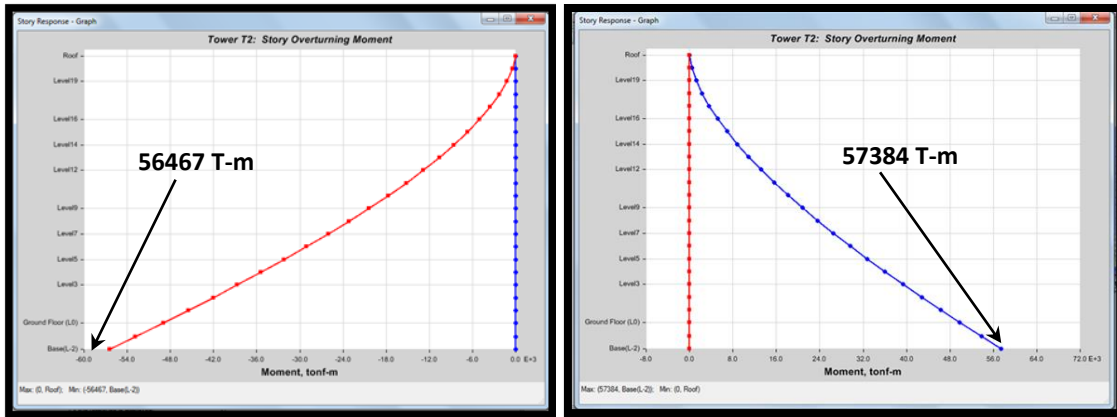
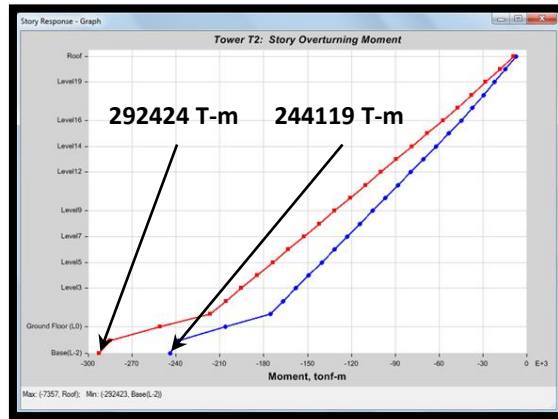


Figura 35: Ejes considerados para la revisión por volteo



Gráfica 31: Momentos de volteo actuantes



Gráfica 32: Momentos resistentes ante volteo

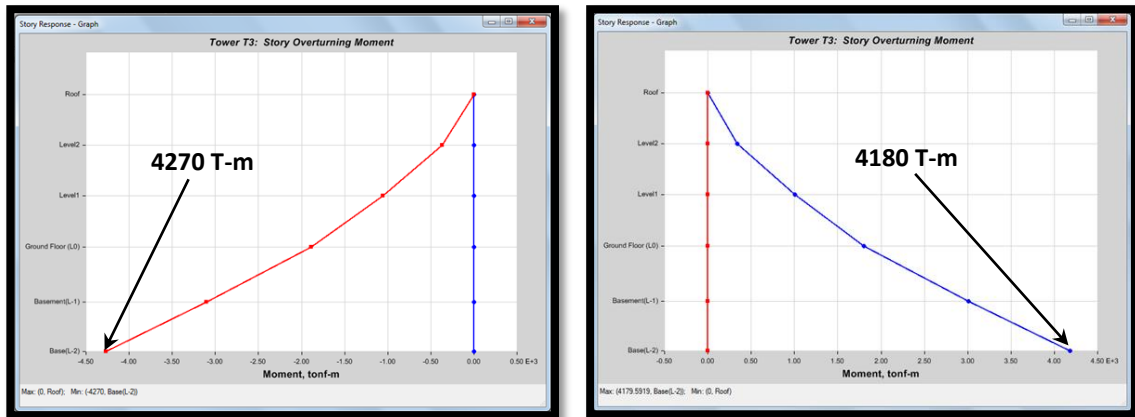
Factores de seguridad ante volteo					
Torre T2					
Volteo alrededor de Y			Volteo alrededor de X		
Actuante	Sx	56467	Actuante	Sy	57384
Resistente	Dead+CM	292424	Resistente	Dead+CM	244119
FS		5.1787	FS		4.2541

Tabla 41: Factores de seguridad

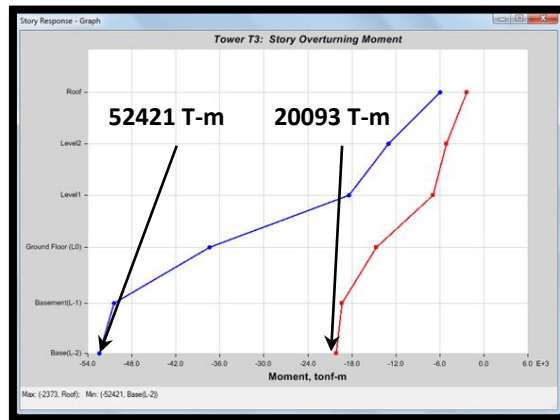
5.29.3 Revisión por volteo Torre T3 sin efectos de agrietamiento



Figura 36: Ejes considerados para la revisión por volteo



Gráfica 33: Momentos de volteo actuantes



Gráfica 34: Momentos resistentes ante volteo

Factores de seguridad ante volteo					
Torre T3					
Volteo alrededor de Y			Volteo alrededor de X		
Actuante	Sx	4270	Actuante	Sy	4180
Resistente	Dead+CM	20093	Resistente	Dead+CM	52421
FS		4.7056	FS		12.5409

Tabla 42: Factores de seguridad

5.29.4 Revisión por volteo Torre T1 con efectos de agrietamiento

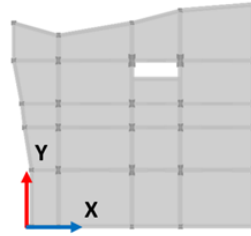
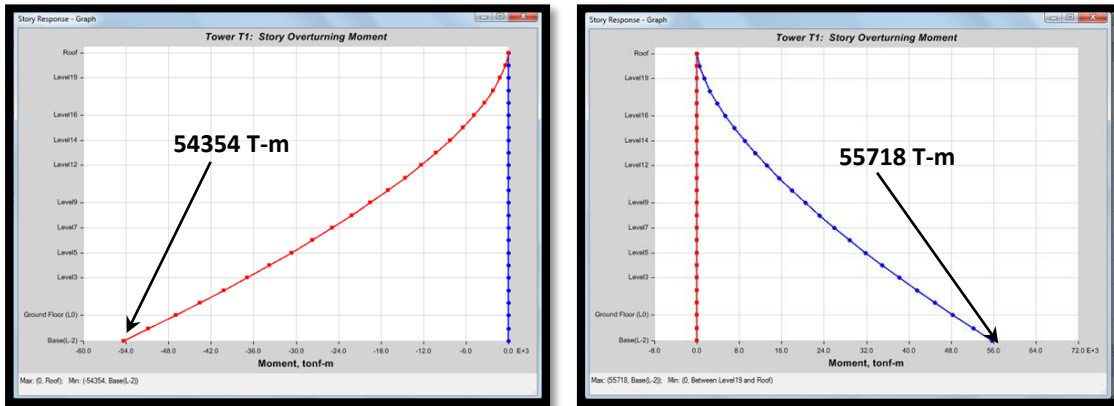
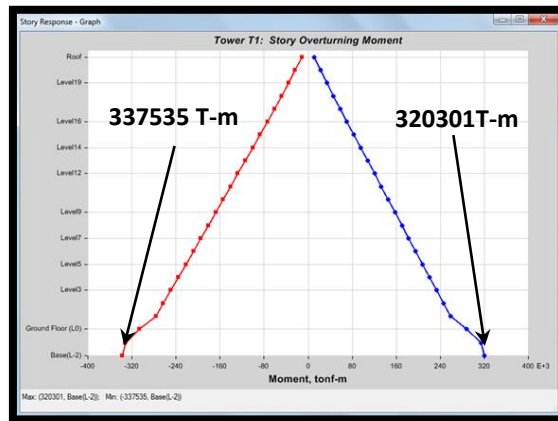


Figura 37: Ejes considerados para la revisión por volteo



Gráfica 35: Momentos de volteo actuantes



Gráfica 36: Momentos resistentes ante volteo

Factores de seguridad ante volteo					
Torre T1					
Volteo alrededor de Y			Volteo alrededor de X		
Actuante	Sx	54354	Actuante	Sy	55718
Resistente	Dead+CM	337535	Resistente	Dead+CM	320301
FS		6.2099	FS		5.7486

Tabla 43: Factores de seguridad

5.29.5 Revisión por volteo Torre T2 con efectos de agrietamiento

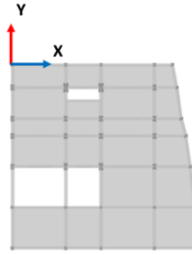
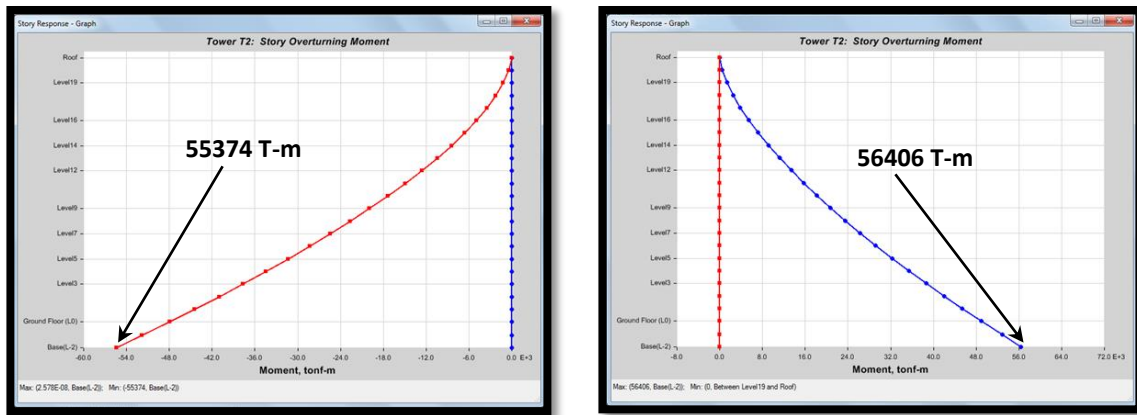
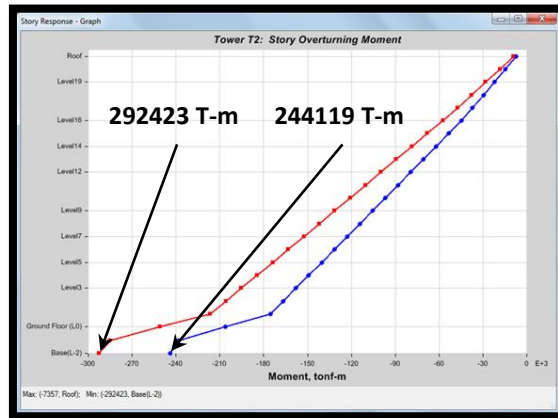


Figura 38: Ejes considerados para la revisión por volteo



Gráfica 37: Momentos de volteo actuantes



Gráfica 38: Momentos resistentes ante volteo

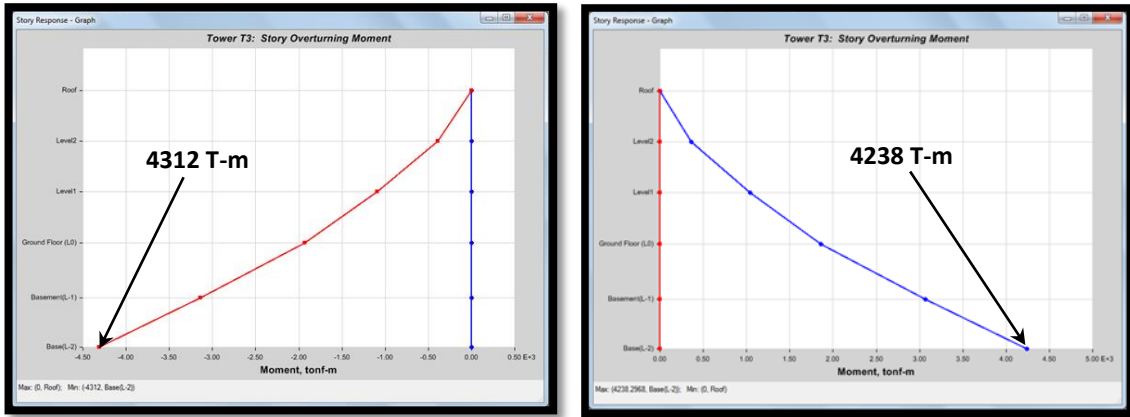
Factores de seguridad ante volteo					
Torre T2					
Volteo alrededor de Y			Volteo alrededor de X		
Actuante	Sx	55374	Actuante	Sy	56406
Resistente	Dead+CM	292424	Resistente	Dead+CM	244119
FS		5.2809	FS		4.3279

Tabla 44: Factores de seguridad

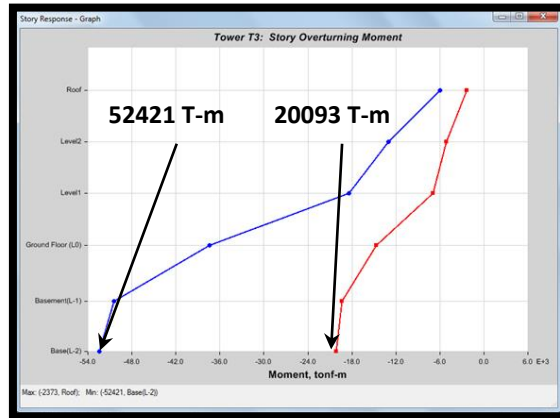
5.29.6 Revisión por volteo Torre T3 con efectos de agrietamiento



Figura 39: Ejes considerados para la revisión por volteo



Gráfica 39: Momentos de volteo actuantes



Gráfica 40: Momentos resistentes ante volteo

Factores de seguridad ante volteo					
Torre T3					
Volteo alrededor de Y			Volteo alrededor de X		
Actuante	Sx	4312	Actuante	Sy	4238
Resistente	Dead+CM	20093	Resistente	Dead+CM	52421
FS		4.6598	FS		12.3693

Tabla 45: Factores de seguridad

5.30 Resumen de la revisión por volteo

Se presenta un resumen de la revisión por volteo para el caso agrietado y no agrietado.

Sin efecto de agrietamiento		Con efecto de agrietamiento	
Torre T1		Torre T1	
Volteo Y	Volteo X	Volteo Y	Volteo X
FS	FS	FS	FS
6.0362	5.6701	6.2099	5.7486
Torre T2		Torre T2	
Volteo Y	Volteo X	Volteo Y	Volteo X
FS	FS	FS	FS
5.1787	4.2541	5.2809	4.3279
Torre T2		Torre T2	
Volteo Y	Volteo X	Volteo Y	Volteo X
FS	FS	FS	FS
4.7056	12.5409	4.6598	12.3693

Tabla 46: Resumen de los factores de seguridad ante volteo

Considerando el efecto de agrietamiento, la torre T1 presenta un incremento de 3% en su Factor de Seguridad ante el volteo alrededor de Y y un 1% ante el volteo alrededor de X; la torre T2 presenta un incremento de 2% ante el volteo alrededor de Y y un 2% ante el volteo alrededor de X; para la torre T3 los factores disminuyeron un 1% ante el volteo en ambas direcciones. En todos los casos los Factores de Seguridad superan el mínimo requerido de 1.5.

5.31 Conclusión sobre el análisis sísmico

En este capítulo, se pretendió mostrar lo más detallado posible el trabajo realizado en el proyecto Torres Arts, que busca garantizar una estructura sismo resistente que cumpla los lineamientos establecidos en el reglamento de construcciones de la ciudad de Puebla.

Se desea aclarar que el enfoque profesional que se buscó para la solución de este proyecto fue de carácter práctico y no de investigación; es un proyecto, que no se salvó de modificaciones, errores (algunos fatales), dudas, consultas y desvelos, pero jamás se perdió la sensibilidad que se debe tener para garantizar ante todo la seguridad de quienes lo ocupen.

CAPÍTULO 6

PROPUESTA DE CIMENTACIÓN Y MODELO POR COMPUTADORA

6.1 Software empleado

Para la propuesta de cimentación se realizó un análisis por computadora utilizando el programa SAFE, que por sus siglas en inglés significa: Slab Analysis by the Finite Element Method y se traduce como Análisis de Losas por el Método del Elemento Finito. Al igual que ETABS, SAFE es un programa de la familia de programas desarrollados por Computers and Structures, Inc. (CSI), y como el nombre lo indica es un programa especializado para el análisis y diseño de elementos de dos dimensiones y es aplicable tanto a cimentaciones como a sistemas de piso.

La propuesta de cimentación fue realizada nuevamente para los objetivos de este documento, y el modelo fue desarrollado en la versión de evaluación del programa SAFE2014v1400Eval. El programa fue descargado gratuitamente de la página oficial de CSI:

<http://www.csiamerica.com/support/downloads>



Figura 40: Imagen al abrir el programa de evaluación SAFE

6.2 Modelo matemático

De manera similar a lo especificado en el capítulo 4, el modelo matemático empleado para la cimentación consiste principalmente de elementos área de 4 nudos con 24 grados de libertad, los cuales son analizados por el método del elemento finito. La interacción Suelo-Estructura está dada por los módulos de reacción del suelo especificados en la tabla 3 del capítulo 2.

6.3 Planta de cimentación propuesta

De acuerdo a las características estratigráficas, arquitectónicas, de estructuración y de las cargas obtenidas del análisis de la superestructura, se desprende que la cimentación que puede cumplir con las condiciones de seguridad y servicio, es una cimentación a base de zapatas corridas en una dirección. La empresa Suelos y Cimentaciones S.A. propone zapatas paralelas al sentido corto del terreno a una profundidad efectiva de excavación de 3.75 m a partir del nivel del segundo sótano, así mismo esta propuesta contempla la incorporación de contratrabes, dados y traves de liga.

6.4 Propuesta del estudio de mecánica de suelos

Se muestra la planta de cimentación que describe lo especificado en la sección anterior, y fue desarrollada por la empresa Suelos y Cimentaciones S.A.

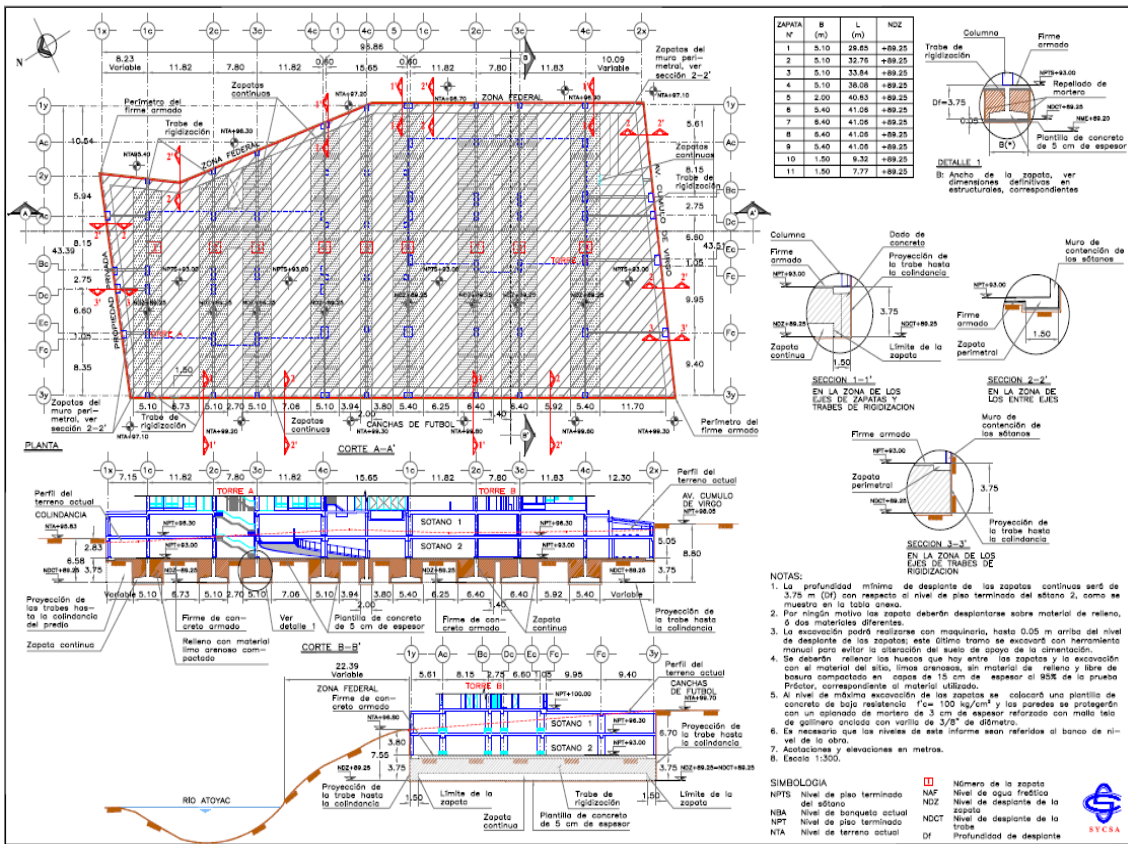


Figura 41: Propuesta de cimentación de la empresa Suelos y Cimentaciones S.A.

6.5 Modelo por computadora de la cimentación

Se muestra el modelo por computadora desarrollado en el programa SAFE que consiste de 44 áreas que serán subdivididas en elementos finitos de aproximadamente 1.2 m x 1.2 m, así como de 176 nudos y 101 barras. La restricción generada por la interacción virtual del suelo estará dada a cada 1.2 m en ambas direcciones de cada área, y como ya se mencionó anteriormente está proporcionada por la rigidez del suelo, es decir, por su módulo de reacción.

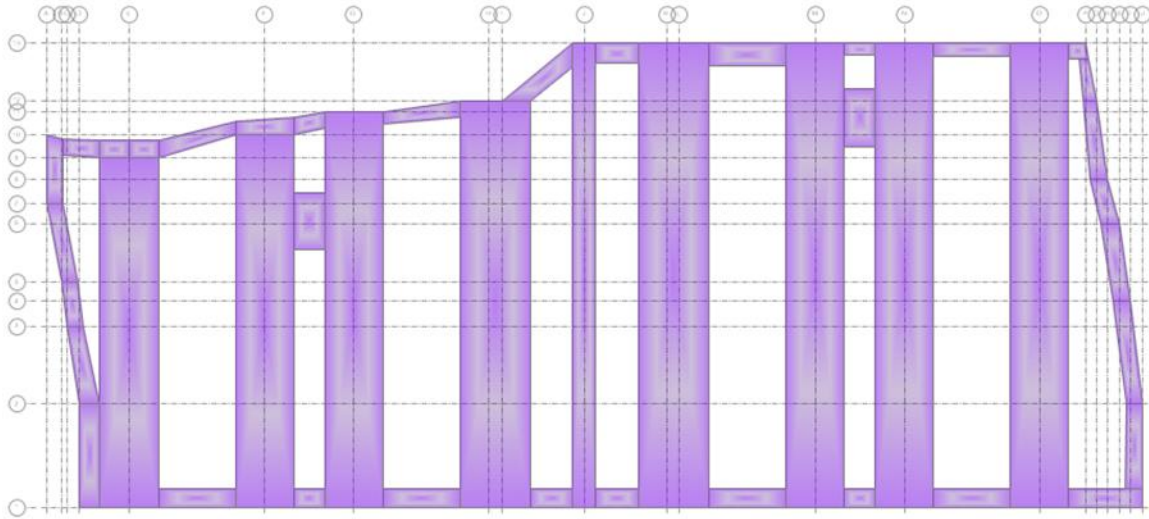


Figura 42: Modelo por computadora de la torre A

6.6 Datos ingresados y datos calculados

Debido a la compatibilidad entre SAFE y ETABS, de éste último fue posible exportar los datos generados de la superestructura y en específico los que se refieren a la cimentación, es decir, las reacciones generadas debido a todas las combinaciones de carga. Esto facilitó ampliamente el modelo de la cimentación ya que en un principio se contó con la configuración de los nudos de la base de los edificios así como de todas las cargas para transmitirse a la cimentación.

6.6.1 Datos importados

Se importaron a SAFE los siguientes datos:

- a) Patrones de cargas
- b) Combinaciones de carga
- c) Coordenadas de nudos en la base
- d) Reacciones transformadas a acciones

6.6.2 Datos ingresados manualmente

Se presentan algunos de los datos más relevantes ingresados manualmente:

- a) Material de cimentación
- b) Espesor de losas
- c) Secciones de contratrabes
- d) Secciones de dados
- e) Secciones de traves de liga
- f) Geometría de zapatas
- g) Módulo de reacción
- h) Peso de tierra

6.6.3 Datos calculados automáticamente

Los datos más relevantes calculados automáticamente por el programa son:

- a) Asentamientos
- b) Presiones
- c) Momentos
- d) Cortantes
- e) Diseño

6.7 Secciones utilizadas

Se consideraron para el análisis:

Losas de 1.2 m de espesor;

Contratrabes con sección $b = 1.2 \text{ m}$ $h = 3 \text{ m}$

Traves de liga con sección $b = 1.0 \text{ m}$ $h = 2 \text{ m}$

Dados con dimensión 30% mayor a las columnas.

CAPÍTULO 7

ANÁLISIS DE LA CIMENTACIÓN

7.1 Introducción

En base a lo desarrollado para la superestructura se pretende mostrar ahora de manera resumida lo realizado con respecto al análisis de la cimentación, con la finalidad de demostrar la eficiencia de la propuesta que garantiza lo predispuesto en la mecánica de suelos.

7.2 Método de análisis utilizado

Debido a los elementos área y a la interacción suelo estructura se emplea un análisis estático por elemento finito, con la finalidad de conocer los esfuerzos para conocer el comportamiento interno, así como las presiones ejercidas sobre el modelo del suelo.

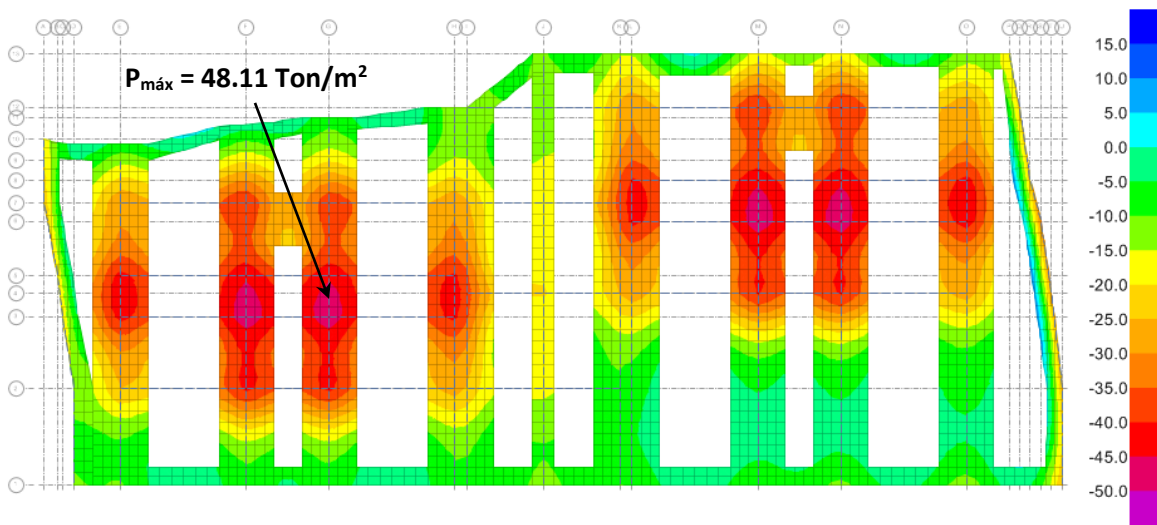
7.3 Presión en el suelo

Se muestran gráficas con contornos de color, que facilitan la interpretación de los resultados de las presiones para los casos de combinación de carga más desfavorables. Se muestran únicamente los casos:

CombDG; CombDS1-1; CombDS2-3; CombDS3-5; CombDS4-6

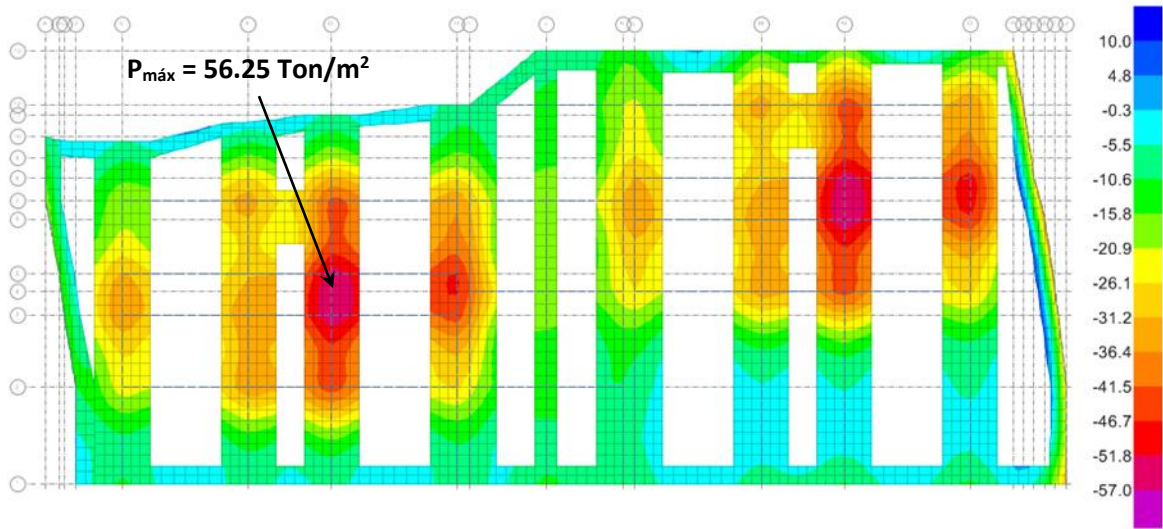
donde el primer caso corresponde a diseño por gravedad, y los demás a acciones de diseño por sismo, asimismo, ya incluyen los factores de carga $FC = 1.4$ y $FC = 1.1$, respectivamente.

7.3.1 Presión por cargas de gravedad para la combinación CombDG



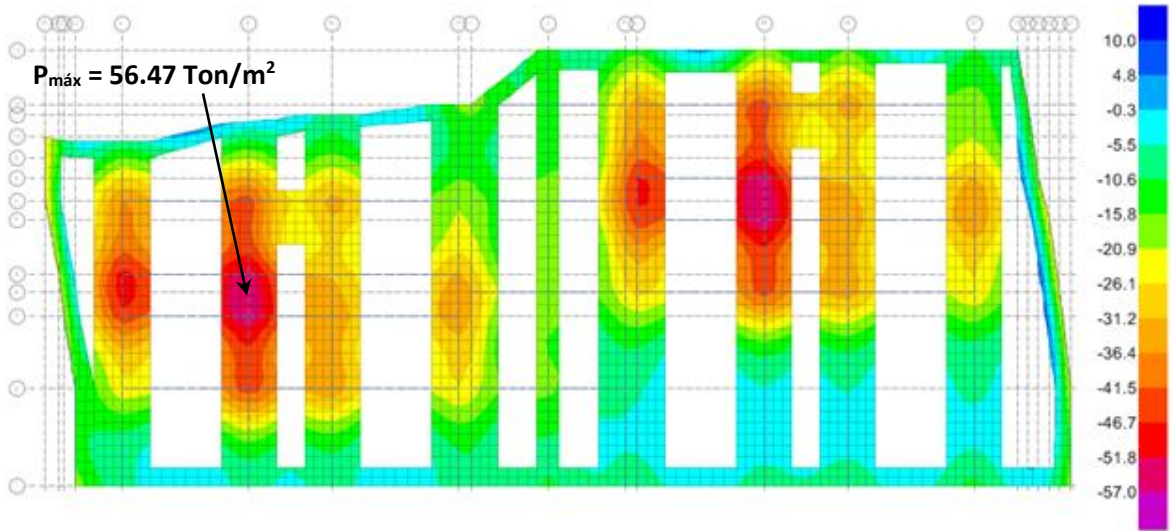
Gráfica 41: Contornos de presiones por gravedad

7.3.2 Presión por cargas de sismo para la combinación CombDS1-1



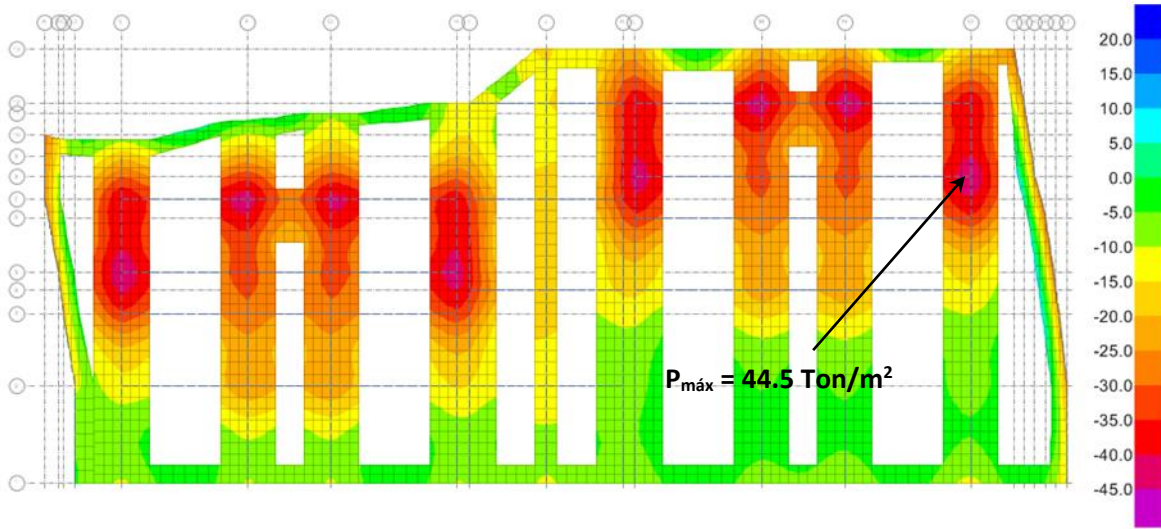
Gráfica 42: Contornos de presiones por sismo en X+

7.3.3 Presión por cargas de sismo para la combinación CombDS2-3



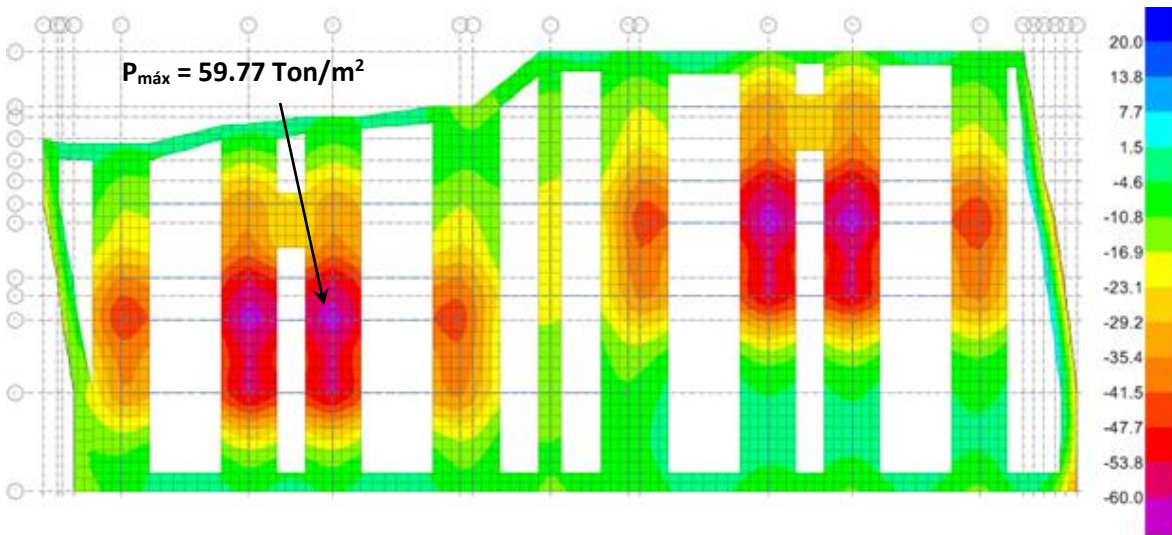
Gráfica 43: Contornos de presiones por sismo en X-

7.3.4 Presión por cargas de sismo para la combinación CombDS3-5



Gráfica 44: Contornos de presiones por sismo en Y+

7.3.5 Presión por cargas de sismo para la combinación CombDS4-6



Gráfica 45: Contornos de presiones por sismo en Y-

7.4 Resumen de presiones máximas

Se muestra en la siguiente tabla que las presiones actuantes son menores que las mínimas admisibles. De acuerdo al estudio de mecánica de suelos q admisible presentado está afectado por factores de carga y resistencia, por lo tanto, en realidad corresponde a una capacidad última.

Soil Pressures		
Load Case/Combo	Max	Admissible
	tonf/m ²	tonf/m ²
CombDG	48.112	58.22
CombDS1-1	56.254	60.41
CombDS2-3	56.474	60.41
CombDS3-5	44.511	60.41
CombDS4-6	59.773	60.41

Tabla 47: Resumen las presiones máximas y admisibles

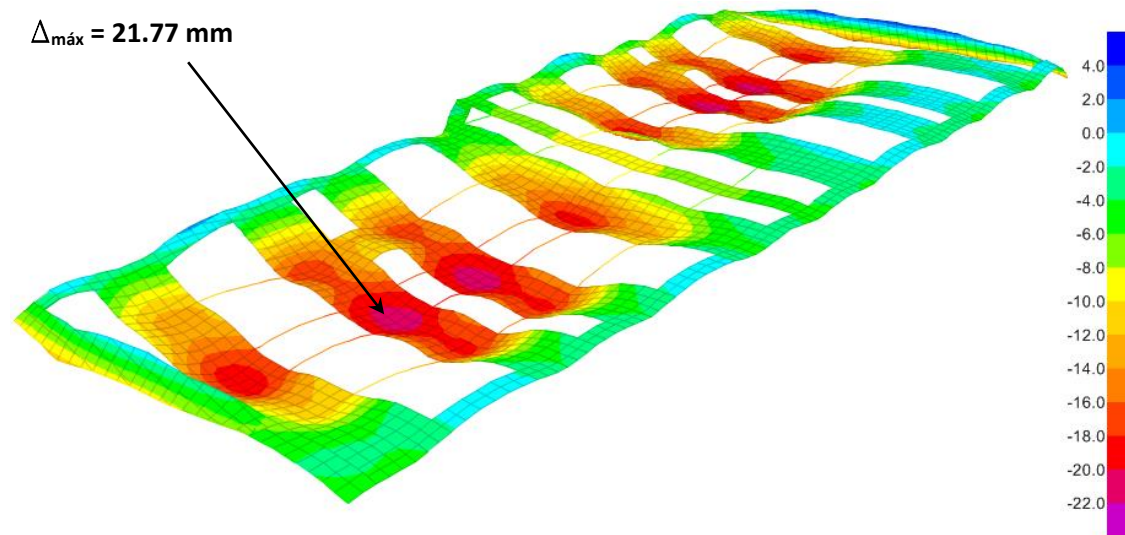
Los valores de carga admisible para el caso por gravedad y por sismo se muestran en el capítulo 2 en las tablas 1 y 2 respectivamente.

7.5 Asentamientos

Se presentan gráficas con contornos y asentamientos debido nuevamente a los casos:

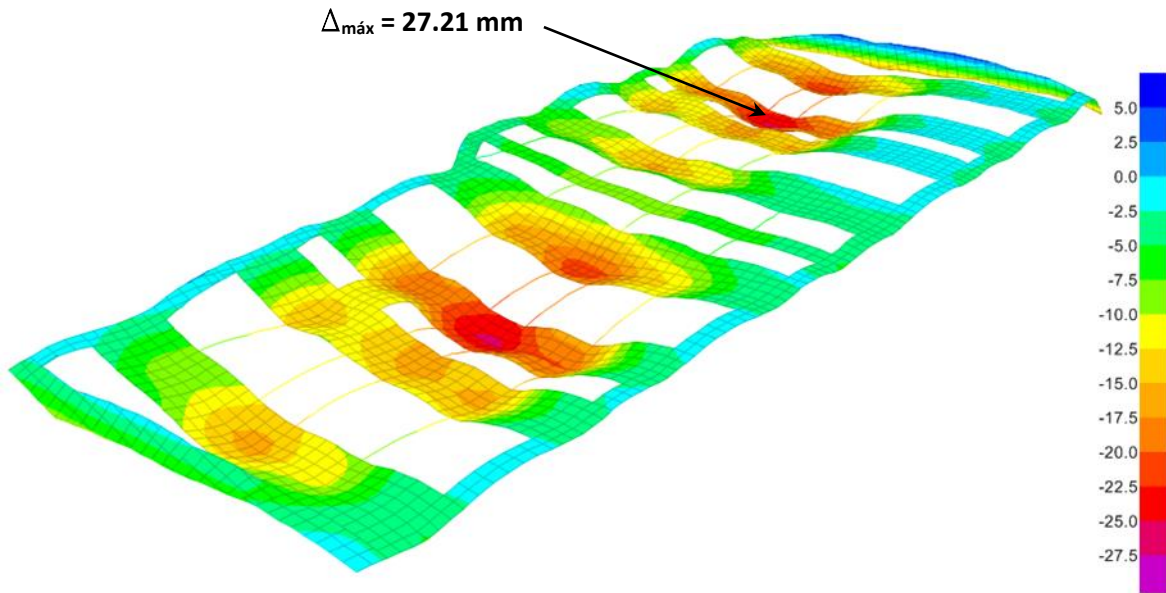
CombDG; CombDS1-1; CombDS2-3; CombDS3-5; CombDS4-6

7.5.1 Asentamientos por cargas de gravedad para la combinación CombDG



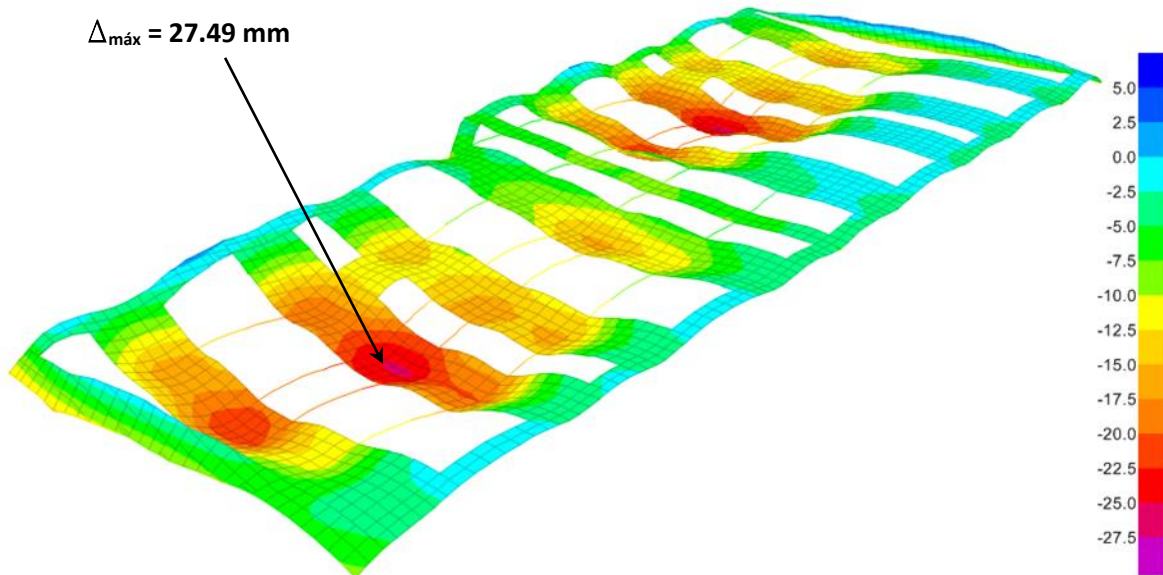
Gráfica 46: Contornos de asentamientos por gravedad

7.5.2 Asentamientos por cargas de sismo para la combinación CombDS1-1



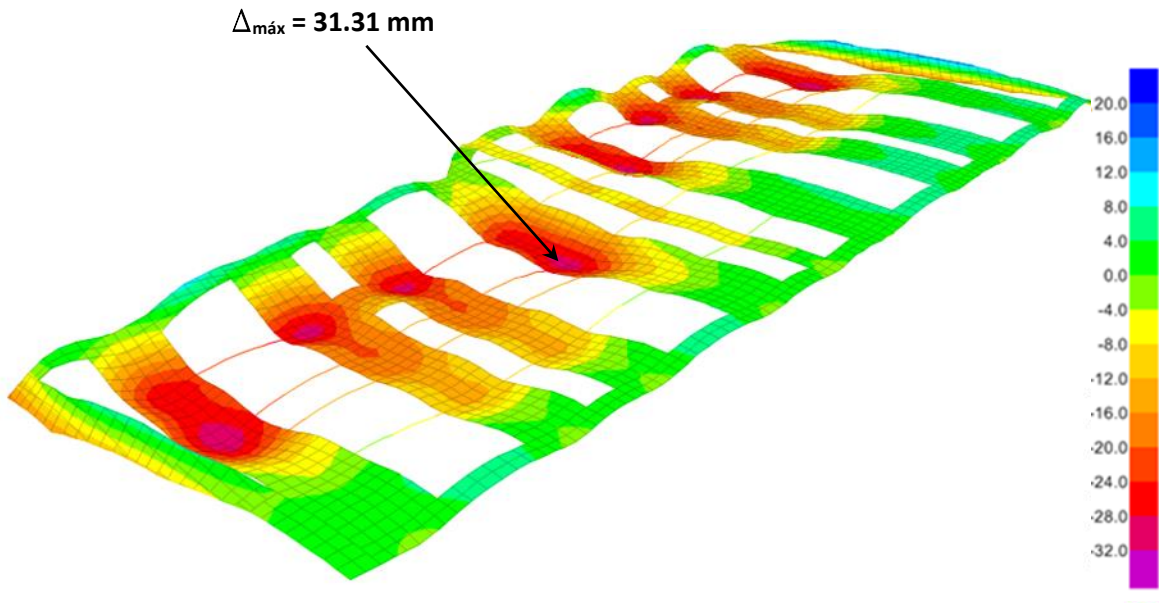
Gráfica 47: Contornos de asentamientos por sismo

7.5.3 Asentamientos por cargas de sismo para la combinación CombDS2-3



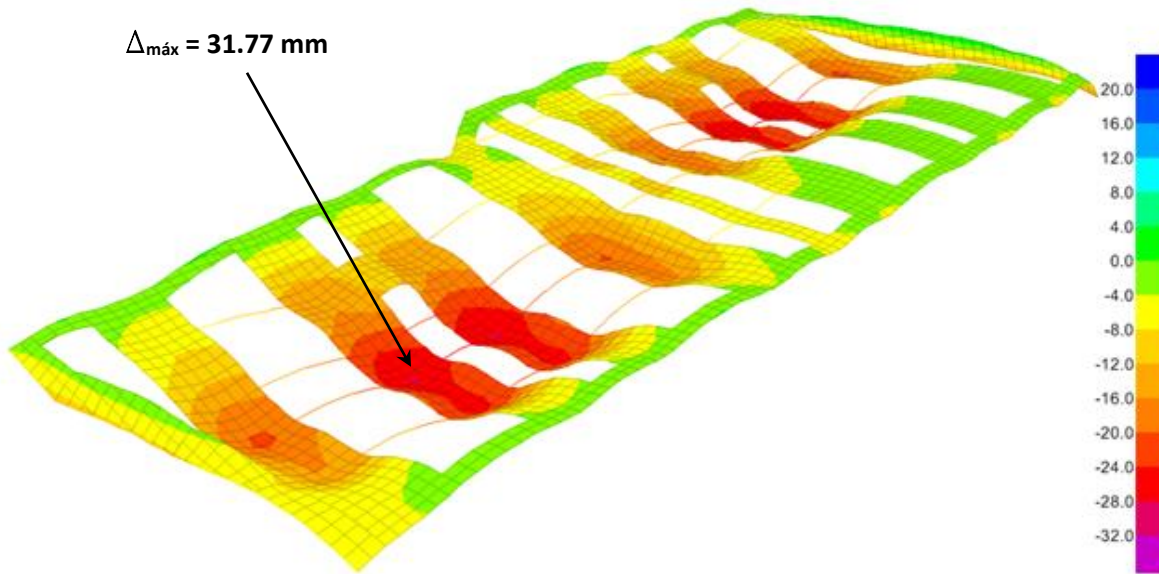
Gráfica 48: Contornos de asentamientos por sismo

7.5.4 Asentamientos por cargas de sismo para la combinación CombDS3-5



Gráfica 49: Contornos de asentamientos por sismo

7.5.5 Asentamientos por cargas de sismo para la combinación CombDS4-6



Gráfica 50: Contornos de asentamientos por sismo

7.6 Resumen de asentamientos máximos

A continuación se presentan de manera resumida los asentamientos máximos mostrados en las gráficas anteriores.

Soil Settlement	
Load Case/Combo	Max
	mm
CombDG	21.773
CombDS1-1	27.211
CombDS2-3	27.494
CombDS3-5	31.331
CombDS4-6	31.777

Tabla 48: Resumen de los asentamientos máximos

La tabla 4 del capítulo 2 estima un asentamiento máximo de 85 mm, como se observa en la tabla anterior el máximo desplazamiento elástico se encuentra a menos de la mitad.

7.7 Conclusión sobre el análisis de la cimentación

De manera muy resumida se puede demostrar que la cimentación a base de zapatas corridas en una dirección resulta muy eficaz para el tipo de edificación, fue muy importante contar con un estudio detallado de mecánica de suelos el cual como se ha mencionado antes estuvo a cargo de la empresa Suelos y Cimentaciones S.A.

En la actualidad para realizar un análisis de cimentación como el aquí presentado es vital contar un módulo de reacción confiable, ya que la base del análisis consiste en una fundación o cimentación soportada por una “cama de resortes” en cada intersección de los elementos finitos, así mismo se debe recordar que el módulo de reacción no es único para todo el modelo ya que depende del ancho de la zapata.

Por otra parte debe recordarse que el análisis por elemento finito es aproximado y en ocasiones se generan valores o esfuerzos que se disparan, arrojando valores fuera de lo obvio, por lo que es muy indispensable contar con conocimientos sobre esfuerzos e interpretar correctamente lo que para muchos son solo colores. No pretendo decir que gozo de pleno conocimiento sobre el tema ni que soy un experto en él, pero al igual que comprobar una viga empotrada con una carga puntual en su extremo, debe tenerse siempre la inquietud por garantizar que lo que se está modelando con elementos finitos, se asemeja en un alto porcentaje a la realidad.

CONSIDERACIONES FINALES

Quisiera resaltar que debo gran parte de lo que se ve reflejado en este documento a los conocimientos adquiridos en la maestría en ingeniería estructural que cursé orgullosamente en la Facultad de Ingeniería de mi *alma mater*, a mis cursos de maestría, así como a mis profesores, les debo conocimientos y enseñanzas que superan claramente los adquiridos en la licenciatura en Ingeniería Civil. Temas como la dinámica estructural, el análisis por el método del elemento finito, la estabilidad estructural y el diseño de elementos presforzados, por mencionar algunos, fueron los que marcaron la formación del pensamiento y del conocimiento que me han recompensado en el ámbito personal y profesional.

BIBLIOGRAFÍA

Bazán, E. (2010), *Diseño sísmico de edificios*. México: Limusa.

Bickford William B. (1995), *Mecánica de sólidos: conceptos y aplicaciones*, McGraw-Hill/Irwin, España.

Chopra K, Anil. (2007), *Dynamics of Structures: Theory and applications to earthquake engineering*. New York: Prentice Hall.

Collar A. R., Simpson A. (1987), *Matrices and engineering dynamics*, Ellis Horwood Limited, England.

Gere J. M. (2002), Quinta Edición *Mecánica de Materiales*, Thomson Learning

Heyman J. (1998), *Structural Analysis: A historical Approach*, Cambridge University Press, United Kingdom.

Meli Piralla, R. (2002), *Diseño estructural*. México: Limusa.

Paz, M. (2007), *Structural Dynamics: Theory and Computation*. New York: Dover Publications.

Tena Colunga, A. (2007), *Análisis de estructuras con métodos matriciales*, Limusa, México.