



**Sistema Nacional de Protección Civil
Centro Nacional de Prevención de Desastres**

**ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNA UNIDAD HABITACIONAL UBICADA EN ZONA DE
TRANSICION AL SUR DE LA CIUDAD DE MÉXICO DESPUÉS DEL SISMO DEL 19 DE
SEPTIEMBRE DE 2017.**

Moisés Gómez Méndez
Joel Aragón Cárdenas

Dirección de Investigación
Subdirección de Vulnerabilidad Estructural

2021

CONTENIDO

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	5
1.1 OBJETIVOS	5
1.2 ALCANCES.....	5
1.3 UBICACIÓN GEOGRÁFICA	5
1.4 DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO TIPO.....	7
1.5 ESTRUCTURACIÓN EN EL ESTADO ACTUAL.....	11
1.6 NORMATIVIDAD APLICABLE	12
CAPÍTULO 2 CARGAS CONSIDERADAS.....	14
2.1 NOMENCLATURA DE PATRONES DE CARGA.....	14
2.2 INTENSIDADES DE CARGA POR CATEGORÍA DE OCUPACIÓN.....	15
2.3 COMBINACIONES DE CARGAS.....	16
CAPÍTULO 3 PARÁMETROS SÍSMICOS	18
3.1 GENERALIDADES.....	18
3.2 PARÁMETROS SÍSMICOS SUPUESTOS EN EL DISEÑO ORIGINAL.....	18
3.3 UBICACIÓN EN LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA.....	19
3.4 REVISIÓN DE CONDICIONES DE REGULARIDAD	20
3.5 REVISIÓN DE DIAFRAGMAS EN SISTEMAS DE PISO	23
3.6 DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE COMPORTAMIENTO SÍSMICO Y DISTORSIONES PERMISIBLES.	24
3.7 DATOS DE ENTRADA Y SALIDA EN EL SASID 20.....	25
3.8 ESPECTROS ELÁSTICO Y DE DISEÑO	26
3.9 ACELERACIONES ESPECTRALES PARA REVISIÓN DE ESTADOS LÍMITE DE PREVENCIÓN DE COLAPSO Y LIMITACIÓN DE DAÑOS POR SISMOS FRECUENTES.....	26
CAPÍTULO 4 MODELO ESTRUCTURAL	28
4.1 MATERIALES.....	28
4.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO	28
4.3 IMÁGENES DEL MODELO ESTRUCTURAL.....	29
CAPÍTULO 5 RESULTADOS	32
5.1 MODOS DE VIBRAR	32
5.2 DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS EN ESTADO LÍMITE DE PREVENCIÓN DE COLAPSO (ELC)	33
5.3 DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS EN ESTADO LÍMITE DE LIMITACIÓN DE DAÑOS ANTE SISMOS FRECUENTES (ELSF).....	34
5.4 REVISIÓN DE SEPARACIÓN A COLINDANCIAS.....	35
5.5 REVISIÓN POR CORTANTE BASAL	35
5.6 REVISIÓN DE PORCENTAJE DE PESOS MODALES PARTICIPATIVOS.....	36
5.7 REVISIÓN DE RELACIÓN DE PERIODOS T_E/T_s	36
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES PRELIMINARES.....	37
REFERENCIAS.....	39

RESUMEN

Las afectaciones en vivienda producidas por el sismo del 19 de septiembre de 2017, mostraron que en la ciudad aún existen edificios que sobrevivieron en 1985 considerados estructuralmente adecuados, que presentaron deficiencias no solo en cuanto a su resistencia sino también a su estructuración. Un ejemplo de estas estructuras que han pasado desapercibidas en otros eventos sísmicos, es el Conjunto Habitacional que se analizará en el presente documento, que si bien no se reportaron colapsos, hubo daños severos en varios de los edificios que forman el conjunto.

En el presente estudio se realizará el análisis estructural de un modelo representativo del conjunto habitacional, al cual se le aplicarán diferentes análisis para obtener por la vía analítica varias de sus características dinámicas, con el fin de explicar las causas del daño que presentaron varias de las estructuras. Además, de presentar los datos y resultados obtenidos de la campaña de monitoreo realizada a tres edificios del mencionado conjunto habitacional. Posterior a lo cual, se analizarán las diferencias entre los modelos analíticos y los resultados de campo.

ABSTRACT

Damages on housing produced by September 19th 2017 earthquake, showed that even today there are buildings in Mexico City that survived in 1985 considered structurally adequate, which presented deficiencies not only in terms of their resistance but their structuring. An example of these structures that have gone unnoticed in other seismic events is dwelling buildings analyzed in this study, which although there were no collapses, there were severe damages in several buildings of complex.

In this work, the structural analysis of a representative model of housing complex will be carried out, to which different analyzes will be applied to obtain several of its dynamic characteristics through the analytical route, in order to explain the causes of the damage of several structures presented. In addition, data and results obtained from the monitoring campaign carried out to three buildings of the mentioned housing complex will be presented. Subsequently, the differences between analytical models and field results will be analyzed

DESCARGO DE RESPONSABILIDAD

La información que se presenta en este informe ha sido preparada por personal técnico del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), con base en el estado actual del conocimiento para el diseño de estructuras, su modelado en software de análisis tridimensional, así como de información recabada por diferentes medios.

El marco técnico-legal lo constituyen el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y las Normas Técnicas Complementarias vigentes al momento de la publicación del documento en comento.

Se hace la aclaración que este documento no constituye una guía de diseño estructural, sino que representa únicamente una interpretación de las normas y la aplicación de juicio profesional. Asimismo se aclara que el presente no sustituye una memoria de cálculo estructural, dictamen o similar y que por lo tanto, no posee ningún carácter legal que suscriba responsabilidad alguna por parte de los autores.

Adicionalmente, se deberá tener precaución cuando se utilicen otras normas, especificaciones o códigos desarrollados por otros organismos e incorporados como referencia en este documento, ya que este material puede ser sujeto de modificaciones o correcciones con posterioridad a la publicación del presente. El CENAPRED no se responsabiliza por ninguna de las referencias citadas en el presente informe.

El CENAPRED no puede garantizar que el presente informe se encuentre libre de errores, y por lo tanto, no debe utilizarse sin la participación de un profesional competente que verifique la aplicación de esta información en cualquier proyecto. Quien haga uso de cualquier información contenida en el presente informe, asume toda la responsabilidad derivada de dicho uso.

El CENAPRED no será legalmente responsable de cualquier problema derivado del uso de la información contenida en el presente informe.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETIVOS

El objetivo del presente informe es conocer el comportamiento de un inmueble que sufrió daños por los sismos ocurridos en septiembre de 2017, mediante el análisis estructural de un modelo tridimensional y realizando una comparación entre los parámetros obtenidos del modelo con los límites permisibles establecidos en la normatividad vigente. Asimismo, se estimará la vulnerabilidad para la tipología estructural del modelo analizado en este informe, así como realizar la comparación entre la información obtenida en campo y los resultados analíticos.

1.2 ALCANCES

La evaluación de la respuesta de la estructura se basa en la aplicación de los criterios de estados límite definidos en la normatividad vigente.

Se considerarán como parámetros indicadores del comportamiento de la estructura al periodo fundamental de vibrar, a su relación con el periodo dominante de vibrar más largo del terreno, los desplazamientos laterales relativos en los estados límite de prevención de colapso y limitación de daños frecuentes, así como la resistencia de sus elementos estructurales.

El análisis se lleva a cabo considerando al sismo como acción accidental predominante, por la naturaleza del sistema estructural, los efectos del viento se consideran despreciables.

Dado que no es posible obtener muestras de materiales para someterlos a ensayos en laboratorio, se emplearán los parámetros mínimos que marca la normatividad vigente en la época de construcción para caracterizar los materiales que componen las diferentes estructuras.

Debido a que no se cuenta con un estudio de mecánica de suelos, se omite la revisión de capacidad de carga en el suelo o deformaciones, para el modelo se asigna un sistema de apoyos rígidos sin desplazamiento.

Asimismo, se plantearán un conjunto de recomendaciones para mejorar el comportamiento global de la estructura.

1.3 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El conjunto habitacional al sur de la Ciudad de México en la Alcaldía Tlalpan, al sur de la Ciudad de México (Figuras 1.1 y 1.2).



Figura 1.1 Ubicación del conjunto habitacional (Google Earth, 2021).

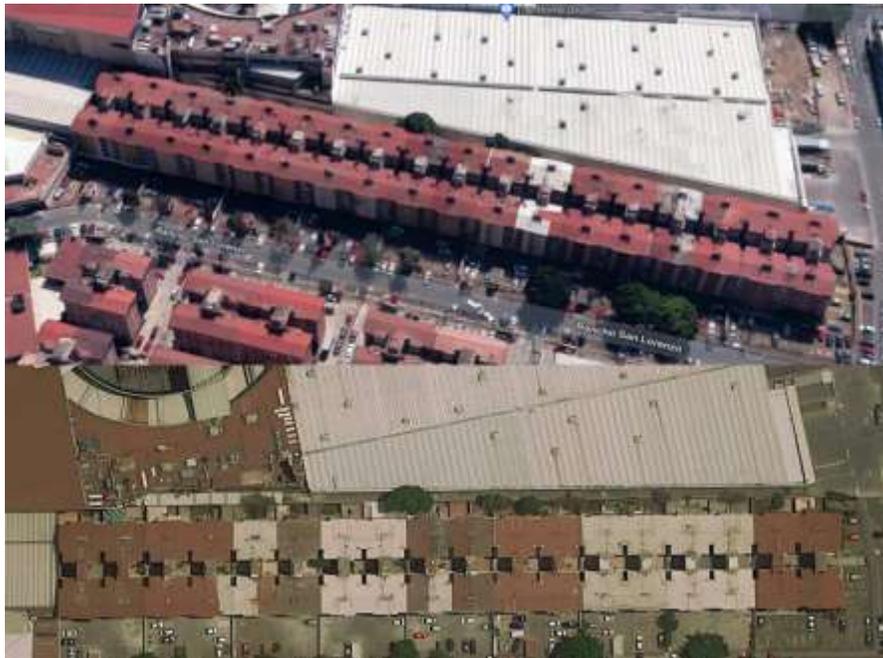


Figura 1.2 Ubicación del conjunto habitacional analizado (Google Earth, 2021).

1.4 DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO TIPO

Para el presente informe, se tomará un edificio del conjunto y se designará como tipo, de manera que puedan estudiarse sus propiedades y comportamiento esperado y extrapolarlo a los demás edificios del grupo.

El conjunto materia de este estudio es una unidad habitacional construida a principios de la década de 1980, entre 1983 y 1984, y está constituida por aproximadamente 50 edificios de características similares, los cuales constan de dos cuerpos de cinco niveles unidos por un par de cubos de escaleras, colocadas entre ambos en sus extremos y uniéndolos de manera que forman una sola estructura. Todos los edificios tienen una separación a colindancia paralela a los lados cortos con un valor aproximado de 25 cm.

En lo sucesivo, se identificarán los cuerpos que componen al edificio tipo de acuerdo con su orientación geográfica como: Cuerpo Oriente (Figura 1.3), cubos de escaleras norte y sur (Figura 1.4) y Cuerpo Poniente (Figura 1.5). El uso en ambos cuerpos es habitacional, aunque el cuerpo oriente aloja en la planta baja el estacionamiento del conjunto, y que se caracteriza por amplios claros entre columnas de 3.42 m x 4.07 m y en la circulación central claros de 4.07 x 5.94 m; no existen muros de ningún tipo en estacionamiento. Los entrepisos de los cuerpos oriente y poniente no se encuentran localizados a las mismas elevaciones, sino que existe una diferencia de 1.90 m, siendo el cuerpo poniente el que desplanta a una altura mayor.



Figura 1.3 *Fachada de acceso al Cuerpo Oriente, se aprecia el estacionamiento en la porción inferior.*



Figura 1.4 Cubos de escalera uniendo los cuerpos oriente y poniente.



Figura 1.5 Fachada posterior en Cuerpo Poniente.

Cada cuerpo tiene una forma sensiblemente rectangular en planta, cuyas dimensiones aproximadas son de 25.56 m de frente por 11.14 m de fondo (Figuras 1.6 y 1.7), y que son simétricas al cuerpo opuesto tanto en dimensiones como en distribución de muros. La altura total de cada

cuerpo es de 13.2 m para el cuerpo oriente y 12.5 m para el cuerpo poniente, con entrepisos tipo de 2.20 m excepto estacionamiento, el cual tiene una altura de entrepiso de 3.1 m (Figuras 1.8 y 1.9).

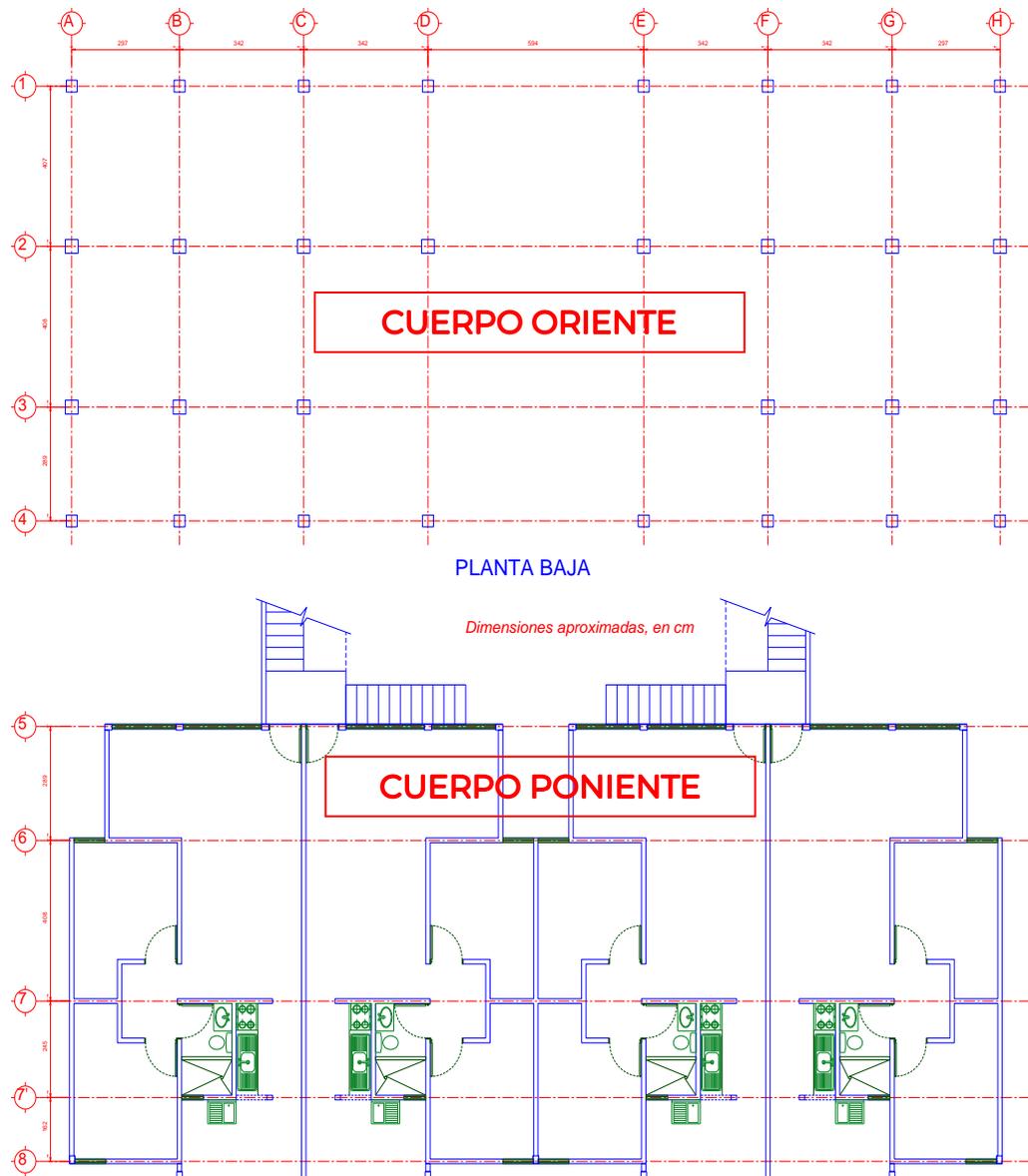


Figura 1.6 Planta arquitectónica del edificio correspondiente a Planta Baja.

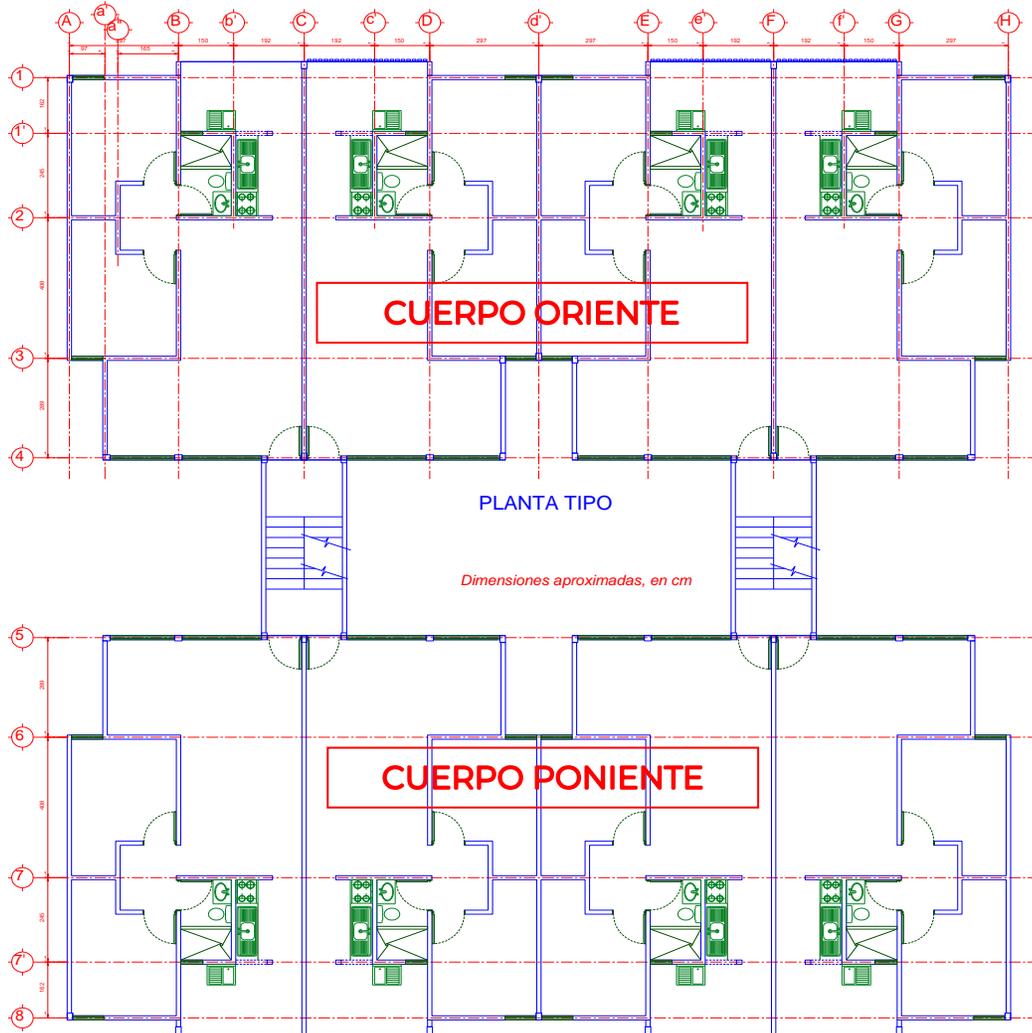


Figura 1.7 Planta arquitectónica del edificio correspondiente a los niveles tipo.

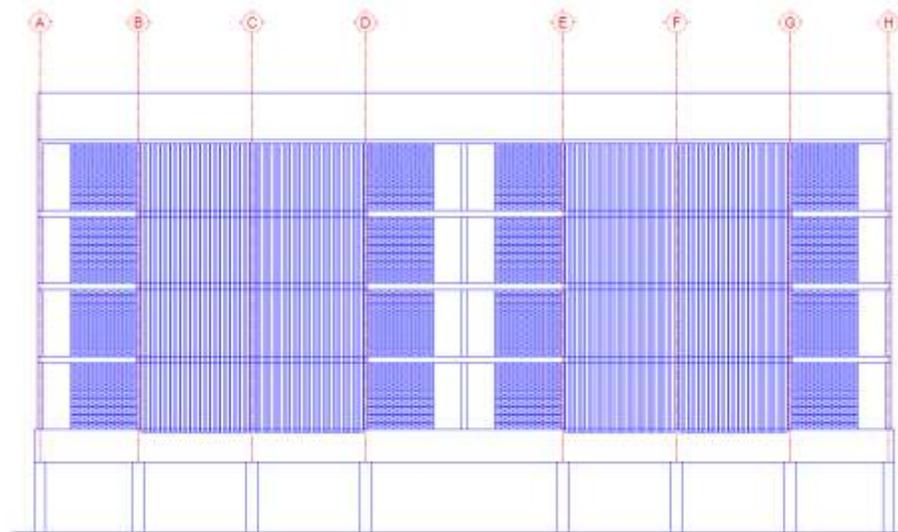


Figura 1.8 Fachada arquitectónica de acceso al edificio (Cuerpo Oriente).

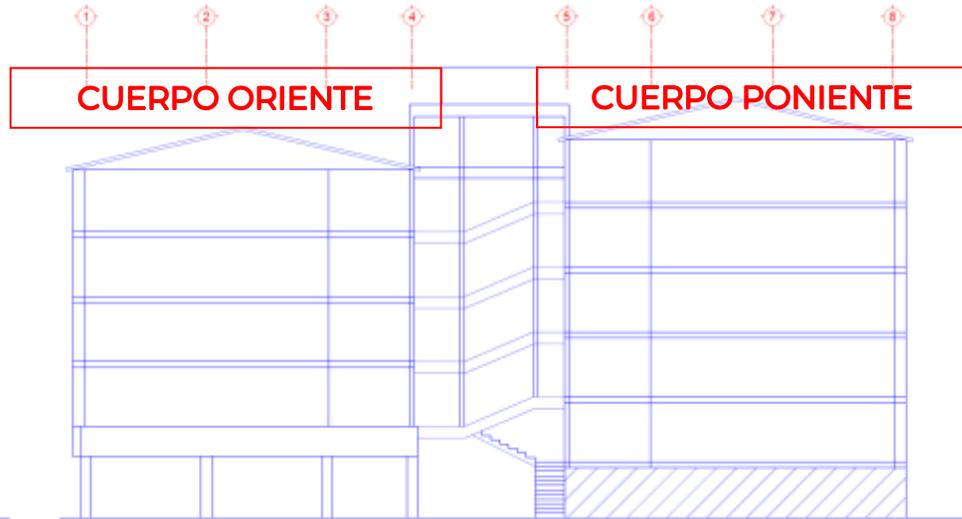


Figura 1.9 Corte esquemático en cuerpos oriente, poniente y cubo de escaleras.

1.5 ESTRUCTURACIÓN EN EL ESTADO ACTUAL

En el edificio tipo existen dos estructuraciones principales: el cuerpo oriente consta de una combinación de marcos rígidos de concreto en planta baja (planta baja flexible, ver 3.10) y muros de carga de mampostería hueca con refuerzo interior (ladrillos de arcilla huecos) en los niveles superiores; cabe destacar que en planta baja en las intersecciones de los ejes D – 3 y E – 3 (zona de estacionamiento), no existen columnas por lo que los marcos en esa zona tienen claros considerablemente mayores (Figura 1.10).



Figura 1.10 Vista del estacionamiento, donde se observa falta de columnas en dos intersecciones de ejes.

Existen dos tipos de columnas, denominadas K – 1 con sección cuadrada de 35 X 35 cm hacia el interior de la estructura, y K – 2 con sección cuadrada de 30 X 30 cm, que están colocadas principalmente en la periferia de la estructura; dado que no se realizó extracción de muestras o ensayos no destructivos, se supone una cuantía del 1% para el acero longitudinal,

mientras que el acero transversal se supone conforme a la práctica de la época como estribos de alambro con separación de 20 cm (Figura 1.11). En planta baja existen traveses de gran peralte denominados T - 1, cuyas dimensiones se estimaron de 40 X 100 cm.

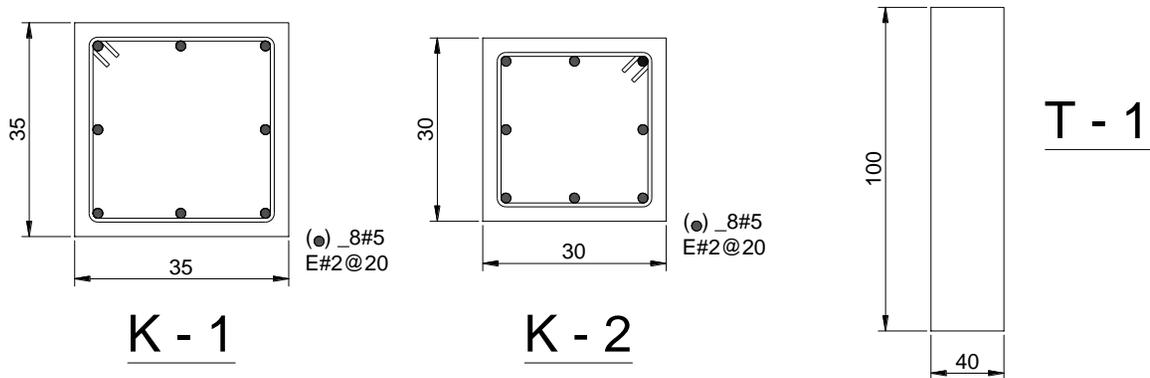


Figura 1.11 Secciones de los elementos estructurales principales en el Cuerpo Oriente.

El cuerpo poniente está constituido por muros de carga de mampostería hueca con refuerzo interior en toda su altura. Las losas de entepiso se suponen resueltas por medio de un sistema prefabricado de vigueta y bovedilla. La estructura es aproximadamente rectangular en planta, aunque presenta algunas salientes. El cuerpo poniente mantiene su estructuración en todos los niveles. Los cubos de escaleras están formados por marcos de concreto y estos se apoyan directamente en la estructura de los cuerpos oriente y poniente, uniéndolos.

La cimentación por lo que se pudo observar en campo corresponde a un cajón, cuyas celdas están moduladas por medio de muros de mampostería.

1.6 NORMATIVIDAD APLICABLE

Debido a la edad y características de la estructura, y con base en las modificaciones que han sufrido los reglamentos aplicables, para el desarrollo del estudio se emplearán los siguientes lineamientos técnicos y legales vigentes:

ABREVIATURA	REGLAMENTO O NORMA CORRESPONDIENTE
RCDF 17	“Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal”, publicado en el año 2017.
NTC CADEE 17	“Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones”, publicadas en el año 2017.
NTC CONCRETO 21	“Normas Técnicas Complementarias para Diseño de Estructuras de Concreto con comentarios”, publicadas en 2017 y actualizadas con comentarios en julio de 2021.
NTC MAMPOSTERÍA 20	“Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería con comentarios”, publicadas en 2017 y actualizadas con comentarios en octubre de 2020.
NTC REHABILITACIÓN 17	“Normas para la Rehabilitación Sísmica de Edificios de Concreto Dañados por el Sismo del 19 de septiembre de 2017”, publicadas en 2017.
NTC SISMO 20	“Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo con comentarios, publicadas en 2017 y actualizadas en junio de 2020.
SASID 20	“Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño”, publicado en formato de programa de cómputo en 2017 y actualizado en junio de 2020, disponible en línea. Actualmente el sistema se encuentra en etapa de pruebas.

Asimismo, para caracterizar el comportamiento de la estructura y atendiendo a su antigüedad, se utilizan los siguientes lineamientos técnicos y legales:

ABREVIATURA	REGLAMENTO O NORMA CORRESPONDIENTE
RCDF 76	“Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal”, publicado en el año 1976.
RCDF 87	“Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal”, publicado en el año 1987.
RCDF 93	“Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal”, publicado en el año 1993.
RCDF 04	“Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal”, publicado en el año 2004.

CAPÍTULO 2 CARGAS CONSIDERADAS

2.1 NOMENCLATURA DE PATRONES DE CARGA

Se define un patrón de carga como la distribución espacial del conjunto de acciones que actúan sobre la estructura y que atienden a su duración y origen. En concordancia con las NTC CADEE 17, las cargas empleadas para el análisis estructural se engloban en los siguientes patrones:

- Peso propio (PP)
- Carga muerta (CM)
- Carga viva máxima (CVM)
- Carga viva reducida (CVr)
- Sismo dinámico direcciones X ó Y (DINX ó DINY)
- Sismo estático estado límite de prevención de colapso direcciones X ó Y (SX_{COL} ó SY_{COL})
- Sismo estático estado límite de limitación de daños ante sismos frecuentes X ó Y (SX_{SF} ó SY_{SF})

Peso propio (PP).

Acción permanente que corresponde a la carga generada por los volúmenes de los elementos estructurales y sus materiales constitutivos. Patrón de carga estático lineal.

Carga muerta (CM).

Acción permanente que corresponde a la carga generada por los acabados, elementos sujetos de manera permanente a la estructura, así como los adicionales derivados del proceso constructivo. Patrón de carga estático lineal.

Carga viva máxima (CVM).

Acción variable producto del mobiliario, ocupación y operación con carácter dinámico de la estructura, considerando una intensidad máxima probable a lo largo de su vida esperada. Se emplea en combinación con las acciones permanentes y su valor está fijado en las normas técnicas correspondientes. Patrón de carga estático lineal.

Carga viva reducida (CVr).

Acción variable producto del mobiliario, ocupación y operación con carácter dinámico de la estructura, considerando una intensidad máxima probable estimada durante la ocurrencia de una acción accidental como lo es el sismo. Se emplea en combinación con las acciones variables y su valor está fijado en las normas técnicas correspondientes. Patrón de carga estático lineal.

Sismo dinámico direcciones X ó Y (DINX ó DINY).

Acción accidental que induce fuerzas a la estructura resultado de la ocurrencia de un sismo; dichas fuerzas son producto de la superposición proporcional de las respuestas modales de aquellos modos de vibrar que contribuyen apreciablemente a la respuesta del edificio usando el espectro de diseño. La determinación del espectro se realiza conforme a las normas vigentes y se muestra en el capítulo 3. Patrón de carga dinámico lineal.

Sismo estático estados límite de prevención de colapso y limitación de daños ante sismos frecuentes X ó Y (SX_{COL} ó SY_{COL} / SX_{SF} ó SY_{SF}).

Acción accidental que induce fuerzas a la estructura resultado de la ocurrencia de un sismo; para la revisión de desplazamientos laterales se determinará una abscisa del espectro de aceleraciones, correspondiente al periodo de vibrar en la dirección correspondiente y posteriormente se ingresa como un coeficiente sísmico para determinar desplazamientos por medio del método estático de análisis sísmico. La determinación del coeficiente sísmico y sus factores se determina en el capítulo 3.

2.2 INTENSIDADES DE CARGA POR CATEGORÍA DE OCUPACIÓN

Se presenta a continuación un resumen donde se incluyen las intensidades de carga adoptadas para los diferentes casos y en función de su clasificación por uso:

- Nivel Planta Baja y entresijos tipo: Uso habitacional.

PESO PROPIO

(*) El peso propio lo considera automáticamente el programa de análisis estructural.

(*) Losa maciza H = 15 cm 360 kg/m²

y/o

(*) Losa Vigüeta y Bovedilla de arena-cemento 25 cm 250 kg/m²

CARGA MUERTA

Acabado de piso	60 kg/m ²
Instalaciones	30 kg/m ²
Adicional NTC CADEE 17	<u>40 kg/m²</u>
$\Sigma =$	130 kg/m ²

CARGAS VIVAS

Carga viva máxima	190 kg/m ²
Carga viva reducida	100 kg/m ²

- Nivel Azotea: Uso azotea pendiente > 5%.

PESO PROPIO

(*) El peso propio lo considera automáticamente el programa de análisis estructural.

(*) Losa maciza H = 12 cm 288 kg/m²

CARGA MUERTA

Entortado e impermeabilización	80 kg/m ²
Instalaciones	30 kg/m ²
Adicional NTC CADEE 17	<u>40 kg/m²</u>
$\Sigma =$	270 kg/m ²

CARGAS VIVAS

Carga viva máxima	100 kg/m ²
Carga viva reducida	70 kg/m ²

- Nivel Azotea: Uso tanques elevados de agua, pendiente < 5%.

PESO PROPIO

(*) El peso propio lo considera automáticamente el programa de análisis estructural.

(*) Losa maciza H = 12 cm 288 kg/m²

CARGA MUERTA

Columna de agua en tanque, condición completamente lleno	1,200 kg/m ²
Instalaciones	30 kg/m ²
Adicional NTC CADEE 17	40 kg/m ²
$\Sigma =$	1,270 kg/m ²

CARGAS VIVAS

Carga viva máxima	40 kg/m ²
Carga viva reducida	20 kg/m ²

2.3 COMBINACIONES DE CARGAS

Los patrones de carga se deberán combinar entre sí para obtener las acciones de diseño y desplazamientos máximos. Para tomar en cuenta los efectos bidireccionales y excentricidad accidental, las diversas fuerzas se combinan de acuerdo al inciso 2.4 de las NTC SISMO 20, como se muestra a continuación:

COMBINACIÓN	CASOS	F.C.
C01	PP + CM + CV _{MÁX}	1
C02	PP + CM + CV _r + DINX(+1) + DINY(+0.3)	1
C03	PP + CM + CV _r + DINX(+1) + DINY(-0.3)	1
C04	PP + CM + CV _r + DINX(-1) + DINY(+0.3)	1
C05	PP + CM + CV _r + DINX(-1) + DINY(-0.3)	1
C06	PP + CM + CV _r + DINX(+0.3) + DINY(+1)	1
C07	PP + CM + CV _r + DINX(+0.3) + DINY(-1)	1
C08	PP + CM + CV _r + DINX(-0.3) + DINY(+1)	1
C09	PP + CM + CV _r + DINX(-0.3) + DINY(-1)	1
NTC01	(PP + CM) + CV _{MÁX}	1.3 y 1.5
NTC02	PP + CM + CV _r + DINX(+1) + DINY(+0.3)	1.1
NTC03	PP + CM + CV _r + DINX(+1) + DINY(-0.3)	1.1
NTC04	PP + CM + CV _r + DINX(-1) + DINY(+0.3)	1.1
NTC05	PP + CM + CV _r + DINX(-1) + DINY(-0.3)	1.1
NTC06	PP + CM + CV _r + DINX(+0.3) + DINY(+1)	1.1
NTC07	PP + CM + CV _r + DINX(+0.3) + DINY(-1)	1.1
NTC08	PP + CM + CV _r + DINX(-0.3) + DINY(+1)	1.1
NTC09	PP + CM + CV _r + DINX(-0.3) + DINY(-1)	1.1

La revisión de desplazamientos laterales se realiza a partir de cuatro combinaciones de carga adicionales correspondientes al estado límite de prevención de colapso y limitación de daños ante sismos frecuentes:

COMBINACIÓN	CASOS	C.S.
SX_{COL}	$(PP + CM + CV_r)$	1.03
SY_{COL}	$(PP + CM + CV_r)$	1.03
SX_{SF}	$(PP + CM + CV_r)$	0.25
SY_{SF}	$(PP + CM + CV_r)$	0.25

Asimismo, se incluye una combinación adicional para la revisión del cortante basal mínimo, que se define como peso total W_0 :

COMBINACIÓN	CASOS	F.C.
W_0	$PP + CM + CV_r$	1

CAPÍTULO 3 PARÁMETROS SÍSMICOS

3.1 GENERALIDADES

Para el análisis sísmico se emplearon las disposiciones vigentes de las normas técnicas correspondientes al capítulo de diseño por sismo. Para calcular las fuerzas laterales se utilizó el método dinámico modal espectral de acuerdo con 7.1 de NTC Sismo 20, que establece requisitos de regularidad que el edificio en cuestión no cumple y que se describen a detalle en la sección 3.4.

Se determinaron los espectros elástico y de diseño por medio del SASID 20, y posteriormente se integraron los espectros al software de diseño para evaluar la respuesta de la estructura ante el movimiento de sus masas.

Para la revisión de los estados límite de falla se emplean el espectro de diseño, mientras que para revisar los estados límite de servicio (prevención de colapso y limitación de daños ante sismos frecuentes) se determina la aceleración espectral correspondiente al periodo fundamental de vibrar y se aplica como un sistema estático de fuerzas equivalentes.

3.2 PARÁMETROS SÍSMICOS SUPUESTOS EN EL DISEÑO ORIGINAL

Respecto a los parámetros para el diseño sísmico y considerando la antigüedad del conjunto, se presume que fue diseñado con el reglamento de construcciones de 1977. En la Tabla 3.1. se muestran los valores del coeficiente de diseño sísmico que se han propuesto en distintos reglamentos a modo de comparación. De acuerdo con lo anterior, el coeficiente sísmico elástico para la estructura en el reglamento mencionado toma un valor de 0.24, que es considerablemente menor que el coeficiente propuesto en el reglamento vigente, cuyo valor de pseudoaceleración alcanza hasta 1.028 g.

Tabla 3.1 Coeficientes sísmicos elásticos según diversas versiones del RCDF

Versión del reglamento	Zonificación del suelo	Coefficiente sísmico
RCDF 1976	I. Terreno firme II. Terreno de transición III. Terreno compresible	0.1 0.20 0.24
RCDF 1987 – 1993	Zona I. Lomas(roca) Zona II. Transición (roca dura a menos de 20 m) Zona III. Lacustre (depósitos de arcilla)	0.16 0.32 0.4
RCDF 2004	Zona I Zona II Zona IIIa Zona IIIb Zona IIIc Zona IIId	0.16 0.32 0.4 0.45 0.4 0.3
RCDF 2017 (SASID 20)	Zona III	1.028

La magnitud de las aceleraciones espectrales del reglamento original comparadas con las del reglamento actual presentan una diferencia significativa (del orden de hasta 4.8 veces para el caso del espectro elástico y 3.34 veces el espectro de diseño), se muestran en la figura 3.1., donde se comparan los espectros de diseño para el proyecto con el RCDF 76 y las NTC-20.

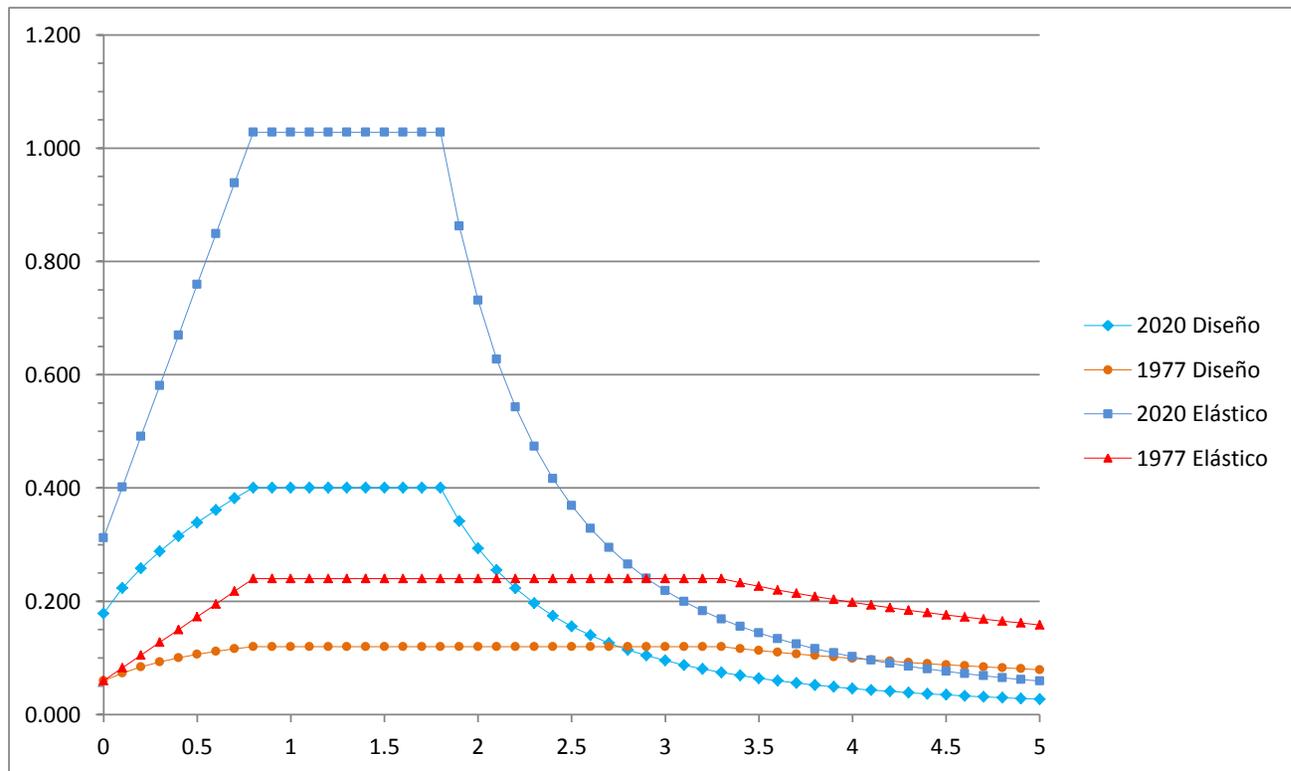


Figura 3.1 Espectros de diseño del RCDF 77 vs. NTC 2020.

3.3 UBICACIÓN EN LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

La microzonificación sísmica fue una herramienta que dividía a la Ciudad de México y parte de la zona metropolitana en tres categorías (Zonas I, II y III), asignando un coeficiente sísmico en base a las características geotécnicas del subsuelo. A pesar de que ya no está especificada como un requisito normativo, aún tiene utilidad para dar un indicio de las características del suelo en el proyecto.

De acuerdo a la zonificación sísmica, el conjunto se ubica en la zona IIIa denominada lacustre, la cual está compuesta principalmente por depósitos de arcillas altamente compresibles, con la posibilidad de encontrar aguas freáticas a poca profundidad (Figura 3.2). La característica de este tipo de suelos es que presenta bajas capacidades de carga, así como la posibilidad de amplificar las ondas sísmicas.



Figura 3.2 Ubicación del conjunto habitacional de acuerdo a la Zonificación Sísmica de la Ciudad de México

3.4 REVISIÓN DE CONDICIONES DE REGULARIDAD

Para determinar el factor de irregularidad de la estructura, se revisan las condiciones que se indican en las normas de sismo, cuyos resultados se muestran en la tabla 3.2:

Tabla 3.2 Condiciones de regularidad según 5.1 de NTC SISMO 20

CUMPLE	CONDICIONES DE REGULARIDAD DE ACUERDO A 5.1
✓	1.- Los diferentes muros, marcos y demás sistemas sismo-resistentes verticales son sensiblemente paralelos a los ejes ortogonales principales del edificio. Se considera que un plano o elemento sismo-resistente es sensiblemente paralelo a uno de los ejes ortogonales cuando el ángulo que forma en planta con respecto a dicho eje no excede de 15 grados.
✓	2.- La relación de su altura al a dimensión menor de su base no es mayor que cuatro. $\frac{H}{a} = \frac{13.3 \text{ m}}{11.04 \text{ m}} = 1.2$
✓	3.- La relación de largo a ancho de la base no es mayor que cuatro. $\frac{b}{a} = \frac{25.56 \text{ m}}{11.04 \text{ m}} = 2.32$
✗	4.- En planta no tienen entrantes ni salientes de dimensiones mayores que 20 por ciento de la dimensión de la planta medida paralelamente a la dirección en que se considera el entrante o saliente. $\frac{a}{s} = \frac{11.04 \text{ m}}{2.89 \text{ m}} = 0.26$
✓	5.- Cada nivel tiene un sistema de piso cuya rigidez y resistencia en su plano satisfacen lo especificado en la sección 2.7 para un diafragma rígido.
✓	La comprobación de la generación de diafragmas rígidos se muestra en el inciso 3.4.
✓	6.- El sistema de piso no tiene aberturas en algún nivel que excedan 20 por ciento de

	su área en planta en dicho nivel, y las áreas huecas no difieren en posición de un piso a otro. Se exige de este requisito la azotea de la construcción.																																																												
✓	7.- El peso de cada nivel, incluyendo la carga viva que debe considerarse para diseño sísmico, no es mayor que 120 por ciento del correspondiente al piso inmediato inferior.																																																												
✓	8.- En cada dirección, ningún piso tiene una dimensión en planta mayor que 110 por ciento de la del piso inmediato inferior. Además, ningún piso tiene una dimensión en planta mayor que 125 por ciento de la menor de las dimensiones de los pisos inferiores en la misma dirección.																																																												
✓	9.- Todas las columnas están restringidas en todos los pisos en las dos direcciones de análisis por diafragmas horizontales o por vigas. Por consiguiente, ninguna columna pasa a través de un piso sin estar ligada a él.																																																												
✓	10.- Todas las columnas de cada entrepiso tienen la misma altura, aunque esta pueda variar de un piso a otro. Se exige de este requisito al último entrepiso de la construcción.																																																												
x	<p>11.- La rigidez lateral de ningún entrepiso difiere en más del 20 por ciento de la del entrepiso inmediatamente inferior. El último entrepiso queda excluido de este requisito.</p> <p>Se muestran a continuación las rigideces de entrepiso de ambos cuerpos, considerando los cortantes producidos por el espectro de diseño, la variación en las rigideces no debe exceder el 20% por encima o por debajo de la unidad, es decir, el rango para considerar que se cumple la condición es que la variación de rigideces de un entrepiso respecto al otro se presente en un rango del 80% al 120%:</p> <p>Cuerpo Oriente:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Nivel</th> <th>Rigidez X ton/cm</th> <th>%VAR X</th> <th>Rigidez Y ton/cm</th> <th>%VAR Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>N.+12.90</td> <td>500.74</td> <td>78.6%</td> <td>1088.59</td> <td>73.5%</td> </tr> <tr> <td>N.+10.70</td> <td>636.70</td> <td>87.8%</td> <td>1480.45</td> <td>86.6%</td> </tr> <tr> <td>N.+08.50</td> <td>725.32</td> <td>75.6%</td> <td>1708.90</td> <td>87.7%</td> </tr> <tr> <td>N.+06.30</td> <td>959.95</td> <td>401.6%</td> <td>1948.46</td> <td>1029.1%</td> </tr> <tr> <td>N.+04.10</td> <td>239.03</td> <td>N/A</td> <td>189.33</td> <td>N/A</td> </tr> </tbody> </table> <p>Cuerpo Poniente:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Nivel</th> <th>Rigidez X ton/cm</th> <th>%VAR X</th> <th>Rigidez Y ton/cm</th> <th>%VAR Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>N.+12.90</td> <td>429.9</td> <td>76.9%</td> <td>1016.04642</td> <td>72.4%</td> </tr> <tr> <td>N.+10.70</td> <td>559.1</td> <td>88.6%</td> <td>1402.72486</td> <td>85.1%</td> </tr> <tr> <td>N.+08.50</td> <td>630.9</td> <td>89.1%</td> <td>1648.85471</td> <td>85.5%</td> </tr> <tr> <td>N.+06.30</td> <td>707.9</td> <td>69.1%</td> <td>1929.15964</td> <td>72.8%</td> </tr> <tr> <td>N.+04.10</td> <td>1024.3</td> <td>N/A</td> <td>2651.64404</td> <td>N/A</td> </tr> </tbody> </table> <p>Como se observa, existen en ambos cuerpos rigideces de entrepiso cuyos valores exceden el rango permisible, particularmente en el cuerpo oriente, donde existe un cambio fuerte de rigidez en el nivel de planta baja. Por lo tanto se concluye que no cumple la condición.</p>	Nivel	Rigidez X ton/cm	%VAR X	Rigidez Y ton/cm	%VAR Y	N.+12.90	500.74	78.6%	1088.59	73.5%	N.+10.70	636.70	87.8%	1480.45	86.6%	N.+08.50	725.32	75.6%	1708.90	87.7%	N.+06.30	959.95	401.6%	1948.46	1029.1%	N.+04.10	239.03	N/A	189.33	N/A	Nivel	Rigidez X ton/cm	%VAR X	Rigidez Y ton/cm	%VAR Y	N.+12.90	429.9	76.9%	1016.04642	72.4%	N.+10.70	559.1	88.6%	1402.72486	85.1%	N.+08.50	630.9	89.1%	1648.85471	85.5%	N.+06.30	707.9	69.1%	1929.15964	72.8%	N.+04.10	1024.3	N/A	2651.64404	N/A
Nivel	Rigidez X ton/cm	%VAR X	Rigidez Y ton/cm	%VAR Y																																																									
N.+12.90	500.74	78.6%	1088.59	73.5%																																																									
N.+10.70	636.70	87.8%	1480.45	86.6%																																																									
N.+08.50	725.32	75.6%	1708.90	87.7%																																																									
N.+06.30	959.95	401.6%	1948.46	1029.1%																																																									
N.+04.10	239.03	N/A	189.33	N/A																																																									
Nivel	Rigidez X ton/cm	%VAR X	Rigidez Y ton/cm	%VAR Y																																																									
N.+12.90	429.9	76.9%	1016.04642	72.4%																																																									
N.+10.70	559.1	88.6%	1402.72486	85.1%																																																									
N.+08.50	630.9	89.1%	1648.85471	85.5%																																																									
N.+06.30	707.9	69.1%	1929.15964	72.8%																																																									
N.+04.10	1024.3	N/A	2651.64404	N/A																																																									
x	<p>12.- En ningún entrepiso, el desplazamiento lateral de algún punto de la planta excede en más de 20 por ciento el desplazamiento lateral promedio de los extremos de esta.</p> $u_{prom} = \frac{u_{m\acute{a}x} + u_{m\acute{i}n}}{2}$																																																												

$$v_{m\acute{a}x} \leq 1.2 v_{prom}$$

Cuerpo Oriente:

DIRECCIÓN X				DIRECCIÓN Y			
Nivel	U _{LAT MÁX} cm	U _{LAT prom} cm	¿CUMPLE?	Nivel	U _{LAT MÁX} cm	U _{LAT prom} cm	¿CUMPLE?
AZ N.+ 11.90	8.12	7.58	CUMPLE	AZ N.+ 11.90	2.854	2.08	NO CUMPLE
N4 N.+09.70	7.268	6.77	CUMPLE	N4 N.+09.70	2.446	1.78	NO CUMPLE
N3 N.+07.50	6.086	5.64	CUMPLE	N3 N.+07.50	1.924	1.38	NO CUMPLE
N2 N.+05.30	4.758	4.37	CUMPLE	N2 N.+05.30	1.36	0.96	NO CUMPLE
N1 N.+03.10	3.682	3.35	CUMPLE	N1 N.+03.10	0.914	0.63	NO CUMPLE
PB N.+00.00	0	0		PB N.+00.00	0	0	

Cuerpo Poniente:

DIRECCIÓN X				DIRECCIÓN Y			
Nivel	Δ _{LAT MÁX} cm	Δ _{LAT prom} cm	¿CUMPLE?	Nivel	U _{LAT MÁX} cm	U _{LAT prom} cm	¿CUMPLE?
AZ N.+ 12.90	6.92	6.32	CUMPLE	AZ N.+ 12.90	3.011	2.20	NO CUMPLE
N4 N.+10.70	6.072	5.53	CUMPLE	N4 N.+10.70	2.632	1.92	NO CUMPLE
N3 N.+08.50	4.878	4.41	CUMPLE	N3 N.+08.50	2.128	1.55	NO CUMPLE
N2 N.+06.30	3.37	2.99	CUMPLE	N2 N.+06.30	1.514	1.10	NO CUMPLE
N1 N.+04.10	1.615	1.39	CUMPLE	N1 N.+04.10	0.795	0.57	NO CUMPLE
PB N.+01.90	0	0		PB N.+01.90	0	0	

En ambos cuerpos no se cumple la condición para el sentido Y.

13.- En sistemas diseñados para $Q \leq 3$, en ningún entepiso el cociente de la capacidad resistente a carga lateral entre la acción de diseño debe ser menor que el 75 por ciento del promedio de dichos cocientes para todos los entepisos.. Para verificar el cumplimiento de este requisito, se calculará la capacidad resistente de cada entepiso teniendo en cuenta todos los elementos que puedan contribuir apreciablemente a ella. Queda excluido de este requisito el último entepiso.

Se muestran las resistencias de diseño a cortante totales para cada entepiso, así como la fuerza lateral de diseño para el caso más desfavorable:

Cuerpo Oriente:

Nivel	Caso de carga	V DX ton	V RX ton	VRX/VDX	¿Cumple?	Caso de carga	VDY ton	VRY ton	VRY/VDY	¿Cumple?
N4 N.+09.70	NTC 03	109.5	87.43	0.80	CUMPLE	NTC 07	71.5	361.15	5.05	CUMPLE
N3 N.+07.50	NTC 03	192.97	98.59	0.51	NO CUMPLE	NTC 07	137.6	407.25	2.96	CUMPLE
N2 N.+05.30	NTC 03	249.7	109.74	0.44	NO CUMPLE	NTC 07	182.4	453.32	2.49	CUMPLE
N1 N.+03.10	NTC 03	273.7	120.90	0.44	NO CUMPLE	NTC 07	175.7	499.42	2.84	CUMPLE
PB N.+00.00	NTC 03	277.66	344.50	1.24	CUMPLE	NTC 07	101.5	344.5	3.39	CUMPLE

SUMA 1103.53 761.16 668.7 2065.63
 PROMEDIOS= 220.71 152.23 $V_{DY PROM} = 133.74$ 413.13

$$0.75 * \frac{V_{RX PROM}}{V_{DX PROM}} = 0.52$$

$$0.75 * \frac{V_{RX PROM}}{V_{DX PROM}} = 2.32$$

Cuerpo Poniente:

Nivel	Caso de carga	V DX ton	V RX ton	VRX/VDX	¿Cumple?	Caso de carga	VDY ton	VRY ton	VRY/VDY	¿Cumple?
N4 N.+10.70	NTC 03	87.9	87.38	0.99	CUMPLE	NTC 07	70.9	360.95	5.09	CUMPLE
N3 N.+08.50	NTC 03	167.33	98.50	0.59	CUMPLE	NTC 07	127.6	406.87	3.19	CUMPLE
N2 N.+06.30	NTC 03	243.8	109.61	0.45	CUMPLE	NTC 07	195.5	452.79	2.32	CUMPLE
N1 N.+04.10	NTC 03	321	120.72	0.38	CUMPLE	NTC 07	283.4	498.68	1.76	CUMPLE
PB N.+01.90	NTC 03	419.2	131.84	0.31	NO CUMPLE	NTC 07	448.0	544.58	1.22	NO CUMPLE

SUMA 1239.23 548.05 1125.4 2263.86
 PROMEDIOS= 247.85 109.61 $V_{DY PROM} = 225.08$ 452.77

$$0.75 * \frac{V_{RX PROM}}{V_{DX PROM}} = 0.33$$

$$0.75 * \frac{V_{RX PROM}}{V_{DX PROM}} = 1.51$$

Para cada cuerpo y dirección, se determinó que no se cumple la condición.

Dado que no se cumplen los puntos 4, 11 y 12, la estructura se cataloga como muy irregular según 5.3 y se le asigna un factor de irregularidad de 0.7.

Debido a que se encontró un cambio súbito de rigideces y resistencias (condiciones 11 y 13), se deberá evaluar adicionalmente la condición de “planta baja flexible”, lo que implica que el primer entrepiso forzosamente deberá ser capaz de resistir fuerzas cortantes en la base correspondientes a las generadas por un factor de reducción por comportamiento sísmico de 1. Consultar 3.10.

3.5 REVISIÓN DE DIAFRAGMAS EN SISTEMAS DE PISO

Para garantizar la condición de sistema de piso rígido, se revisa que la deformación máxima en los entrepisos en el estado límite de colapso en ambas direcciones no sea mayor que dos veces el promedio de las deformaciones laterales de los planos estructurales ubicados en el entrepiso debajo del diafragma considerado como rígido, como se indica en 2.7.1 de NTC SISMO 20. A continuación, se muestran las posiciones y valores de máximos desplazamientos para ambos cuerpos:

Cuerpo Oriente. Direcciones X y Y:

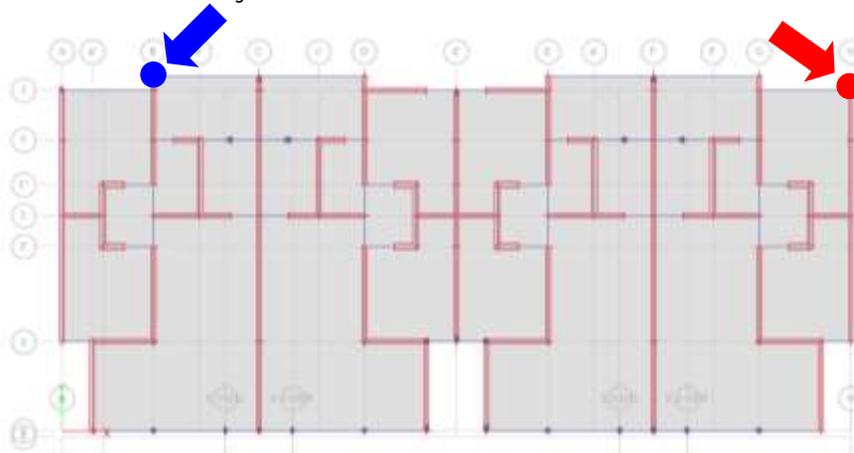


Figura 3.3 Planta de Cuerpo Oriente, punto de máximo desplazamiento dirección X (azul) y Y (rojo).

Tabla 3.3 Desplazamientos máximos y promedio Cuerpo Oriente

DIRECCIÓN X				DIRECCIÓN Y			
Nivel	U _{LAT} MÁX cm	U _{LAT} prom cm	¿CUMPLE?	Nivel	U _{LAT} MÁX cm	U _{LAT} prom cm	¿CUMPLE?
AZ N.+ 11.90	8.12	7.58	CUMPLE	AZ N.+ 11.90	2.854	2.08	CUMPLE
N4 N.+09.70	7.268	6.77	CUMPLE	N4 N.+09.70	2.446	1.78	CUMPLE
N3 N.+07.50	6.086	5.64	CUMPLE	N3 N.+07.50	1.924	1.38	CUMPLE
N2 N.+05.30	4.758	4.37	CUMPLE	N2 N.+05.30	1.36	0.96	CUMPLE
N1 N.+03.10	3.682	3.35	N/A	N1 N.+03.10	0.914	0.63	N/A
PB N.+00.00	0	0		PB N.+00.00	0	0	

Se cumple la relación de los desplazamientos máximos respecto de los promedios en ambas direcciones, de modo que se pueden establecer diafragmas rígidos en los sistemas de piso del cuerpo.

Cuerpo Poniente. Direcciones X y Y:

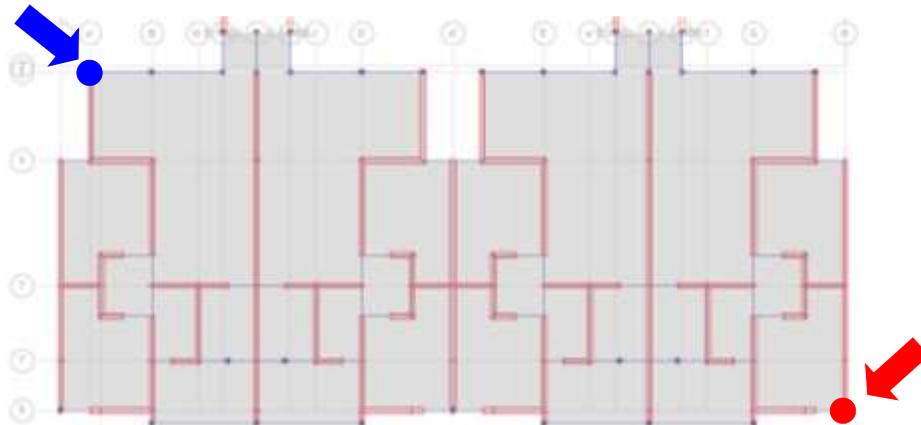


Figura 3.4 Planta de Cuerpo Poniente, punto de máximo desplazamiento dirección X (azul) y Y (rojo).

Tabla 3.4 Desplazamientos máximos y promedio Cuerpo Poniente

DIRECCIÓN X				DIRECCIÓN Y			
Nivel	U _{LAT MÁX} cm	U _{LAT prom} cm	¿CUMPLE?	Nivel	U _{LAT MÁX} cm	U _{LAT prom} cm	¿CUMPLE?
AZ N.+12.90	6.92	6.32	CUMPLE	AZ N.+12.90	3.011	2.20	CUMPLE
N4 N.+10.70	6.072	5.53	CUMPLE	N4 N.+10.70	2.632	1.92	CUMPLE
N3 N.+08.50	4.878	4.41	CUMPLE	N3 N.+08.50	2.128	1.55	CUMPLE
N2 N.+06.30	3.37	2.99	CUMPLE	N2 N.+06.30	1.514	1.10	CUMPLE
N1 N.+04.10	1.615	1.39	N/A	N1 N.+04.10	0.795	0.57	N/A
PB N.+01.90	0	0		PB N.+01.90	0	0	

Se cumple la relación de los desplazamientos máximos respecto de los promedios en ambas direcciones en ambos cuerpos, por lo que los sistemas de piso pueden clasificarse como diafragmas rígidos.

3.6 DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE COMPORTAMIENTO SÍSMICO Y DISTORSIONES PERMISIBLES.

Los espectros elástico y de diseño son el punto de partida para la revisión de los diversos estados límite; para su construcción se deberán definir los parámetros asociados tanto al comportamiento esperado de la estructura en términos de la energía que ha de disipar por deformación, como de su correspondiente reducción dependiendo del sistema estructural. En esta sección se definen las categorías de acuerdo al sistema estructural, el factor de comportamiento sísmico así como los límites permisibles para la revisión del estado límite de colapso, de acuerdo a la sección 4.1.

El sistema estructural para el cuerpo oriente es de marcos rígidos en planta baja y de muros de carga de mampostería confinada de piezas huecas en los niveles superiores, de acuerdo al inciso b) de la sección mencionada, se emplea el sistema estructural más desfavorable para fijar el valor de Q y γ , que corresponde al sistema de muros de mampostería.

Según lo estipulado en las normas y debido a que la estructura es a base de piezas de mampostería de piezas huecas reforzadas interiormente, se emplea un factor $Q=1.5$ y una limitación a distorsiones para el estado límite de colapso de 0.006.

Estructuración	Q	γ_{max}
Muros de carga de mampostería confinada de piezas macizas con refuerzo horizontal ⁽²⁾	2.0	0.010
Muros de carga de mampostería confinada de piezas macizas	2.0	0.005
Muros de carga de mampostería confinada de piezas huecas con refuerzo horizontal ⁽²⁾	2.0	0.008
Muros de carga de mampostería confinada de piezas huecas	1.5	0.004
Muros de carga de mampostería de piezas huecas reforzadas interiormente	1.5	0.006
Muros diafragma	(3)	(4)
Muros de carga de mampostería confinada en combinación con otro sistema estructural de concreto o acero	(3)	(4)
Muros de carga de mampostería de piezas huecas o macizas no confinados ni reforzados ⁽⁵⁾	1.0	0.002
Mampostería de piedras naturales	1.0	0.002

Figura 3.5 Factores de comportamiento sísmico y distorsiones límite para estructuras de mampostería (Tabla 4.2.3 de las NTC Mampostería 2020).

3.7 DATOS DE ENTRADA Y SALIDA EN EL SASID 20

El SASID es un sistema de información en internet que sirve para obtener los espectros elásticos y de diseño, a partir de información básica como la ubicación, el uso de la estructura, los materiales predominantes del sistema estructural, entre otros.

Para determinar los espectros correspondientes al sitio, se ingresa al SASID 20 con los siguientes datos de entrada (Figura 3.6):

Coordenadas	(19.309176, -99.125188)
Factor de comportamiento sísmico	Q = 1.5
Factor de importancia	I = 1.0
Factor de sobrerresistencia	R ₀ = 2.0
Factor de hiperestaticidad	k ₁ = 1
Factor de irregularidad	F. Irr. = 0.7

Selecciones los parámetros para la obtención de información:

Figura 3.6 Parámetros de entrada al sistema SASID para el proyecto.

De la plataforma electrónica se obtienen los siguientes datos de salida:

Aceleración máxima del terreno	$a_0 = 0.312$
Periodo característico, límite inferior	$T_a = 0.8 \text{ s}$
Periodo característico, límite superior	$T_b = 1.8 \text{ s}$
Cociente entre despl. máximo del suelo y estructura	$k = 0.361$
Periodo dominante de vibrar más largo del terreno	$T_s = 1.0 \text{ s}$
Coefficiente sísmico elástico	$c = 1.028$

3.8 ESPECTROS ELÁSTICO Y DE DISEÑO

En base a los parámetros de salida, el SASID 20 genera los siguientes correspondientes espectros (Figura 3.7):

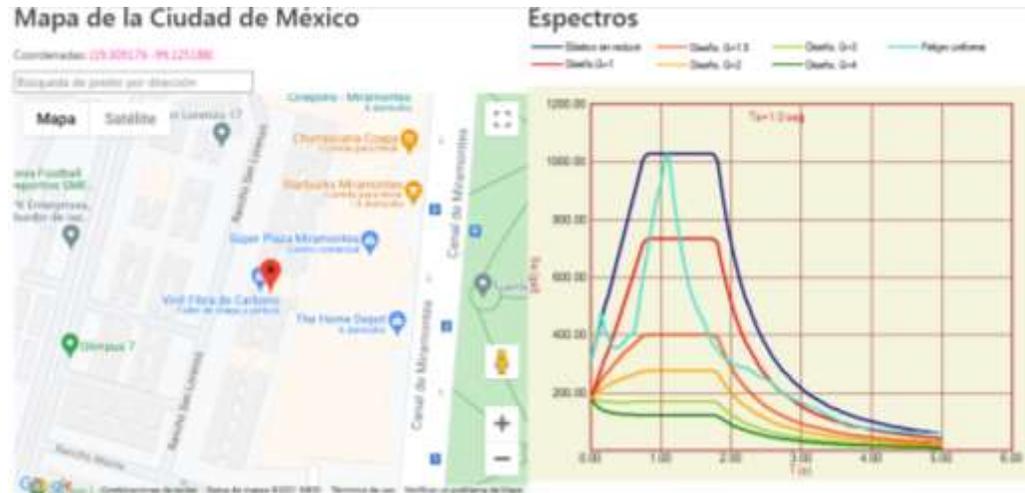


Figura 3.7 Parámetros de salida del sistema SASID para el proyecto

3.9 ACELERACIONES ESPECTRALES PARA REVISIÓN DE ESTADOS LÍMITE DE PREVENCIÓN DE COLAPSO Y LIMITACIÓN DE DAÑOS POR SISMOS FRECUENTES

Una vez determinados los espectros elásticos y de diseño, se parte de estos para encontrar las aceleraciones espectrales necesarias para revisar estados límite de prevención de colapso y limitación de daños por sismos frecuentes, por lo que:

De acuerdo a 1.8 a), para la aceleración de colapso se tiene:

$$a_{COL} = a_{Dis} * Q * R = 0.32 * 1.5 * 2.14 = 1.03$$

Mientras que para el estado límite de sismos frecuentes, según 3.1.1 se tiene:

$$a_{SF} = a_{Dis} * Q' * R * K_S$$

El factor K_S se determina como:

$$K_S \begin{cases} \frac{1}{6}; & \text{si } T_S \leq 0.5 \text{ s} \\ \frac{1}{6 - 4(T_S - 0.5)}; & \text{si } 0.5 \leq T_S < 1.0 \text{ s} \\ \frac{1}{4}; & \text{si } T_S \geq 1.0 \text{ s} \end{cases}$$

Finalmente, dado que $T_s = 1 \text{ s}$, la aceleración para el estado límite de limitación de daños por sismos frecuentes es:

$$a_{SF} = 0.32 * 1.44 * 2.14 * 0.25 = 0.25$$

Donde:

a_{COL} : Aceleración espectral para revisar distorsiones en el estado límite de colapso.

a_{SF} : Aceleración espectral para revisar distorsiones en el estado límite de limitación de daños.

K_S Cociente entre ordenadas espectrales del espectro de seguridad contra colapso y las correspondientes al requisito de limitación de daños, independiente de T.

Para la revisión de estados límite asociados al comportamiento de la estructura bajo condiciones sísmicas, se tomarán las aceleraciones correspondientes al periodo fundamental de vibrar y se aplicarán como un sistema de fuerzas estáticas al modelo para conocer los desplazamientos y distorsiones correspondientes. Dichos desplazamientos se comparan contra los permisibles para determinar si la estructura cumple con los estados límite.

CAPÍTULO 4 MODELO ESTRUCTURAL

4.1 MATERIALES

Debido a la antigüedad de la estructura, se procurará utilizar las resistencias de materiales y distribuciones propias de la época. Para fines del análisis, se usaron los siguientes materiales con sus correspondientes propiedades mecánicas:

Concreto

Clase 2, $f'_c = 200 \text{ kg/cm}^2$ para elementos estructurales tales como castillos, dalas, columnas, trabes y losas. Las normas de concreto del RCDF-76 establecían un módulo de elasticidad $E = 10,000 \sqrt{f'_c}$, salvo que hubiera pruebas de laboratorio que respaldaran un valor diferente. Dado que en los nuevos reglamentos se reflejan los resultados de investigaciones sobre la resistencia del concreto, se tomará el valor establecido en las NTC CONCRETO 21, que establecen un módulo de elasticidad $E = 8,000 \sqrt{f'_c}$.

Acero de refuerzo

Respecto al acero de refuerzo, las propiedades mecánicas no presentan una variación en sus valores entre reglamentos, por lo que se toma $f_y = 4,200 \text{ kg/cm}^2$ con módulo elástico $E = 2,089,000 \text{ kg/cm}^2$, excepto en barras de refuerzo del no. 2, que tendrán un $f_{ye} = 2,530 \text{ kg/cm}^2$.

Mampostería

Las piezas empleadas son de tabiques huecos de arcilla, correspondientes a piezas 12X12X24 cm. Para caracterizar las piezas de mampostería, se toman los valores mínimos permitidos por las normas. En piezas de tabique hueco de arcilla extruido, se tiene $f'_m = 20 \text{ kg/cm}^2$ con módulo de elasticidad $E_m = 600 f'_m = 12,000 \text{ kg/cm}^2$ (para análisis por sismo) y $E_m = 350 f'_m = 7,000 \text{ kg/cm}^2$ (para análisis por carga vertical); resistencia a la compresión diagonal $v'_m = 2 \text{ kg/cm}^2$ y módulo de cortante $G_m = 0.2 E_m = 2,400 \text{ kg/cm}^2$ (para análisis por sismos) y $G_m = 1,400$ (para análisis por carga vertical). Respecto al refuerzo horizontal y vertical interior, se supone una distribución tal que cumpla con los requisitos mínimos según las NTC MAMPOSTERÍA 20, tanto en términos de cuantía como de esfuerzos de fluencia.

4.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Se consideraron las cargas permanentes y variables que actúan sobre la estructura, así como la geometría de las secciones y las propiedades mecánicas de los materiales para efectuar un análisis estructural sobre la base de un modelo matemático tridimensional de respuesta elástica ante carga vertical y carga lateral inducida por un espectro de aceleraciones.

Dicho modelo empleó el método de análisis de elementos finitos de tipo simplificado, de acuerdo al anexo B.2 de las normas de mampostería, donde no se realiza una discretización exhaustiva de los elementos estructurales hasta formar elementos finitos de dimensiones unitarias, sino que los paneles están delimitados en el área que encierran los castillos y dalas. La estructura fue idealizada con miembros barra formando marcos columna-trabe y miembros placa para representar muros y sistemas de piso. Al ser los muros de mampostería el sistema estructural principal, se modelan estos con elementos tipo cascarón,

Se consideraron apoyos empotrados bajo columnas y muros en los desplantes para simular la rigidez del cajón de cimentación.

4.3 IMÁGENES DEL MODELO ESTRUCTURAL

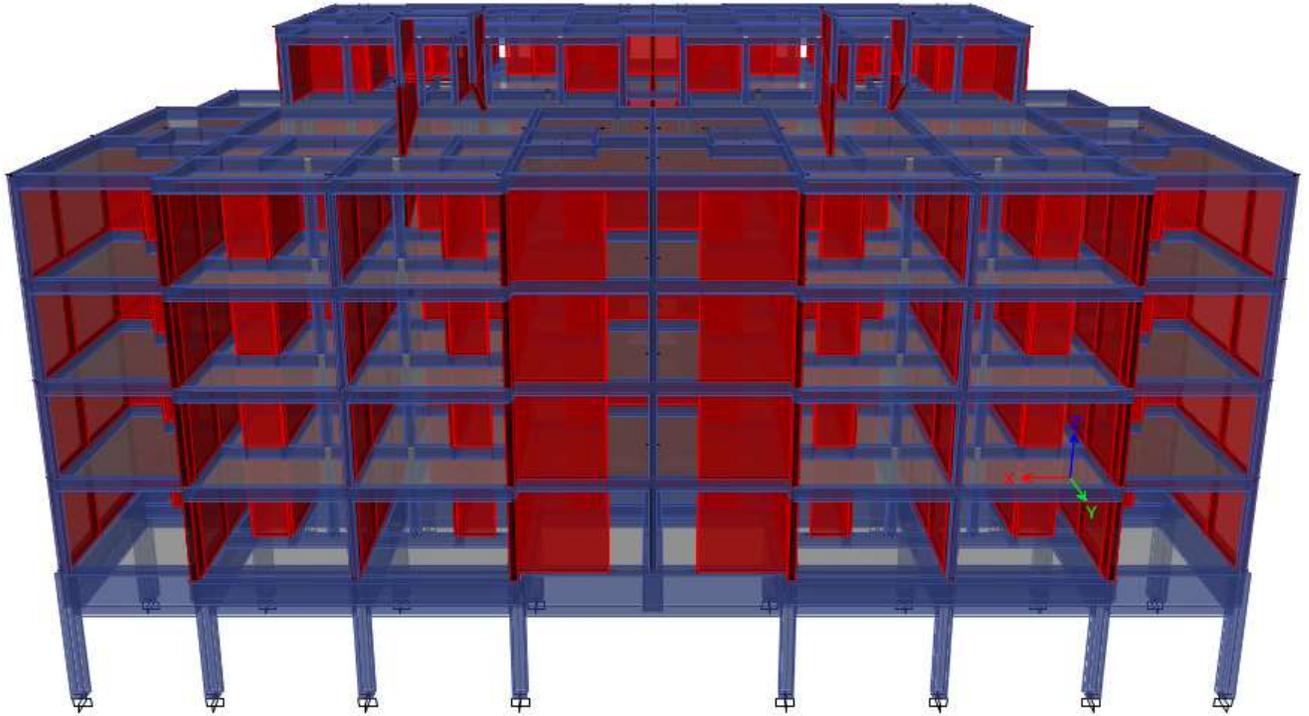


Figura 4.1 Modelo estructural, vista isométrica. En primer plano se observa el cuerpo oriente.

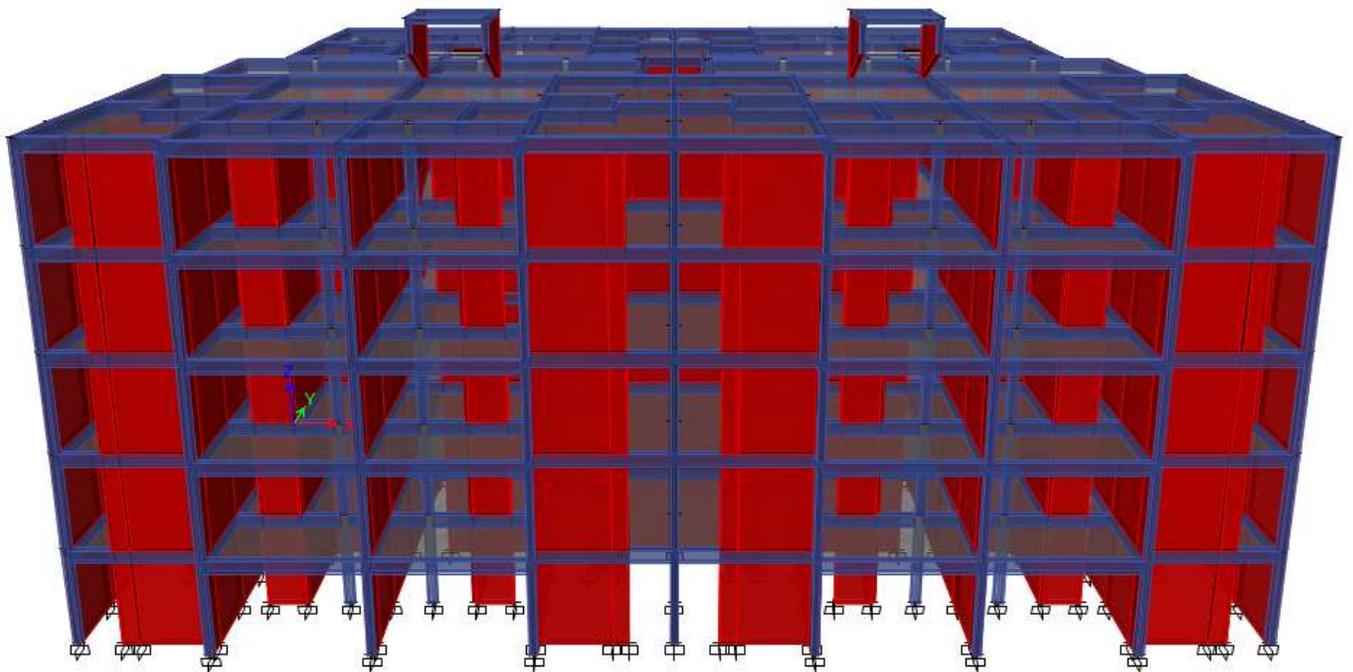


Figura 4.2 Modelo estructural, vista isométrica. En primer plano se observa el cuerpo poniente.

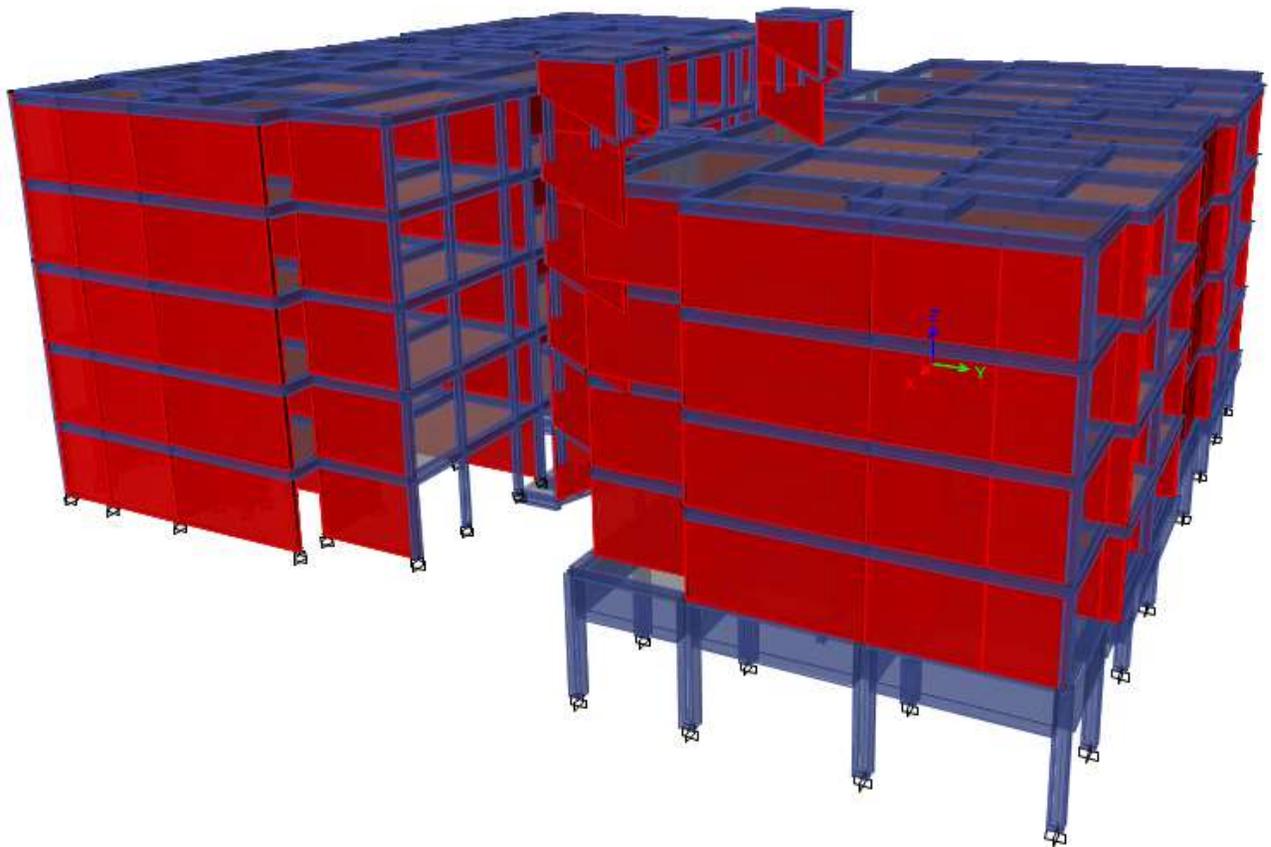


Figura 4.3 Modelo estructural, vista isométrica de edificio completo.



Figura 4.4 Modelo estructural, vista isométrica del edificio completo.

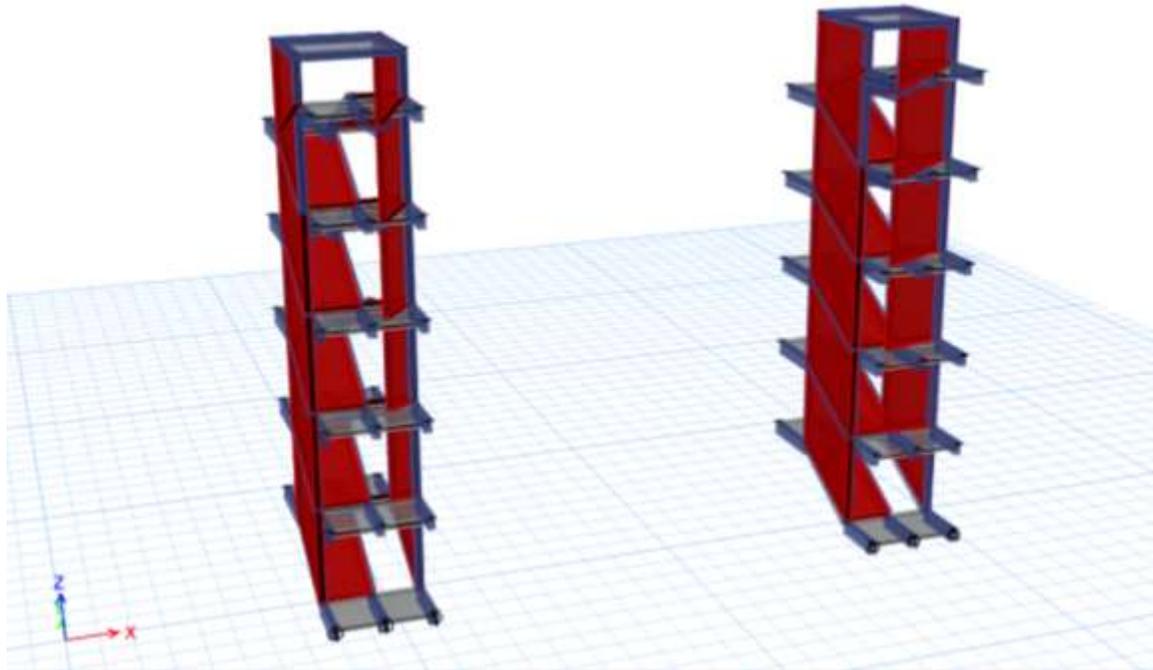


Figura 4.5 Modelo estructural, vista isométrica de cubos de escaleras norte y sur.

CAPÍTULO 5 RESULTADOS

5.1 MODOS DE VIBRAR

Se presentan a continuación los primeros tres modos de vibrar, que engloban los desplazamientos laterales característicos de la estructura:

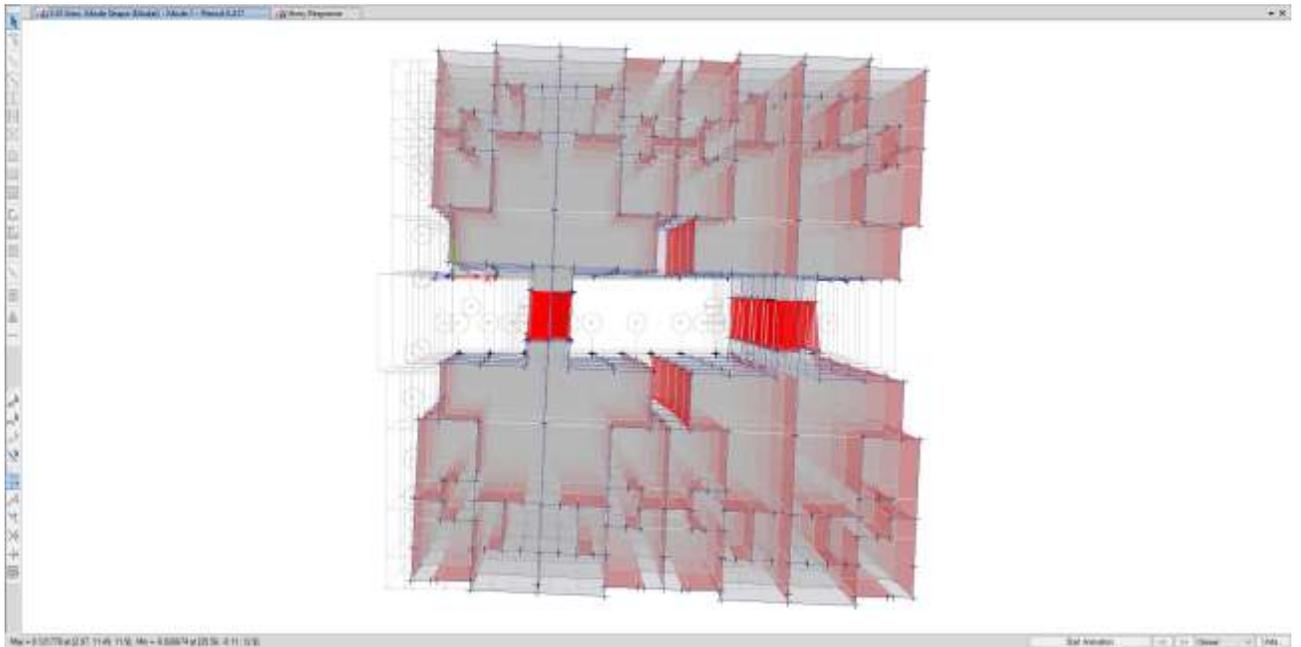


Figura 5.1 Primer modo de vibración: Traslación en sentido longitudinal con torsión. Periodo $T = 0.417$ s.

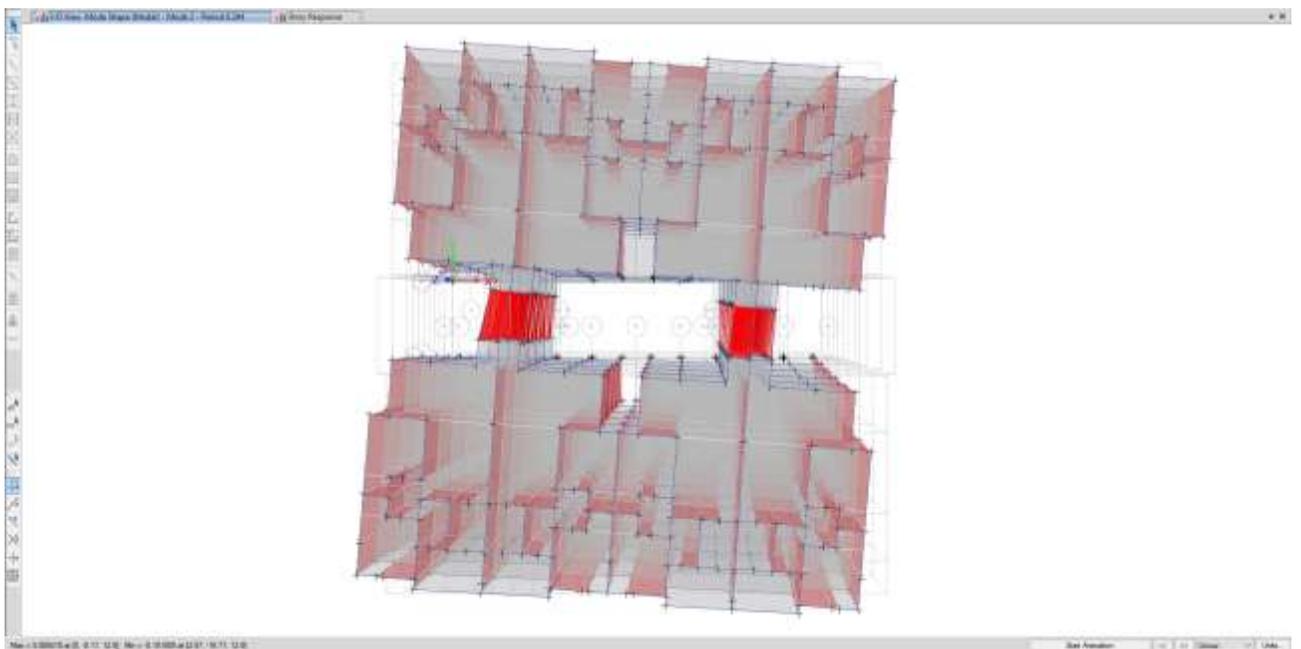


Figura 5.2 Segundo modo de vibración: Torsión. Periodo $T = 0.294$ s.

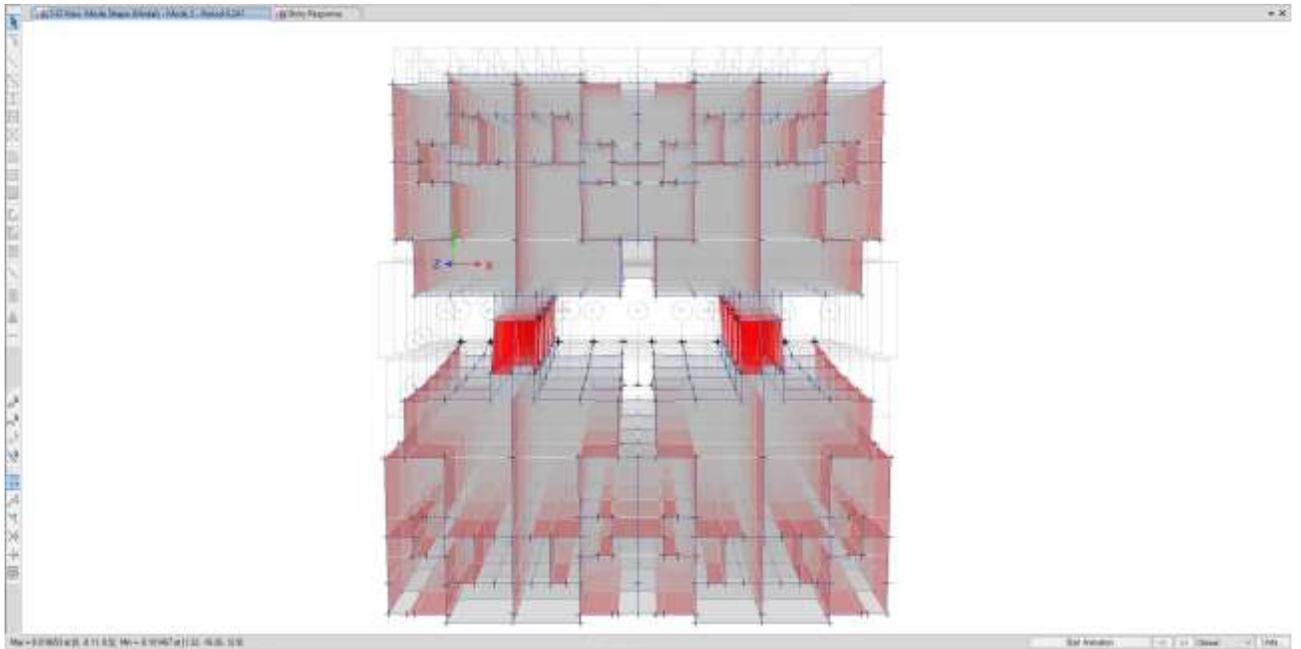


Figura 5.3 Tercer modo de vibración: Traslación en sentido transversal. Periodo $T = 0.241$ s.

5.2 DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS EN ESTADO LÍMITE DE PREVENCIÓN DE COLAPSO (ELC)

Se presenta a continuación de manera gráfica las distorsiones que se producen en cada entrepiso para el estado límite de prevención de colapso, así como los límites correspondientes establecidos en la sección 1.8 de las NTC SISMO 20 (que se traza en la gráfica como una línea vertical), para cada cuerpo y en las dos direcciones.

Cuerpo Oriente

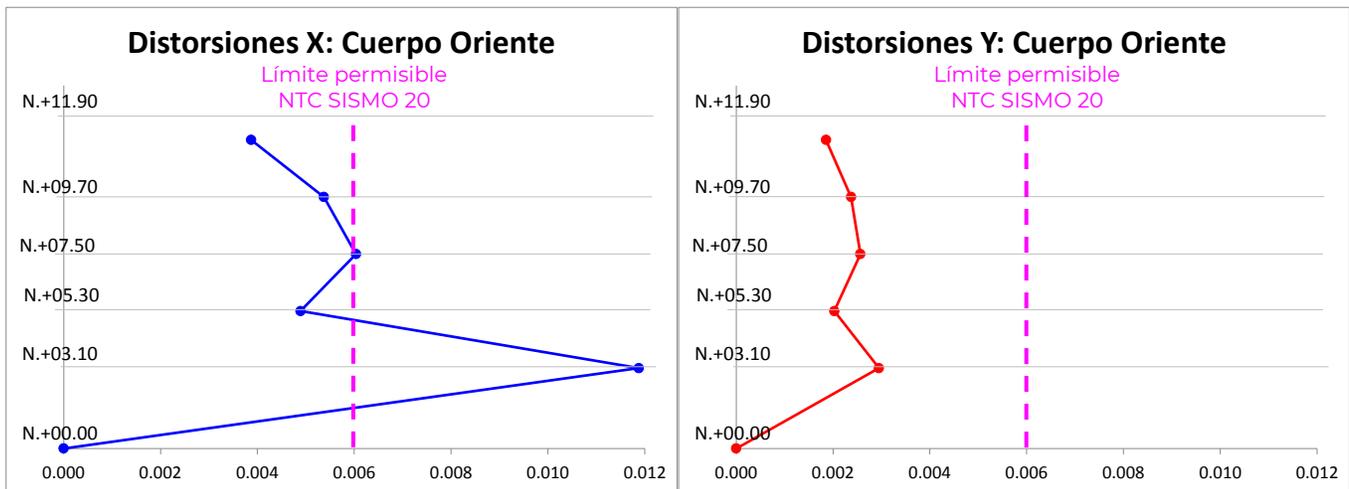


Figura 5.4 Distorsiones de entrepiso sentido X y Y para el ELC, Cuerpo Oriente.

Cuerpo Poniente

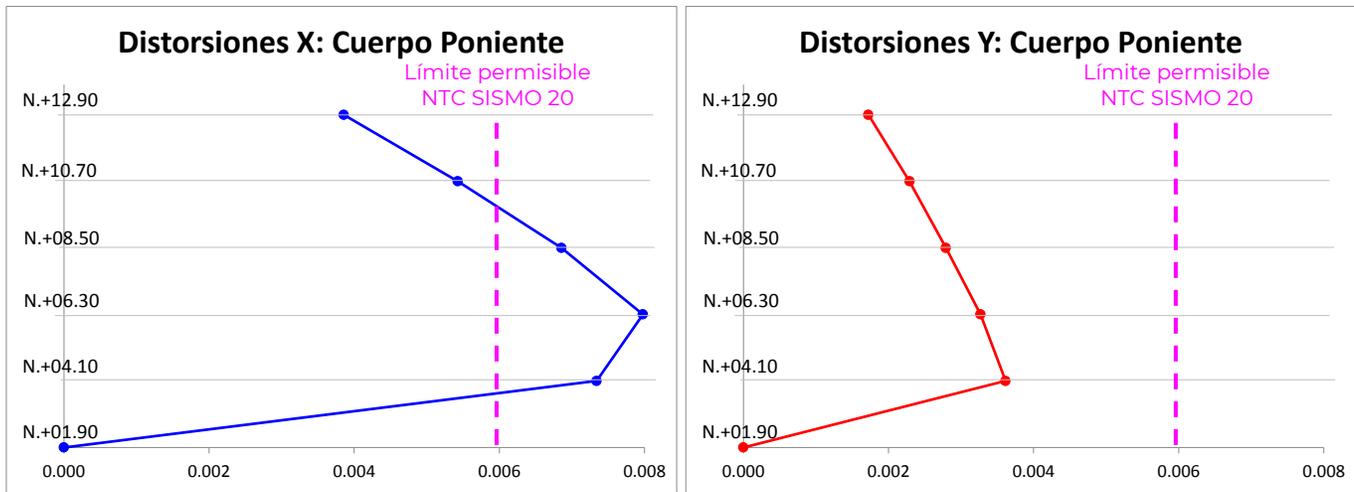


Figura 5.5 Distorsiones de entrepiso sentido X y Y para el ELC, Cuerpo Poniente.

De acuerdo a los niveles de distorsión observados, se concluye que la estructura en ambos cuerpos excede los límites permisibles respecto a desplazamientos laterales para la dirección X, mientras que la dirección Y cumple los límites. Es especialmente notoria la magnitud de desplazamiento lateral que se presenta en la planta baja del Cuerpo Oriente, dirección X, puesto que la distorsión excede en aproximadamente el doble respecto del límite permisible; esto posiblemente asociado a la presencia de una zona con tan poca rigidez como lo es la zona del estacionamiento.

5.3 DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS EN ESTADO LÍMITE DE LIMITACIÓN DE DAÑOS ANTE SISMOS FRECUENTES (ELSF)

Similar a la sección anterior, se presenta gráficamente las distorsiones que se producen en cada entrepiso para el estado límite de limitación de daños ante sismos frecuentes, así como los límites correspondientes establecidos en la sección 1.8 de las NTC SISMO20 (que se traza en la gráfica como una línea vertical), para cada cuerpo y en las dos direcciones.

Cuerpo Oriente

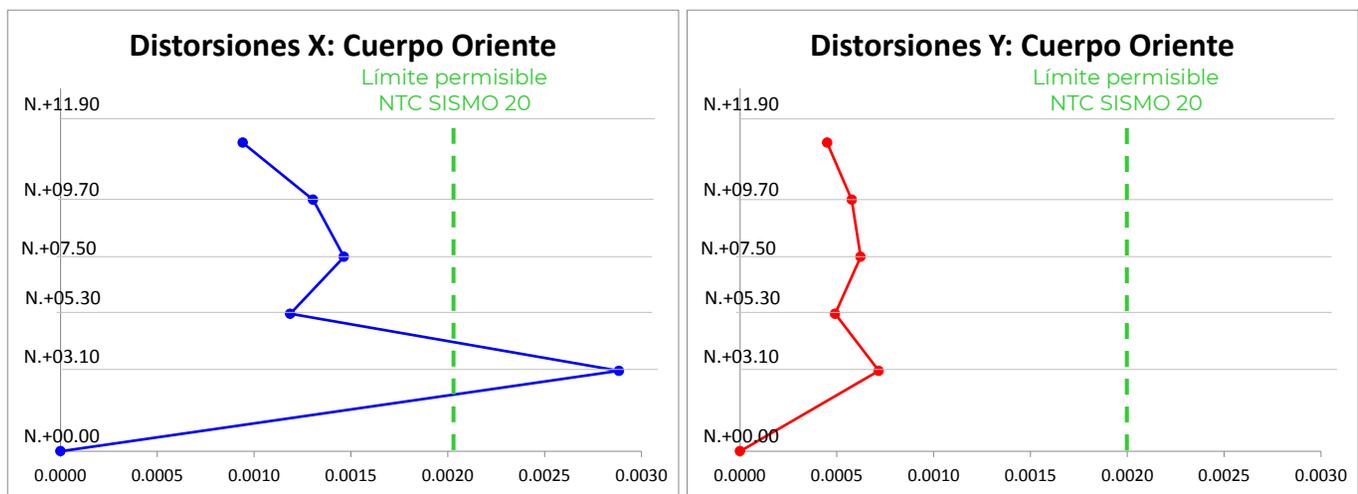


Figura 5.6 Distorsiones de entrepiso sentido X y Y para el ELSF, Cuerpo Oriente.

Cuerpo Poniente

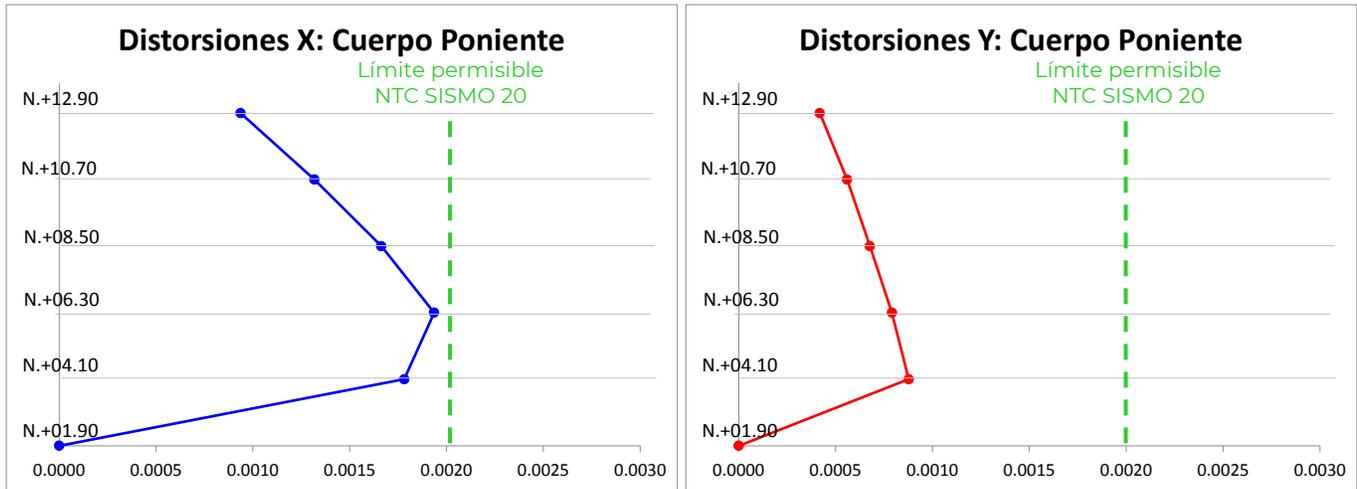


Figura 5.7 Distorsiones de entrepiso sentido X y Y para el ELSF, Cuerpo Poniente.

De acuerdo a los niveles de distorsión observados, se concluye que la estructura presenta problemas de desplazamientos laterales en el sentido X del Cuerpo Oriente, nivel planta baja.

5.4 REVISIÓN DE SEPARACIÓN A COLINDANCIAS

Para evaluar la posibilidad de que existan golpeteos entre los edificios, se revisan los desplazamientos laterales de los cuerpos oriente y poniente en dirección X (puesto que en la otra dirección ortogonal no existe colindancia con más inmuebles), obtenidos por medio de la aceleración espectral para el ELC. Para ello se reproducen los resultados de las tablas 3.3 y 3.4, correspondientes a los desplazamientos laterales máximos para los cuerpos oriente y poniente. En el caso de los edificios que componen la unidad habitacional, los entrepisos coinciden en todos los niveles, por lo que la separación a colindancias se deberá fijar en el último nivel, que es donde se presenta el desplazamiento lateral máximo. Asimismo, dado que no se consideran efectos de giro y corrimiento de la base, se agregará al a separación el producto de la altura correspondiente por 0.006, al encontrarse el proyecto en la zona III:

Tabla 5.1 Desplazamientos laterales máximos para cuerpos oriente y poniente, dirección X

CUERPO ORIENTE					CUERPO PONIENTE				
Nivel	H m	U _{LAT MÁX} cm	H*0.006 cm	SEP cm	Nivel	H m	Δ _{LAT MÁX} cm	H*0.006 cm	SEP cm
AZ N.+ 11.90	11.9	8.12	7.14	15.26	AZ N.+ 12.90	12.9	6.92	7.74	14.66
N4 N.+09.70	9.7	7.268	5.82	13.09	N4 N.+10.70	10.7	6.072	6.42	12.49
N3 N.+07.50	7.5	6.086	4.50	10.59	N3 N.+08.50	8.5	4.878	5.10	9.98
N2 N.+05.30	5.3	4.758	3.18	7.94	N2 N.+06.30	6.3	3.37	3.78	7.15
N1 N.+03.10	3.1	3.682	1.86	5.54	N1 N.+04.10	4.1	1.615	2.46	4.08
PB N.+00.00	0	0	0	0	PB N.+01.90	1.9	0	1.14	1.14

Se observa que la separación recomendada es de al menos 15 cm para ambos cuerpos. Considerando que la separación existente entre edificios es de aproximadamente 25 cm, se determina que los edificios tipo cumplen con el requisito de separación de colindancia.

5.5 REVISIÓN POR CORTANTE BASAL

Para asegurar un nivel de seguridad adecuado de la estructura respecto a su altura y la intensidad de las fuerzas sísmicas en la base, se deberá cumplir que $V_o/W_o \geq a_{\min}$. De acuerdo a las normas:

$$\begin{cases} T_s < 0.5 \text{ s}, & a_{\min} = \frac{0.04}{R} \\ T_s \geq 1 \text{ s}, & a_{\min} = \frac{0.06}{R} \end{cases}$$

Donde V_0 es el cortante basal obtenido del análisis dinámico modal espectral y W_0 es el peso total de la estructura a nivel de desplante definida en la sección 2.3. Debido a que T_s es igual a 1 (ver 3.7), para el periodo fundamenta de vibrar la aceleración mínima es:

$$a_{\min} = \frac{0.06}{R} = \frac{0.06}{2.14} = 0.028$$

Del modelo se obtiene:

$$W_0 = 2,349.3 \text{ ton}$$

Tabla 5.2 Revisión de la relación V_0/W_0 vs a_{\min}

CUERPO	Dirección	V_0	V_0 / W_0	Cumple $\checkmark V_0/W_0 \geq a_{\min}$?
		ton		
Oriente	X	244	0.104	Sí
	Y	161	0.068	Sí
Poniente	X	373	0.158	Sí
	Y	396	0.168	Sí

Dado que la relación de los cortantes basales al peso total en ambas direcciones de los cuerpos oriente y poniente son mayores que la aceleración mínima, se cumple el requisito del cortante basal mínimo.

5.6 REVISIÓN DE PORCENTAJE DE PESOS MODALES PARTICIPATIVOS

Se revisa que la participación de los pesos modales en cada dirección sea por lo menos el 90 por ciento en los modos considerados.

De la información de modelo se determina lo siguiente:

Por lo que se cumple con el requisito de participación de pesos modales.

5.7 REVISIÓN DE RELACIÓN DE PERIODOS T_E/T_s

Para evaluar la susceptibilidad de la estructura a experimentar efectos de resonancia, se revisa que los periodos de la estructura y el suelo se mantengan lo suficientemente alejados entre sí. A pesar de no estar especificado de manera explícita en las normas, se toma un rango que sirve de referencia y que es el recomendado por Bazán-Meli, que establece que el periodo fundamental de la estructura T_E y el periodo más largo de vibrar del terreno T_s cumplan con la relación:

$$0.7 \leq T_E/T_s \leq 1.2$$

El periodo de la estructura es de $T_E = 0.417$ s, mientras que $T_s = 1.0$ s, por lo que al realizar el cociente T_E/T_s se obtiene un valor de 0.417, por lo que la estructura cumple con el criterio recomendado.

CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES PRELIMINARES

Se presenta en este capítulo un resumen de la revisión de los estados límite de servicio, correspondiente a los estados límite de colapso (ELC) y limitación de daños ante sismos frecuentes.

Se observa que respecto al ELC, la estructura tiene desplazamientos laterales importantes en el Cuerpo Oriente, del orden del doble del límite permisible por las normas, así como una excedencia aproximada del 30% en el Cuerpo Poniente, lo que implica que para el sismo de diseño, las fuerzas son de tal magnitud que es posible que bajo el estado límite de falla, las fuerzas actuantes sean mayores que las resistencias en los elementos y por lo tanto, se presente un daño estructural importante como el que se observó durante las inspecciones posteriores a la ocurrencia del sismo del 19 de septiembre de 2017. Al respecto, se tiene la información necesaria y suficiente para en una etapa posterior, determinar las fuerzas actuantes, para después compararlas con las resistencias de diseño que ofrece la estructura en ambos cuerpos, a fin de determinar si los elementos eran capaces de resistir las fuerzas actuantes, y en caso negativo, determinar en qué porcentaje están estos elementos por debajo de la resistencia requerida.

Asimismo, se determinó que los desplazamientos para el estado de limitación de daños ante sismos frecuentes, se excede su valor permisible en un 40% para el Cuerpo Oriente, lo que implica que bajo la ocurrencia de sismos de intensidad moderada, es posible que pudiera aparecer grietas en elementos no estructurales o que en elementos estructurales importantes se evidenciara un daño incipiente. El Cuerpo Poniente no presenta excedencia, por lo que es improbable que se hubieran presentado agrietamientos de consideración en los elementos estructurales principales y secundarios.

En una siguiente etapa, se obtendrán las resistencias de diseño para los cuerpos que componen la estructura bajo las consideraciones teóricas de las normas vigentes, así como las consideradas en la época de construcción, de manera que se pueda tener un marco de referencia preciso y válido para caracterizar las demandas de resistencia ante fuerzas laterales que se presentan en los edificios del fraccionamiento.

REFERENCIAS

González O., Robles F. (2008), "Aspectos fundamentales del concreto reforzado", Ed. Limusa, 4ª edición, ISBN 978-968-18-6446-0, 547pp.

Meli R. (2010), "Diseño Estructural", Ed. Limusa, 2ª edición, ISBN 978-968-18-5391-4, 596 pp.

Instituto de Ingeniería (II-UNAM). (1977), "Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto. Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Con comentarios, ayudas de diseño y ejemplos.", Serie de publicaciones del Instituto de Ingeniería relacionadas con el reglamento de construcciones para el Distrito Federal, No. 401.

Bazán E., Meli R. (2013) "Diseño Sísmico de Edificios", Ed. Limusa, 1ª edición, ISBN 978-968-18-5349-5, 317 pp.

Arnal L., Betancourt M. (2008) "Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal: reglamento, normas técnicas, Ley de Desarrollo Urbano del Distrito Federal, Reglamento de la ley de Desarrollo Urbano del Distrito Federal, ilustraciones y comentarios, gráficas, planos y lineamientos.", Ed. Trillas, 5ª edición, ISBN 978-968-24-7188-9, 1296 pp.

Gómez B., Jean R., Pérez J., Treviño E. (2019), "Edificaciones de Mampostería", Ed. Limusa – Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, A.C., 2ª edición, ISBN 978-607-05-0861-5, 420 pp.

Esteva L., Díaz O., Ismael E., Rodríguez N., López A., Flores L.E., Reyes C., López O. (2004), "Análisis de vulnerabilidad y riesgo de construcciones urbanas ante perturbaciones sísmicas y eólicas", Informe Técnico del Instituto de Ingeniería de la UNAM, Instituto de Investigaciones Eléctricas y el Centro Nacional de Prevención de Desastres, noviembre, 117 pp.

Flores L.E. y Sánchez A. (2014), "Propuesta de funciones de vulnerabilidad para vivienda de mampostería y adobe ante el efecto sísmico", Informe Interno, Centro Nacional de Prevención de Desastres, diciembre de 2014, 68 pp.

Flores L.E. y Ortiz J.R (2015), "Estudio de la Vulnerabilidad de la Edificación para Vivienda en la Ciudad de Tapachula, Chiapas", Informe Interno Centro Nacional de Prevención de Desastres, diciembre de 2015, 21 pp.

Google Earth, (2016), descargado del sitio <https://www.google.es>.

Google Maps, (2016), consultado en el sitio <https://www.google.com.mx/maps/>.