



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA**

**Criterios y técnicas por considerar para la elaboración
de un proyecto arquitectónico sismorresistente**

**TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN ARQUITECTURA
En el campo de conocimiento de Tecnología**

**PRESENTA:
Arq. Marisol Barbosa Parada**

**TUTOR PRINCIPAL

Dr. Daniel Aldama Ávalos
Facultad de Estudios Superiores Aragón**

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR

**Dra. Maribel Jaimes Torres
Facultad de Arquitectura**

**Mtro. Jorge Rangel Dávalos
Facultad de Arquitectura**

Ciudad Universitaria, CD. MX., Agosto 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



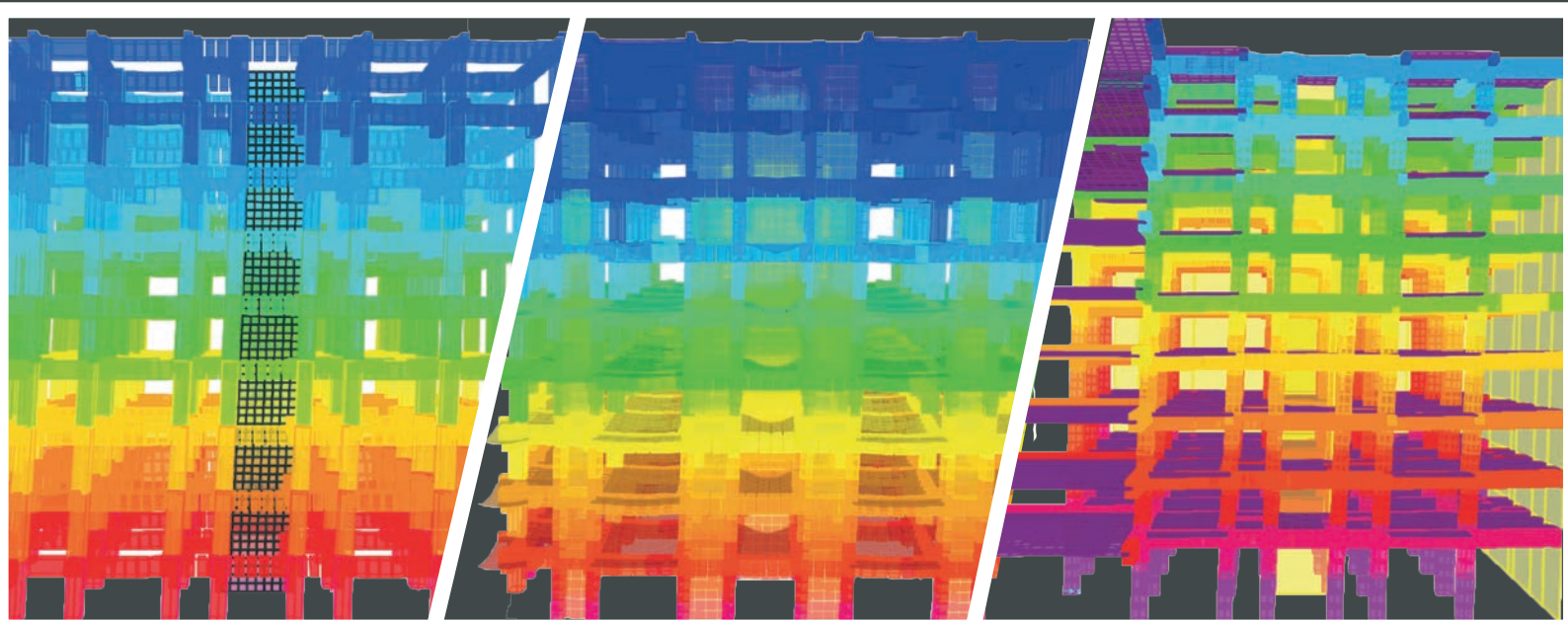
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA

UNAM
POSGRADO

CRITERIOS Y TÉCNICAS POR CONSIDERAR PARA LA ELABORACIÓN DE UN PROYECTO ARQUITECTÓNICO SISMORRESISTENTE

Presenta:

Arq. Marisol Barbosa Parada



Comité Tutor:

Tutor: Dr. Daniel Aldama Ávalos

Cotutora: Dra. Maribel Jaimes Torres

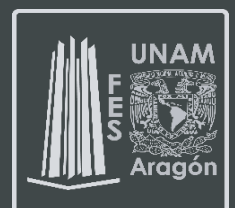
Cotutor: Mtro. Jorge Rangel Dávalos

Sínodo: Dr. Agustín Hernández Hernández

Sínodo: Mtro. Enrique Jesús Díaz Barreiro y Saavedra



INSTITUTO DE
INVESTIGACIONES
HISTÓRICAS



Agradecimientos especiales

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo que me brindaron durante mis años de estudio.

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por brindarme la oportunidad de ser parte de su programa de posgrado, cambiando con ello mi vida.

A la Facultad de Estudios Superiores Aragón y a la Facultad de Arquitectura por los espacios brindados, así como a los investigadores y profesores de ambas facultades que fueron parte de mi formación.



Agradecimientos

A mi tutor, el Dr. Daniel Aldama Ávalos por ser un excelente ser humano y un gran profesional, quien con su guía, consejos, observaciones y gran paciencia me ha orientado a través de los años para lograr la realización de mi trabajo de investigación.

A la Dra. Maribel Jaimes Torres, por ayudarme y orientarme a establecer tanto mis objetivos como alcances de investigación, cuyas intervenciones siempre han sido atinadas y constructivas.

Al Dr. Agustín Hernández Hernández por sus detalladas observaciones que permitieron que integrará un enfoque más arquitectónico al documento, y quien ha recibido mi tema siempre con gran interés, sin duda, mi documento no sería lo que es sin su gran retroalimentación.

Al Mtro. Enrique Jesús Díaz Barreiro y Saavedra por brindarme las pautas, los ejemplos y puntos de vista para replantear y mejorar las conclusiones de mi tema de investigación.

Al Mtro. Jorge Rangel Dávalos por su simpatía, disposición, y guía; y quien junto al Mtro. Rodrigo Rafael Pérez González me ayudaron a centrar mi tema.

Al Dr. Alejandro Solano Vega por su amabilidad al tomarse el tiempo de leer mi documento, resolver mis dudas y brindarme su conocimiento para esclarecer términos técnicos.

Ahora bien, quisiera agradecer a mi madre, que en cada paso del camino me ha apoyado y animado a no conformarme ni rendirme, siendo para mí un estoico ejemplo de resiliencia.

A mi padre, quien siempre ha alimentado mi interés por el conocimiento, el arte y la construcción, y quien sin su ejemplo no estaría donde me encuentro ahora.

A mi hermana y mis sobrinos, cuya viveza, cariño y amor anima mis días nublados.

A Peri, por emprender conmigo la aventura de vivir en la CdMX, por escucharme siempre, así como creer en mí, brindarme apoyo, comprensión, un hogar y una valiosa amistad.

A la Lic. Sandra Cárdenas Ortiz, por brindarme las herramientas para concluir este ciclo con ánimo, fortaleza y temple.

Finalmente, quiero agradecerle a Dios por todo lo que me ha dado en la vida.

Resumen

La República Mexicana está ubicada en una región de la Tierra que se considera en constante peligro sísmico, es decir, que espera la aparición de actividad de mediana a alta intensidad cada cierto tiempo. Esto último significa que, en algún momento de la vida útil de una construcción, esta podría verse sometida a fuerzas sísmicas que deberá de resistir. Para lograrlo, se han establecido una serie de criterios de diseño sísmico, no obstante, la difusión de los mismos fuera del gremio ingenieril se ha visto de manera limitada, lo cual representa un gran problema ya que algunos parámetros hacen alusión a la regularidad de la forma y estructuración, donde su desconocimiento y consecutiva omisión podría generar efectos adversos en el comportamiento estructural de la edificación como daños y colapsos.

De manera que, el presente trabajo de investigación tiene como propósito el ilustrar y difundir los criterios y técnicas que el arquitecto deberá considerar desde la elaboración del proyecto para crear un diseño integral y sismorresistente. Para demostrarlo, se realizó un caso práctico al cual desde su anteproyecto se le integraron los criterios de diseño sísmico para posteriormente hacer una serie de simulaciones entre tres tipos de estructuras: dos que considerarán los criterios y uno que no. Los resultados mostraron que el considerarlos optimizó no solo su desempeño, si no también el proceso del diseño ya que disminuyeron las modificaciones y retrabajos tras la fase de estructuración final, permitiéndole con ello al arquitecto participar de manera activa en la creación de un diseño sismorresistente.

Palabras clave: *diseño sísmico, regularidad de la forma, diseño sísmico para arquitectos, criterios sísmicos, diseño sismorresistente, proceso de diseño arquitectónico, proyecto integral*

Abstract

Mexico is located in a region of the Earth that is considered to be in constant seismic hazard, that is, it's expected the appearance of medium to high intensity activity from time to time. That means at some point in the lifecycle of a building, it will be subjected to seismic forces that must be resisted. To achieve this, a series of seismic design criteria have been established, however, their diffusion outside the engineering profession has been limited, which represents a great problem since some parameters refer to the regularity of the form and structure, where its ignorance and consecutive omission could generate adverse effects on the structural behavior of the building such as damage and collapse.

Therefore, this research work has the purpose of illustrating and disseminating the criteria and techniques that the architect must consider since the project development to create an integral and earthquake-resistant design. To demonstrate it, a case study was carried out in which the seismic design criteria were integrated from its preliminary design. Afterwork, a series of simulations were done between three types of structures: two that will consider the criteria and one that will not. The results showed that considering these criteria optimized not only their performance, but also the design process, since modifications and rework were reduced after the final structuring phase, which allowing the architect to participate actively in the creation of an earthquake-resistant design.

Keywords: *seismic design, regularity of form, seismic design for architects, seismic criteria, earthquake-resistant design, architectural design process, integral project, integrative architecture*

ÍNDICE

Resumen

Abstract

Introducción

Planteamiento del Problema	12
Justificación	14
Preguntas de Investigación	15
Objetivo General.....	15
Objetivos Particulares.....	15
Hipótesis.....	16
Metodología	16
Capitulado.....	17

Capítulo 1: Los orígenes del sismo, sus características y efectos en la edificación **18**

1.1 Orígenes del sismo	20
1.1.1 Estructura de la Tierra y su importancia en la creación de un sismo	21
1.1.2 Tipos de contacto entre placas tectónicas	22
1.1.3 Fallas geológicas.....	24
1.1.4 Rebote elástico.....	26
1.2 Características del sismo.....	27
1.2.1 Ondas sísmicas	27
1.2.1.1 Ondas de cuerpo.....	27
1.2.1.2 Ondas superficiales	28
1.2.2 Componentes de un sismo	29
1.2.3 Tipos de sismos	30
1.2.4 Pre-eventos y réplicas sísmicas	31
1.2.5 Monitoreo de un sismo	32
1.2.6 Escalas de medición	33
1.3 Sismicidad en México.....	35
1.3.1 Efectos de los sismos en la Ciudad de México	39
1.3.1.1 Los efectos del sismo de 1957.....	42
1.3.1.2 Los efectos del sismo de 1985.....	45
1.3.1.3 Los efectos del sismo del 2017	49
1.3.1.4 Similitudes en los daños provocados por los sismos de 1957, 1985 y 2017	53

Capítulo 2: Criterios de diseño sísmico en la Ciudad de México basado en las NTCDS-2020	58
2.1 Las leyes de Newton que explican el movimiento del edificio ante un sismo	60
2.1.1 Ley de Inercia	60
2.1.2 Ley de acción y reacción	61
2.1.3 Ley de la Proporcionalidad entre Fuerzas y Aceleraciones	61
2.2 Movimiento pendular, periodo y velocidad angular	63
2.3 Modos de Vibración	65
2.4 Resonancia y atenuantes	67
2.5 Amplificación y amortiguamiento	68
2.6 Volteo en los edificios	69
2.7 Esfuerzos de torsión	71
2.8 Propiedades que deben poseer las estructuras sismorresistentes	74
2.8.1 Resistencia	74
2.8.2 Rigidez	75
2.8.3 Ductilidad	76
2.9 Métodos de análisis sísmico	78
2.10 Evolución de la normativa sísmica en la Ciudad de México	79
Capítulo 3: Criterios de regularidad y forma que influyen en el comportamiento sísmico	87
3.1 Criterios de regularidad estructural que mejoran el comportamiento sísmico	89
3.1.1 Simetría en planta	89
3.1.2 Relación altura - base	90
3.1.3 Relación largo - ancho	91
3.1.4 Entrantes y salientes	91
3.1.5 Diafragma rígido	92
3.1.6 Aberturas y Huecos	93
3.1.7 Peso de entrepiso	94
3.1.8 Dimension de entrepisos	94
3.1.9 Restricción de columnas	95
3.1.10 Altura de columnas	96
3.1.11 Rigidez lateral	96

3.1.12 Desplazamiento lateral	97
3.1.13 Factor de comportamiento sísmico	98
3.1.14 Planta baja débil	100
3.2 Criterios de irregularidad estructural	102
que afectan el comportamiento sísmico	102
3.2.1 Estructura irregular	102
3.2.2 Estructura muy irregular.	103
3.3 Separación entre colindancias	104
3.4 Criterios de forma en las tendencias arquitectónicas y su incidencia en el comportamiento sísmico	105
3.4.1 Movimiento moderno.	106
3.4.2 Movimiento contemporáneo.	111
3.4.2.1 Deconstructivismo:	111
3.4.2.2 High Tech.	113
3.4.2.3 Organicismo.	115
3.4.2.4 Minimalismo:	117
Capítulo 4: Técnicas de control sísmico para edificios	119
4.1 Técnicas de control sísmico	121
4.1.1 Aisladores de base	122
4.1.1.1 Elastoméricos	124
4.1.1.2 De deslizamiento.	126
4.1.2 Disipadores	127
4.1.2.1 Histeréticos.	127
4.1.2.2 Viscoelásticos	129
4.2 Técnicas de control sísmico utilizadas en países sísmicos	130
4.2.1 Técnicas utilizadas en Chile.	130
4.2.2 Técnicas utilizadas en Japón.	133
4.2.3 Técnicas utilizadas en la Ciudad de México.	136
Capítulo 5: Aplicación de criterios y técnicas en la elaboración . de un proyecto sismorresistente	140
5.1 Criterios a considerar en el proyecto arquitectónico al proponer técnicas de control sísmico	142
5.1.1 Inclusión de los aisladores de base en el proyecto arquitectónico	142

5.1.2 Inclusión de los disipadores en el proyecto arquitectónico	146
5.2 Integración de criterios y técnicas aplicadas en un caso práctico	149
5.2.1 Características del proyecto arquitectónico	149
5.2.1.1 Condiciones de regularidad estructural que influyen	151
5.2.2 Planos y fachadas arquitectónicas	153
5.2.3 Análisis de cargas	157
5.2.4 Espectro de diseño para el proyecto	159
5.2.5 Análisis sísmico de la Estructura Porticada	162
5.2.5.1 Efectos de torsión	168
5.2.5.2 Estado límite de servicio	170
5.2.5.3 Resistencia de elementos	173
5.2.6 Análisis sísmico de la Estructura Dual	176
5.2.6.1 Efectos de torsión	180
5.2.6.2 Estado límite de servicio	181
5.2.6.2 Resistencia de elementos	184
5.2.7 Análisis sísmico de la Estructura Irregular	187
5.2.7.1 Efectos de torsión	190
5.2.7.2 Estado límite de servicio	191
5.2.7.3 Resistencia de elementos	194
5.3 Comparativas de propuestas	196
5.3.1 Fuerzas de diseño	197
5.3.2 Excentricidades torsionales	198
5.3.3 Resistencia de elementos	199
5.3.4 Comparativa de resistencia de las columnas	200
5.3.5 Estado límite de seguridad contra colapso	201
5.3.6 Estado de limitación de daños ante sismos frecuentes	202
5.4 Análisis de la información	203
Conclusiones	208
Recomendaciones	212

Fuentes Consultadas

Libros	218
Artículos	221
Congresos	222
Informes Oficiales de Sismos	224
Reglamentos de Construcción de la Ciudad de México	225
Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcción para la Ciudad de México	226
Otras normas	228
Libros electrónicos	228
Tesis	229
Páginas de Internet Oficiales	230

Índice de Imágenes

Capítulo 1	231
Mapas	232
Tablas	232
Gráficos	232
Capítulo 2	233
Capítulo 3	233
Capítulo 4	235
Capítulo 5	236
Portadas	236
NOTA	236

Anexos

Anexo 1: Plano arquitectónico de la estructura irregular	238
Anexo 2: Pesos de las estructuras	239
Anexo 3: Combinación de acciones	240
Anexo 4: Efectos de torsión de la estructura porticada	241
Anexo 5: Efectos de torsión de la estructura dual	243
Anexo 6: Efectos de torsión de la estructura irregular	244
Anexo 7: Memoria de XXII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural con el tema " <i>Criterios Aplicados en la Elaboración del Proyecto Arquitectónico para Potencializar el Diseño Sismorresistente</i> "	245

INTRODUCCIÓN

La República Mexicana está ubicada en una región de la Tierra altamente sísmica en la que convergen cinco placas tectónicas las cuales al interactuar entre ellas generan sismos que pueden ser desde baja hasta alta intensidad. Generalmente sus puntos de origen se encuentran en las costas del Océano Pacífico, pero su propagación a la capital del País junto con sus condiciones del suelo ha causado un sin número de efectos destructivos dentro de ella.

Lo anterior está relacionado con sus orígenes, ya que era una cuenca endorreica que al no tener salida al mar hacía que toda la lluvia se precipitara, acumulándose hasta formar un lago que en la época prehispánica floreció para posteriormente con la llegada de los españoles y el aumento de los asentamientos humanos degradarse hasta formar la actual Ciudad de México. Este fenómeno produjo que las características geológicas del suelo persistieran, consolidándose en tres tipologías principales: de Lomas, Transición y Lago.

La de lago o también conocida como zona III es la que representa mayor riesgo ya que su tipo de suelo es blando y compresible, lo que crea una amplificación de las ondas, es decir, aumenta las aceleraciones y alarga el tiempo de duración de las mismas, contribuyendo a la creación de afectaciones en las edificaciones, como se ha podido observar tras los eventos telúricos de 1957, 1985 y 2017.

Cabe mencionar que, aunque las causas de estos daños tienen relación intrínseca con el tipo de suelo, también influyen las características estructurales y arquitectónicas de los inmuebles.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Sobre las condiciones arquitectónicas, las particularidades que se han presentado en los edificios colapsados mostraban ciertas similitudes ya que generalmente eran estructuras de concreto armado; de altura mediana (de 3 a 15 niveles); de usos mixtos, residenciales y de oficina; con una clara omisión de los criterios de diseño sísmico que hacen alusión a indicaciones de forma y estructura.

Estos criterios, si bien existen en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo desde 1987 y se han ido mejorando continuamente, suele ser conocimiento del gremio ingenieril, lo cual representa un gran problema ya que la inclusión de estos desde la fase inicial del proyecto arquitectónico podría optimizar el diseño, su comportamiento estructural e incluso evitar retrabajos en el proyecto ejecutivo al requerir grandes modificaciones debido al dimensionamiento final de la estructura.

Así mismo, se detecta que la estructuración elegida de manera reiterativa en los edificios medianos es a base de marcos en planta baja con muros de carga en niveles superiores, los cuales históricamente ante sismos no han tenido el mejor desempeño.

De hecho, en la actualidad existen técnicas que pueden eficientar la estructura ante eventos telúricos ya que aíslan ó disipan el movimiento de las ondas sísmicas, sin embargo, su uso se ha centrado particularmente en edificios de gran altura o de una gran inversión, creando la falsa idea de que estos sistemas de control están

dirigidos únicamente a edificaciones altas, dejado a los edificios medianos desprotegidos de alternativas que ayuden a mejorar su comportamiento ante sismos.

A su vez, se detecta la problemática de que la comprensión de estos métodos se ha limitado de manera casi total a la comunidad de ingeniería, lo que ha contribuido a que los arquitectos desconozcan los criterios que deben de considerar en el proyecto para incluirlos o incluso las afectaciones que podrían tener en su diseño arquitectónico, creando una alienación entre la estructura y el acabado del inmueble.

Todo esto en conjunto genera que los edificios medianos presenten una serie de desafíos que necesitan solucionarse ya que éstos han sido los que más colapso han sufrido en eventos sísmicos anteriores, y también porque albergan a una parte de la población que no puede afrontar fluidamente las altas inversiones que requiere la reparación de la estructura ni el cese de su uso, sin contar el riesgo que podría representar para ellos, la sociedad y la ciudad.

JUSTIFICACIÓN

La Ciudad de México es hogar de 9, 209, 944 habitantes de acuerdo a las últimas estadísticas del INEGI¹ y es un sitio que se considera en constante peligro sísmico, es decir, que espera cierta actividad de mediana a alta intensidad cada cierto tiempo. Esto quiere decir que, en la vida útil de una construcción, esta se verá sometido a fuerzas sísmicas que deberá de solventar y disipar para evitar el daño del mismo.

Este reto es aún mayor en edificaciones medianas ya que históricamente han sido las que han presentado mayores afectaciones tras los sismos de 1957, 1985 y 2017, donde tan solo en ese último se generaron 44 colapsos y 228 pérdidas humanas, localizándose todas esas afectaciones en edificios que tenían de 4 a 9 niveles². De manera que esto abre la necesidad de optimizarlos no solo a nivel estructural si no arquitectónico.

1 INEGI. (2020). Numero de habitantes: Ciudad de México. <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/poblacion/>

2 Salcido, I. (2018). El terremoto de 2017. Diecinueve de septiembre negro. México: Casa de las Campanas Editores

Para ello, se propone incluir criterios de diseño sísmico desde la elaboración del proyecto arquitectónico, los cuales influyen en aspectos como: su forma tanto en alzado como en planta; en la distribución de los espacios, en la organización de los elementos estructurales, en sus dimensiones e incluso en la distribución de sus pesos, maximizando no solo el diseño si no su comportamiento estructural.

Para lograrlo, se realizará la modelación por computadora de un inmueble de 9 niveles que tome en cuenta los criterios de diseño sísmico desde la elaboración del proyecto con una estructura a porticada, otra con los mismos criterios, pero con estructura dual³ para ver si ofrece una mejor respuesta sísmica y una que no tome en cuenta los criterios, esto para hacer un análisis comparativo que ayude a conocer la idoneidad de aplicar los conceptos desde la fase del anteproyecto.

Además, se plantea abordar las técnicas de control sísmico existentes

3 En este caso el sistema dual hace alusión a una estructura de muros rígidos con columnas

para teorizar y compilar los criterios que se requieren estimar para su incorporación en los edificios medianos, logrando un mayor entendimiento para la comunidad que no pertenezca al gremio ingenieril.

PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- 1 ¿Existe algún patrón de daño susceptible de ser estudiado en los edificios de 1957, 1985 y 2017?
- 2 ¿Qué criterios se deben considerar al proponer técnicas de control sísmico en el proyecto?
- 3 ¿Qué comportamiento experimentará un edificio de 9 niveles ubicado en la zona III de la Ciudad de México si desde la fase del proyecto arquitectónico se aplican los criterios de diseño sísmico y será efectivo?
- 4 ¿Qué sistema estructural puede ofrecer mayores ventajas tanto en el diseño arquitectónico como en el comportamiento sísmico para la zona III de la Ciudad de México?
- 5 ¿Cuáles son los criterios de forma en las tendencias arquitectónicas y cuál es su incidencia en el comportamiento sísmico?
- 6 ¿Qué recomendaciones podrían hacerse con la información obtenida del presente trabajo de investigación a las Normas Técnicas Complementarias para Proyecto Arquitectónico actuales?

OBJETIVO GENERAL

Contribuir a la difusión de criterios y técnicas que el arquitecto deberá considerar desde la elaboración del proyecto, hasta la concepción final, con la meta general de crear un diseño integral y sismorresistente.

OBJETIVOS PARTICULARES

- 1 Examinar el origen de los sismos y sus características para comprender su propagación a las edificaciones
- 2 Sintetizar la información de los daños originada tras los sismos de 1957, 1985 y 2017, para detectar su ubicación, la tipología de los edificios críticos y sus daños más frecuentes
- 3 Ilustrar las Normas Técnicas Complementarias del Diseño Sísmico para entender los criterios que influyen en la configuración arquitectónica
- 4 Analizar los criterios de forma en las tendencias arquitectónicas para conocer su incidencia en el comportamiento sísmico

5 Identificar los diferentes tipos de control sísmico existentes para crear un compendio que muestren las ventajas y desventajas de su incorporación en un proyecto.

6 Identificar qué sistema estructural ofrece mayores ventajas de diseño y resistencia para eficientar el comportamiento de los edificios medianos

7 Simular una estructura porticada que considere los criterios sísmicos desde la elaboración del proyecto, una dual y una que no los considere para comparar la idoneidad de cada uno

HIPÓTESIS

Si se consideran criterios y técnicas de diseño sísmico a partir de la concepción del proyecto, entonces se podrá elaborar un proyecto integral que conjugue los requisitos de diseño y función con las exigencias del comportamiento sísmico, lo cual deberá convertirse en una práctica común dentro del proceso de diseño arquitectónico.

METODOLOGÍA

Para la presente investigación se llevará a cabo una recopilación teórica de diversas fuentes tales como libros, artículos, reportes, memorias de conferencias, tesis, reglamentos, entre otros, con el propósito de extraer, analizar y sustentar con información relevante el estudio.

Después, basados en las normas técnicas complementarias, reglamentos actuales e información técnica, se realizará un compendio de observaciones que habrá por considerar al incorporar las técnicas de control sísmico.

Luego, para evaluar si es útil aplicar los criterios de control sísmico desde la fase de la elaboración se realizará un proyecto de 9 niveles que será simulado a través del programa SAP2000 con 3 estructuras diferentes en las cuales dos consideraran los criterios: la porticada y la dual; y otra que no: la irregular. Para su cálculo estructural se utilizará el método estático y las fórmulas establecidas en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo actuales.

Posteriormente, con los datos obtenidos de la simulación se realizará un análisis comparativo que permita interpretar y distinguir sus diferencias y semejanzas.

CAPITULADO

El presente documento consta de cinco capítulos, descritos y ordenados de la siguiente manera:

Capítulo 1: En este se abordarán conceptos básicos de cómo se originan los sismos, sus características y efectos en la edificación, haciendo un recuento de las afectaciones tras los sismos más grandes del mundo y de la Ciudad de México, para poder detectar si existen patrones de daños en ellos.

Capítulo 2: Se abordarán las leyes que explican el impacto del movimiento sísmico en las estructuras y las propiedades que deben poseer, así como los reglamentos y normativas aplicables en la Ciudad de México

Capítulo 3: En este capítulo se ilustran y describen los criterios de regularidad estructural establecidos por las NTCDS-2020 así como la forma en las tendencias arquitectónicas y su incidencia en el comportamiento estructural.

Capítulo 4: En este apartado se manejan las técnicas de control sísmico para edificios como aisladores de base y disipadores, así como su incorporación en Chile, Japón y México.

•Capítulo 5: En esta sección, se hacen algunas consideraciones a tomar en cuenta para incorporar las técnicas de control sísmico en la Ciudad de México, basado en el capítulo 3.

Posteriormente, dentro del mismo capítulo, se describe una propuesta que considera desde la fase inicial del proyecto los criterios de diseño sísmico, que después es simulada en una estructura a porticada, dual e irregular; y posteriormente analizada comparativamente.

Finalmente, el documento cierra con una serie de conclusiones y recomendaciones que surgen fruto de la presente investigación.



**Capítulo 1:
Los orígenes del sismo,
sus características y
efectos en la edificación**

1 Los orígenes del sismo, sus características y efectos en la edificación

La República Mexicana se encuentra ubicada en el Cinturón Circumpacífico que es una zona en donde se registra la mayor actividad sísmica y volcánica del mundo; y es debido a esta condición que, a través de la historia, en ella se han manifestado eventos telúricos de grandes magnitudes que han ocasionado múltiples catástrofes en sus ciudades y edificaciones. Esto es porque aunque los sismos son una amenaza latente también son fenómenos impredecibles que no pueden evitarse ni controlarse. De modo que, hasta el momento, lo único que se puede hacer es comprender su procedencia, funcionamiento y efectos en las construcciones para prevenir sus devastadoras consecuencias en la superficie terrestre.

De ahí que, para la realización de esta investigación, el presente capítulo abordará los orígenes, características y efectos que ha causado el sismo a través de la historia no solo a nivel mundial sino también a nivel nacional, haciendo un hincapié en las construcciones de la Ciudad de México ya que aparte de ser nuestro objeto de estudio, este ha sido uno de los lugares con mayor número de edificios colapsados y decesos ante los eventos sísmicos experimentados en la República Mexicana en los años de 1957, 1985 y 2017.

Así mismo, se analizarán los tres sucesos para ver si existen incidencias en los tipos de daños que tuvieron sus construcciones, en su ubicación, tipología arquitectónica, sistema estructural, número de niveles, entre otros; para establecer las edificaciones susceptibles y crear una propuesta para edificios nuevos de este tipo que no solo sean estructuralmente seguros, sino que protejan a la población ante eventos futuros.

1.1 Orígenes del sismo

Desde hace varias décadas se han desarrollado fenómenos sísmicos alrededor del mundo que han sido descritos en revistas de investigación, periódicos y libros con los términos “terremoto”, “temblor” y “sismo”, que, aunque tienen cierta semejanza, tienen diferentes concepciones. Por ello, para evitar la confusión, se explicará el significado de cada uno a continuación.

“Terremoto” tiene su origen del latín *terrae* (tierra) *motus* (movimiento) que significa “movimiento de la tierra”, se usa para describir un evento telúrico que ha causado tanto pérdidas humanas como daño en edificaciones mientras que “temblor” se utiliza para referirse a aquel movimiento que no genera ningún daño.

En cambio, la palabra sismo, que proviene del griego *seismós* y significa “sacudida”, “agitación” o “temblor de tierra”, hace alusión a todos los tipos de eventos telúricos sin importar su magnitud por lo cual, éste será el término utilizado en la presente investigación para referirse a ellos.

Asimismo, antes de entrar en materia, es importante señalar que los sismos generalmente son causados en el interior de la Tierra por orígenes geológicos, sin embargo, también se suscitan por otro factores como explosión, erupción o desgaseificación de un volcán; por hundimiento de zonas con esfuerzos diferenciales, por caídas de rocas producto del deslizamiento de laderas, por causas derivadas de la actividad humana como inyección o extracción de fluidos de la Tierra (sustracción de petróleo, excavación de minas o canteras) y por explosiones nucleares (Vidal, 1994, pp. 19-21).

No obstante, los sismos provenientes de la Tierra son los más importantes al ser los que causan los mayores desastres en la edificación, la ciudad y la población, y es por ello que en la presente investigación solo se abordarán este tipo de sismos.

1.1.1 Estructura de la Tierra y su importancia en la creación de un sismo

Ahora bien, para entender su origen es necesario conocer primero la composición de la Tierra, la cual, de acuerdo a Nava (2002, pp. 71-72) tiene las siguientes capas:

- **Núcleo interno:** Caracterizado por tener temperaturas de 4000°C , ser sólido, constituido de hierro y ubicado en el centro de la tierra a 6371 km de profundidad.

- **Núcleo externo:** En estado líquido formado por hierro-níquel hasta 5150 km de profundidad.

- **Manto inferior:** Formado por rocas, llega hasta los 2870 km de profundidad.

- **Manto superior:** Compuesto por rocas, llega hasta los 700 km de profundidad. En esta capa se encuentra entre los 100 y 200 km de profundidad la astenosfera que está en estado líquido.

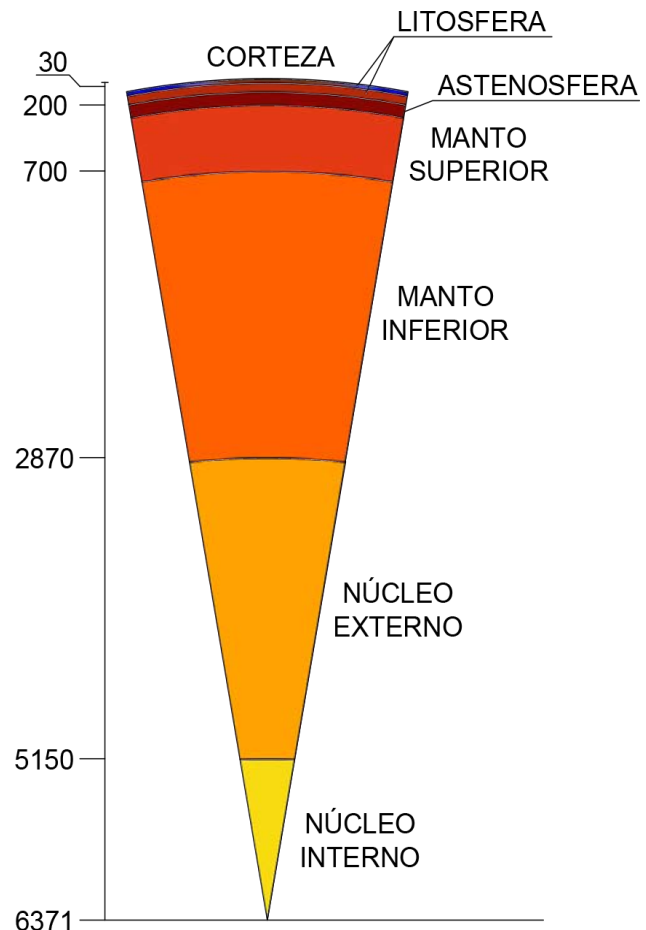


Figura 1.1 La estructura interna de la Tierra y sus espesores. Fuente adaptada de Nava, 2002, p. 71

- **Corteza terrestre:** Dividida en corteza oceánica que contiene el fondo de los mares con espesores de 5 a 7 km, y la corteza continental conformada por los continentes que tienen espesores de 30 a 40 km y 60 km en las zonas montañosas.

- **Litósfera:** Formada por la corteza terrestre y la parte sólida del manto superior (sin la astenosfera), su espesor es de 150 km y se encuentra fragmentada en pedazos irregulares llamadas placas tectónicas que cubren toda la Tierra.

Ésta última capa es primordial para entender el origen de los sismos ya que las placas tectónicas yacen sobre la parte líquida del manto superior, es decir, sobre la astenosfera, y se mueven en ella gracias a las corrientes de convección que es cuando el calor del núcleo interno, que es de 4000°C , sube hacia el manto volviendo ligeras las rocas que se encuentran allí al calentarlas. Una vez en ese estado, éstas intentarían subir aún más, empujando las placas tectónicas, sin embargo, como el manto no tiene la misma temperatura que el núcleo, las rocas empezaron a enfriarse regresando a ser densas y pesadas, lo que las hará hundirse en la astenosfera (Cruz, 2015, p.13), como puede observarse en la figura 1.2.

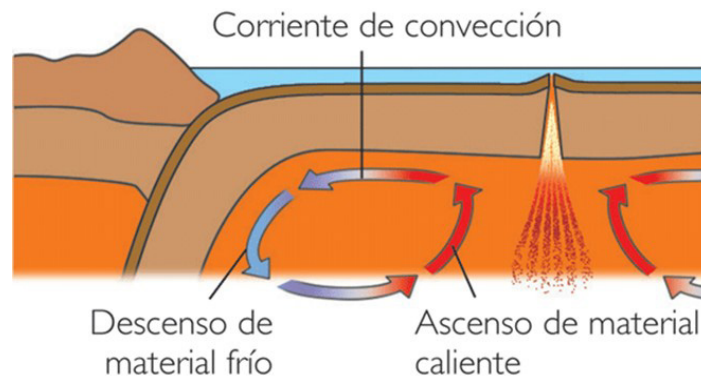


Figura 1.2 Proceso de las corrientes de convección dentro del manto donde las rocas calientes suben mientras que las frías descienden. Recuperado de Vidal, 2016, diapositiva 9.

De esta manera, las corrientes de convección juegan un papel elemental en el comienzo de un sismo ya que al ocasionar que las placas se muevan, hará que los bordes de éstas entren en contacto e inicien un sismo. De hecho, este proceso es tan importante que también es el responsable de la creación de nuevos continentes, montañas y erupción de volcanes.

1.1.2 Tipos de contacto entre placas tectónicas

Como se vio previamente, las corrientes de convección causan que las placas tectónicas se muevan causando contacto entre sus bordes, en los cuales, al tener cada placa diferente ubicación, forma y colindancia, la interacción de sus límites no será la misma en todos los casos ya que puede originar dorsales oceánicas, zonas de subducción o bordes transformantes.

A continuación, se explicarán las características de cada una:

▪ **Dorsales oceánicas o rift continental:** Es un lugar en la corteza terrestre en el que al impactar las rocas calientes provenientes del manto contra las placas tectónicas causa que se alejen entre sí. Su separación en el caso del rift continental suele causar valles y depresiones; y en las dorsales oceánicas produce montañas o islas (Cruz, op. cit., p.14).

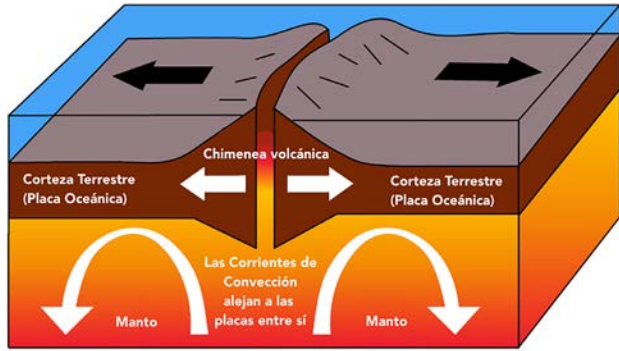


Figura 1.3 Muestra como las placas se separan producto de las corrientes de convección causando una dorsal oceánica. Recuperado 2018 de <http://descubriendogalapagos.ec>

▪ **Zonas de subducción:** Son franjas en la corteza terrestre en la que una de las placas se adentra por debajo de la otra, ocasionando que la que penetró se consuma en las profundidades del manto. Existen tres tipos de subducción y pueden ser entre dos placas continentales, dos oceánicas o entre una oceánica y una continental. Su unión produce fosas o trincheras (Pavón, 1998, p. 18-20, 158, 159).

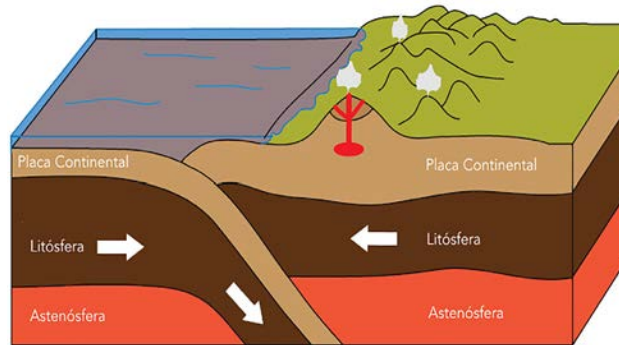


Figura 1.4 Ilustra como una placa tectónica se adentra por debajo de la otra causando una zona de subducción. Recuperado 2018 de <http://descubriendogalapagos.ec>

▪ **Bordes transformantes:** Estos límites se presentan cuando las placas se mueven en direcciones laterales contrarias, pero dentro del mismo plano horizontal. A diferencia de las otras, no crean ni destruyen litosfera. Un ejemplo de este tipo de falla es la de San Andrés (Cruz, op. cit., p.15).

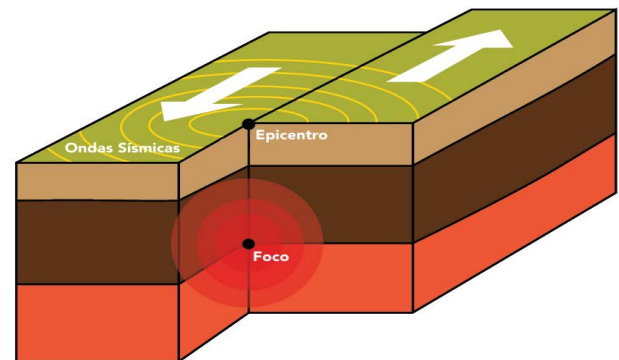
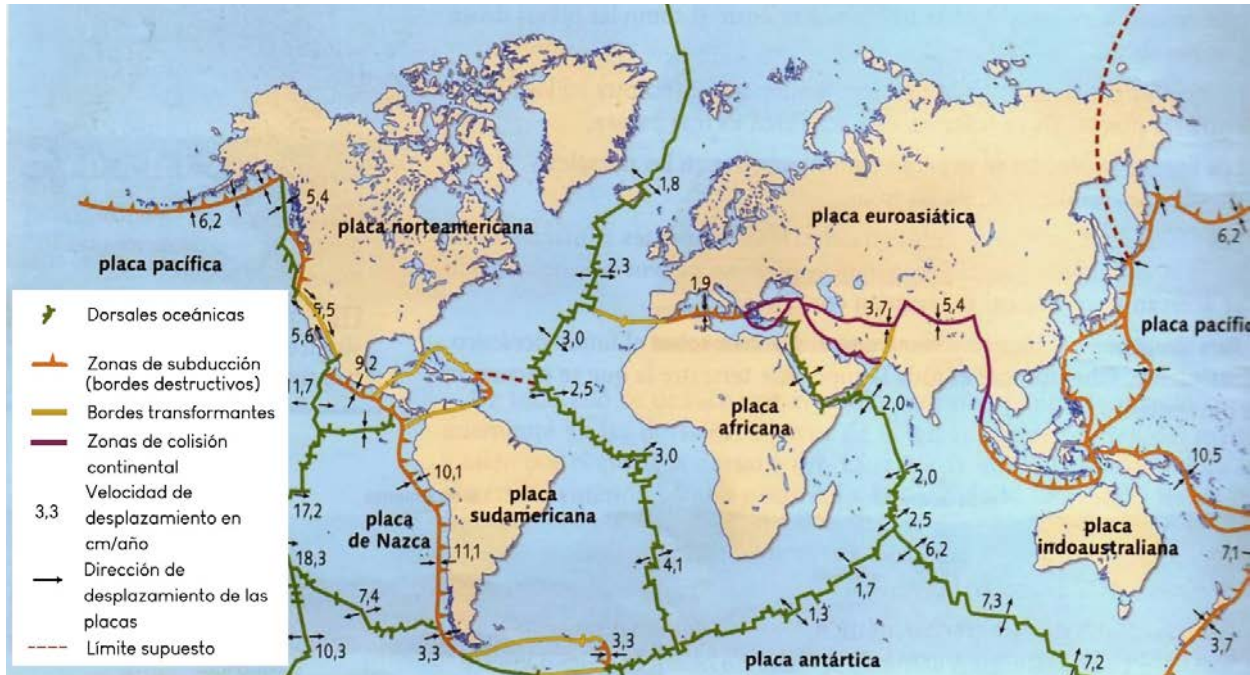


Figura 1.5 Muestra como una placa tectónica se mueven en direcciones contrarias formando un borde transformante. Recuperado 2018 de <http://descubriendogalapagos.ec>

1.1.3 Fallas geológicas

Como se mencionó anteriormente, las placas tectónicas cubren toda la Tierra y en cada uno de sus límites se pueden desarrollar diferentes tipos de contacto que pueden ser dorsales oceánicas, rifts continentales, zonas de subducción o bordes transformantes. Estos, en la actualidad, ya están establecidos y su modificación requiere millones de años (*ver mapa 1.1*).



Mapa 1.1 Las placas principales con sus diferentes tipos de bordes, dirección y velocidad de desplazamiento. Recuperado 2018 de IES Ortega y Gasset, 2018.

No obstante, aunque su tipo de contacto ya está determinado, ahí suelen presentarse fracturas y cambios abruptos en la superficie terrestre llamadas fallas geológicas. Estas se originan cuando se corta la superficie con un cierto ángulo hacia el interior de la Tierra (plano de falla), y hace que las rocas que están paralelas a la fisura se deslicen una en relación con la otra (Pavón, op. cit., pp. 9-11).

Su longitud puede variar desde unos metros hasta kilómetros, puede tener una profundidad superficial o profunda y puede desarrollarse lentamente a través de miles de años o de manera repentina causando un sismo (Bolt, 2003, pp. 33-37).

Existen diferentes maneras en las que las fallas pueden desplazarse. Cruz (op. cit., pp. 18, 19) señala las siguientes:

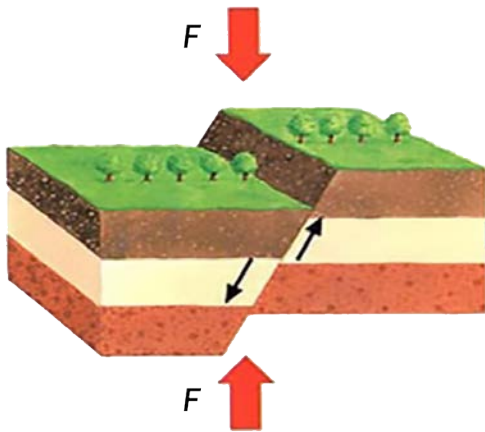


Figura 1.6 Dirección del movimiento de las fallas normales. Adaptado de Scienze e scienze, 2015.

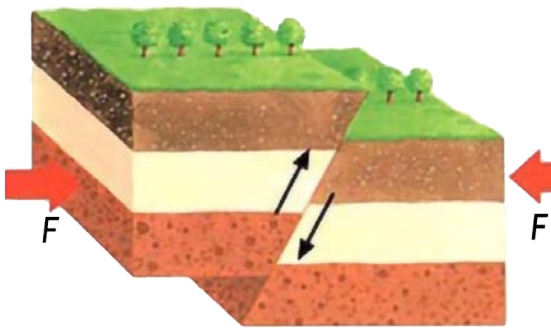


Figura 1.7 Dirección del movimiento de las fallas inversas. Adaptado de Scienze e scienze, 2015.

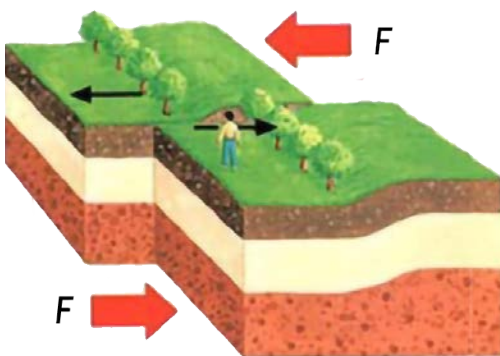


Figura 1.8 Dirección del movimiento de la falla de desgarre. Adaptado de Scienze e scienze, 2015.

- **Fallas normales:** Se crean por la acción de fuerzas tectónicas extensivas y la gravedad. En ellas las rocas que se encuentran por encima del plano de falla descienden. Con frecuencia se encuentran en regiones de la litosfera donde dos placas se alejan entre sí (dorsales oceánicas), o bien en el interior de las placas, lejos de sus límites.

- **Fallas inversas:** Se crean por la acción de fuerzas tectónicas compresivas. El movimiento que sufren es tal que las rocas que están por encima del plano de falla ascienden. Generalmente, los terremotos más grandes del mundo suelen ocurrir sobre fallas de este tipo y en regiones donde las placas se acercan entre sí, como las zonas de subducción.

- **Fallas de corrimiento lateral (transcurrentes o de desgarre):** se crean por la acción de fuerzas tectónicas horizontales que no coinciden con la orientación del plano de falla. En ellas, las rocas de ambos lados del plano se mueven horizontalmente y en sentido contrario. Los terremotos que ocurren en ellas suelen ser poco profundos y abundantes en las dorsales oceánicas.

Nava (op. cit., pp. 31-32), añade la existencia de otro tipo de falla:

• **Falla mixta:** Es cuando los esfuerzos que actúan sobre el terreno son una combinación de esfuerzos de tensión o compresión con esfuerzos de cortante. Es decir, puede ser una combinación entre fallas normales, inversas o de corrimiento lateral.

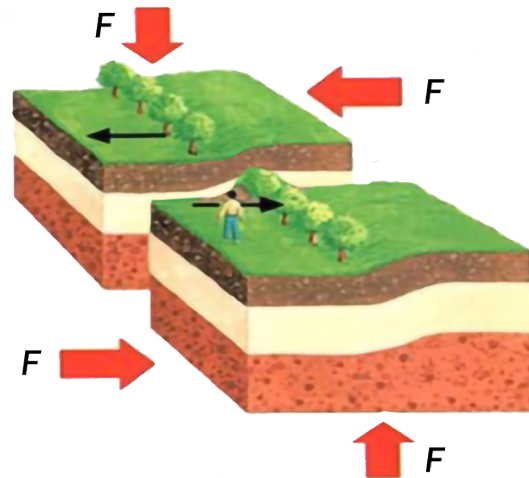


Figura 1.9 Dirección del movimiento de las fallas mixtas. Adaptado de Scienze e scienze, 2015.

1.1.4 Rebote elástico

Llegados a este punto, cabe simplificar que en las zonas de contacto entre las placas tectónicas puede desarrollarse algún tipo de falla geológica que al originarse hará que las rocas cercanas a la falla experimenten un rebote elástico que posteriormente creará ondas sísmicas y marcará el inicio de un sismo.

Para entender esto, debe explicarse la teoría del rebote elástico que establece que las rocas son flexibles y que, por un periodo de tiempo que puede ser corto o largo, pueden almacenar una gran cantidad de energía.

Ahora bien, el rebote se da cuando estás al estar sometidas a fuerzas tectónicas presentarán un esfuerzo de tensión que irá aumentando de manera gradual hasta que alcancen su límite elástico. Una vez en este estado, al continuar la fuerza, seguirán tensionadas hasta alcanzar el rango plástico, que es cuando su deformación se volverá permanente. En este momento, si las fuerzas se siguen aplicando y son mayores a lo que la piedra puede soportar, se producirá la fractura haciendo que se rompan repentinamente (Nava, op. cit., p. 30).

Cuando eso pase, súbita y violentamente se liberará la energía elástica almacenada, una parte como calor y otra como ondas sísmicas, donde estas últimas son las que originarán un sismo (Bolt, op. cit., pp. 57-61).

Posterior a este fenómeno, las rocas regresarán a su posición de equilibrio,

pero no a su ubicación original ya que, ante la rotura, éstas quedarán divididas en ambos lados de la falla (Pavón, op. cit., p. 3), como se muestra a continuación:

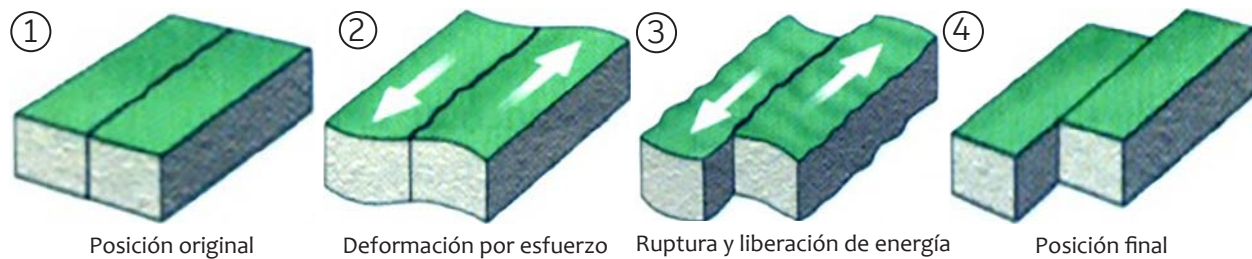


Figura 1.10 Proceso del rebote elástico. Adaptada de INPRES Argentina, s.f.

1.2 Características del sismo

Previamente, se abordó como se origina un sismo desde el interior de la Tierra con el objetivo de lograr comprender mejor el fenómeno sísmico, sin embargo, eso es solo una parte de su entendimiento. La otra parte la conforman sus características, es decir, su manera de propagarse, sus componentes, sus tipos, sus escalas de medición y su monitoreo. Los cuales se verán a continuación.

1.2.1 Ondas sísmicas

Como se vio previamente, los sismos son causados por las ondas sísmicas producidas por la liberación de energía de las rocas de la corteza terrestre al fracturarse. Estas ondas, que se propagan desde el punto donde se originó el sismo hacia todas las direcciones, se clasifican en dos grupos: Ondas de Cuerpo y Ondas Superficiales. A continuación, se describirán a detalle.

1.2.1.1 Ondas de cuerpo

Las ondas de cuerpo se propagan en el interior de la Tierra y están compuestas por **ondas primarias y secundarias**.

De acuerdo a Nava (op. cit., pp. 51-53), las **ondas primarias**, también llamadas ondas **P**, son las más rápidas entre todas las ondas sísmicas pues su velocidad es de 5 km/s en las rocas cercanas a la superficie, y más de 11 km/s en el interior de la Tierra, es la primera en registrarse en los sismógrafos, su movimiento al propagarse, comprime y dilata la roca (ver Figura 1.11).

También, son capaces de viajar a través de rocas solidas o materiales líquidos como en el océano. Una parte de ellas, al emerger a la superficie, se transmiten a la atmosfera como ondas sonoras. (Bolt, op. cit., pp. 25-26).

En cuanto a las **ondas secundarias**, también llamadas ondas **S**, de corte o cizalla, Nava (op. cit., p. 53-55) establece que son más lentas que las primarias, no son capaz de propagarse en materiales líquidos, se mueven en cualquier dirección perpendicular a la propagación, es decir, de arriba abajo, de un lado al otro, o en una sola dirección; tienen mayor amplitud que la onda **P** y se sienten más fuerte que éstas (ver *Figura 1.11*).

De lo anterior, queda claro que entre ambos tipos de ondas hay un intervalo de diferencia al propagarse pues cuando las ondas principales ya llegaron, las secundarias apenas van en camino.

Sin embargo, las primarias al llegar se asemejan al efecto de las ondas sonoras al vibrar las ventanas mientras que las secundarias son en sí las causantes principales del daño a las edificaciones (Pavón, op. cit., p. 6).

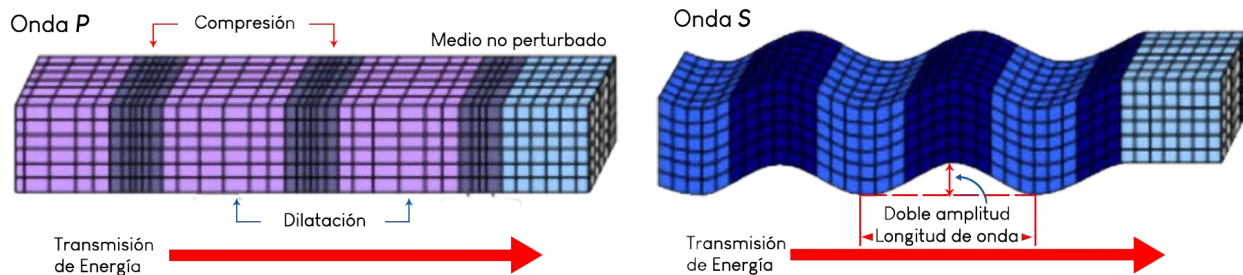


Figura 1.11 Diagrama que ilustra el movimiento del suelo de acuerdo a si es una onda primaria o secundaria. Fuente adaptada de Sáez, 2016, p. 14 con información de Bolt, op.cit. p.27.

1.2.1.2 Ondas superficiales

Las ondas superficiales, como su nombre lo dicen, viajan de manera superficial ya que al aumentar su profundidad al interior de la Tierra decrecen. Se dividen en **ondas Love y Rayleigh**.

De acuerdo a Bolt (op. cit., p. 28), las **ondas Love** mueven el suelo de lado a lado en un plano horizontal y en ángulo recto a la dirección de la propagación, sus efectos producen daños al causar sacudidas horizontales en los cimientos de las construcciones (ver *Figura 1.12*).

En cuanto a las **ondas Rayleigh**, Pavón (op. cit., pp. 7-8) señala que éstas son caracterizadas por moverse en forma de elipse, es decir, de manera vertical y horizontal en un mismo plano, sobre la dirección del viaje de la onda, son más lentas que las de Love y que las de cuerpo (ver Figura 1.12).

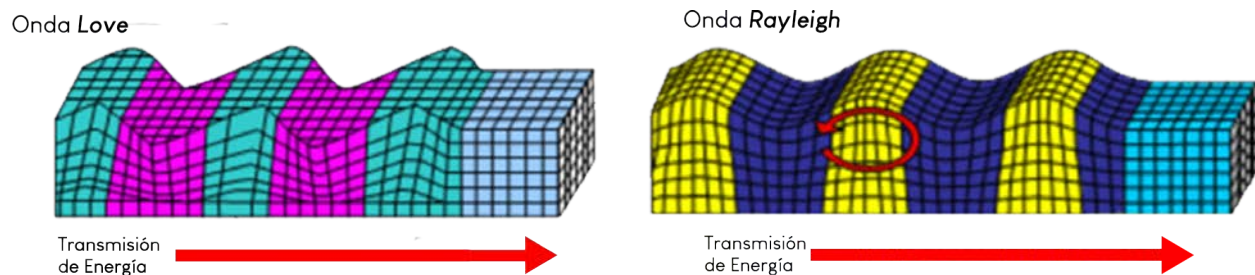


Figura 1.12 Diagrama de la forma en la que se mueve el suelo cerca de la superficie terrestre ante las ondas Love y Rayleigh. Fuente adaptada de Sáez, 2016, p. 14 con información de Bolt, op.cit. p.27.

Ahora bien, a pesar de que existen todos estos tipos de ondas y diferentes tipos de propagación, dependiendo de la magnitud del sismo, de la distancia a la que se ubique cierta región en relación al punto de origen, las amplitudes (desplazamiento máximo) e intensidad de las ondas, sus efectos variarían ya que en lugares cercanos puede ser fuerte mientras que en lugares muy lejanos podría ser imperceptible.

1.2.2 Componentes de un sismo

Una vez explicadas las ondas sísmicas, sus diferentes tipos y la forma en la que viajan sobre la Tierra, es importante aclarar algunos componentes que trae consigo su liberación.

Primeramente, el área dentro de la corteza terrestre en que las rocas se fracturan y liberan energía se llama hipocentro o foco del sismo y su proyección en la superficie terrestre, que está exactamente encima de este, se llama epicentro (Guevara, 2009, pp. 82-83).

De allí que el hipocentro es el punto donde comienza el movimiento del sismo y de donde empezaran las ondas a propagarse hacia todas las direcciones posibles. Sin embargo, como se vio en el apartado anterior, los diferentes tipos de ondas empezaran a separarse debido a la velocidad en la que viajan,

así como las características del terreno, es decir, si atraviesan agua o estrato rocoso.

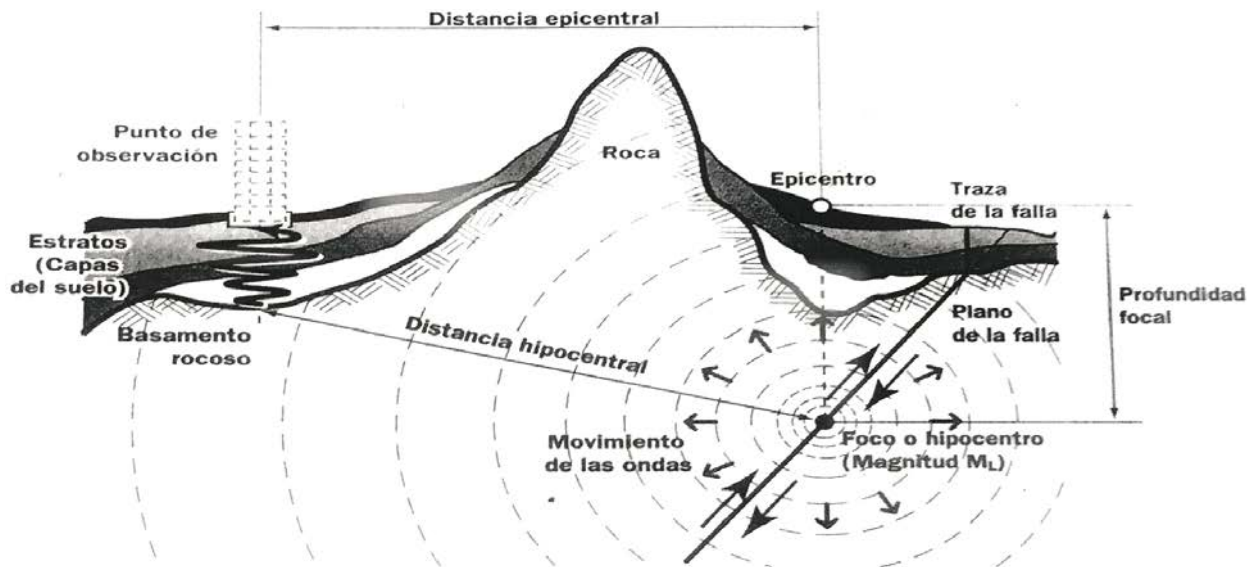


Figura 1.13 Diagrama que muestra la propagación de energía de las ondas y sus componentes.

Fuente: Guevara, 2009, pp. 83.

En el caso del estrato rocoso, las ondas propiciarán que el terreno empiece a moverse en forma de vaivén en torno a su posición de equilibrio haciendo que el edificio experimente un movimiento oscilatorio que producirá vibración¹.

Esto último está relacionado con las características de un sismo como son: duración, frecuencia y amplitud.

La duración se refiere al tiempo que tarda la vibración del terreno, la frecuencia a los ciclos de oscilación del movimiento en un determinado tiempo y la amplitud puede definirse por desplazamiento (trayecto que se recorre entre una posición de inicio y final), velocidad (distancia recorrida) y aceleración del terreno (Guevara, op. cit, p. 84).

1.2.3 Tipos de sismos

Los sismos, dependiendo del tipo de contacto que experimenten los bordes de las placas tectónicas, se pueden dividir en dos categorías las cuales son: interplaca e intraplaca.

¹ Términos retomados de la Real Academia Española: <https://dle.rae.es>

El interplaca es causado por la fricción de las zonas de contacto entre las placas y sus profundidades varían de 15 a 30 km, mientras que los intraplaca son menos frecuentes, se generan en la parte interna de las placas, en zonas que no suelen presentar actividad sísmica y pueden tener la misma profundidad que los interplaca o alcanzar de 60 ó 70 km (Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2014, pp. 2-5) . Ambos se ilustran en la siguiente imagen:

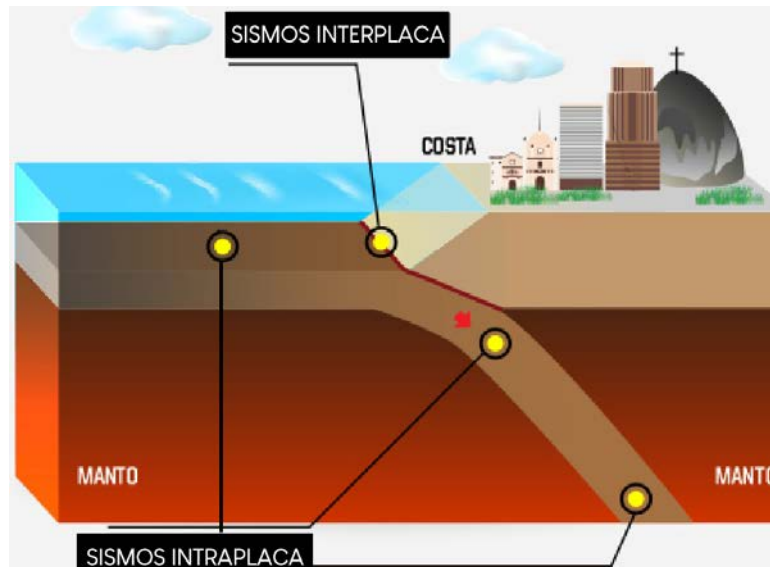


Figura 1.14 Zonas de contacto de los sismos Intraplaca e Interplaca. Adaptado de construyebien.com, 2018

1.2.4 Pre-eventos y réplicas sísmicas

Cuando se origina un evento telúrico de gran magnitud, este suele considerarse como un “**evento principal**” ya que puede existir la posibilidad de que haya sismos que lo precedan o se desarrollen después de él.

Los primeros se llaman **preeventos o premonitores** ya que concentran en las rocas los esfuerzos que originarán el evento principal y ocurren desde segundos, horas o meses antes que este (Nava, op. cit., pp. 39-40).

Los segundos se llaman **réplicas**, son producto del aumento repentino de actividad sísmica debido al evento principal y ocurren como consecuencia de este, debido a que la vez anterior no se pudo liberar toda la energía almacenada de las rocas (Cruz, op. cit., p. 23).

No obstante, para que los sismos entren en cualquiera de las dos categorías deben tener hipocentros cercanos e intensidades menores. Esto debido a que, si alguno de los eventos tiene magnitudes cercanas o iguales, se considera un evento múltiple (Nava, op. cit., p. 40).

Por el contrario, si el sismo es superior al evento principal y su hipocentro no es cercano, se considera que es un evento diferente, es decir, que no tienen relación.

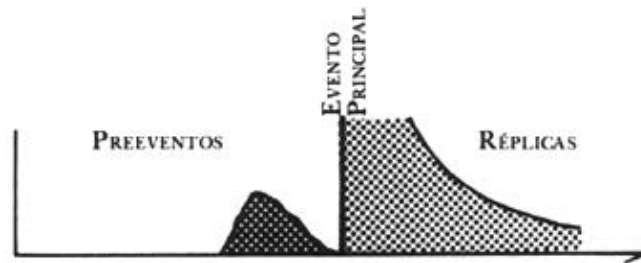


Figura 1.15 Ejemplo de un diagrama que muestra la actividad que originará un evento principal y ese una replica. Fuente: Nava, 2002.

1.2.5 Monitoreo de un sismo

Ahora bien, debido a que los sismos son fenómenos impredecibles, es muy importante monitorear las zonas en las que se encuentran los límites de placas ya que la probabilidad de que ocurra un sismo de gran dimensión dentro de esa área es sumamente alta.

Para lograr esto, existen estaciones ubicadas en esas regiones con tres aparatos de medición. Guevara (op. cit., p. 83-84) señala los siguientes:

- *Sismógrafos: registra el patrón del movimiento del terreno en función del tiempo.*
- *Acelerómetro: calcula la variación de la velocidad del terreno por un movimiento sísmico en función del tiempo; se usa en sismología para medir cuantitativamente la severidad de la vibración del terreno al paso de las ondas sísmicas por el punto de observación.*
- *Acelerógrafo: registra en unos gráficos en formas de ondas el movimiento oscilatorio del terreno. Estos gráficos llamados acelerogramas, señalan de forma horizontal el tiempo mientras que el vertical, el cambio de la aceleración.*

Cabe mencionar que la razón por la que hacen las mediciones en función del tiempo es porque el daño que causará en una zona está relacionado con la duración total del movimiento intenso más que con los valores máximos de aceleración (Bolt, op. cit., p. 111).

De esta manera, en cuanto se produzca un evento telúrico, a través de los aparatos de medición y las estaciones, se puede alertar a la población del riesgo que podrían enfrentar.

1.2.6 Escalas de medición

Para la comprensión de las escalas de medición es preciso establecer los términos de magnitud e intensidad, ya que ambos términos se utilizan para describir el grado del evento telúrico.

Esto es porque magnitud es un *“índice numérico registrado por el acelerógrafo y representado por acelerogramas que permite medir la energía liberada en el hipocentro”* mientras que la intensidad se mide después del evento, está basada en la percepción de los observadores y es un *“índice cualitativo que refleja los efectos producidos por el movimiento sísmico sobre las personas, los animales, las construcciones y el medio ambiente natural, en un lugar determinado”* (Guevara, op. cit., pp. 87-88).

Es así que la escala que mide la magnitud es la de Richter ya que mide la energía liberada desde un valor negativo como -1 (para micro-sismos) hasta 9.

Tabla 1.1 Muestra los efectos que causa el sismo de acuerdo a sus grados Richter.

Grados Richter	Efectos / Consecuencias
Menos de 3.5 °	Generalmente no es percibido, pero sí es registrado.
3.5 ° - 5.4 °	Usualmente se siente pero sólo causa daños menores.
5.5 ° - 6.0 °	Ocasiona daños ligeros a edificios.
6.1 ° - 6.9 °	Puede ocasionar daños severos en áreas muy pobladas.
7.0 ° - 7.9 °	Causa graves daños.
8.0 ° o mayor	Grave o total destrucción en comunidades cercanas, dependiendo de la calidad de la infraestructura de las mismas.

Fuente: Adaptada de Educarchile, s.f., p.1.

Guevara señala que cada unidad de su escala “corresponde a la liberación de cerca de 30 veces más energía que el anterior”. Por ejemplo, un "sismo de magnitud 5.0 libera cerca de 900 veces más energía que uno de magnitud 3,0" (op. cit., p. 88).

Por otro lado, la escala Mercalli mide la intensidad de los sismos, va del 0 al 10 y mide el nivel de catástrofe que ocasiona. Estas escalas se complementan ya que “un terremoto de cierta magnitud en la escala de Richter tiene tantas intensidades en la escala de Mercalli como lugares en donde los efectos de la sacudida sean diferentes” (Cruz, op. cit., p. 32).

Esto quiere decir que existe un solo valor de energía liberada, sin importar la lejanía con el hipocentro, pero la intensidad si variará dependiendo de su cercanía o de sus condiciones del suelo.

Es por esta razón que las escalas están relacionadas y sirven para detectar si la población se enfrenta a un temblor (que es aquel que no provoca ningún daño) o a un terremoto en el que sus daños podrían ser de grandes proporciones.

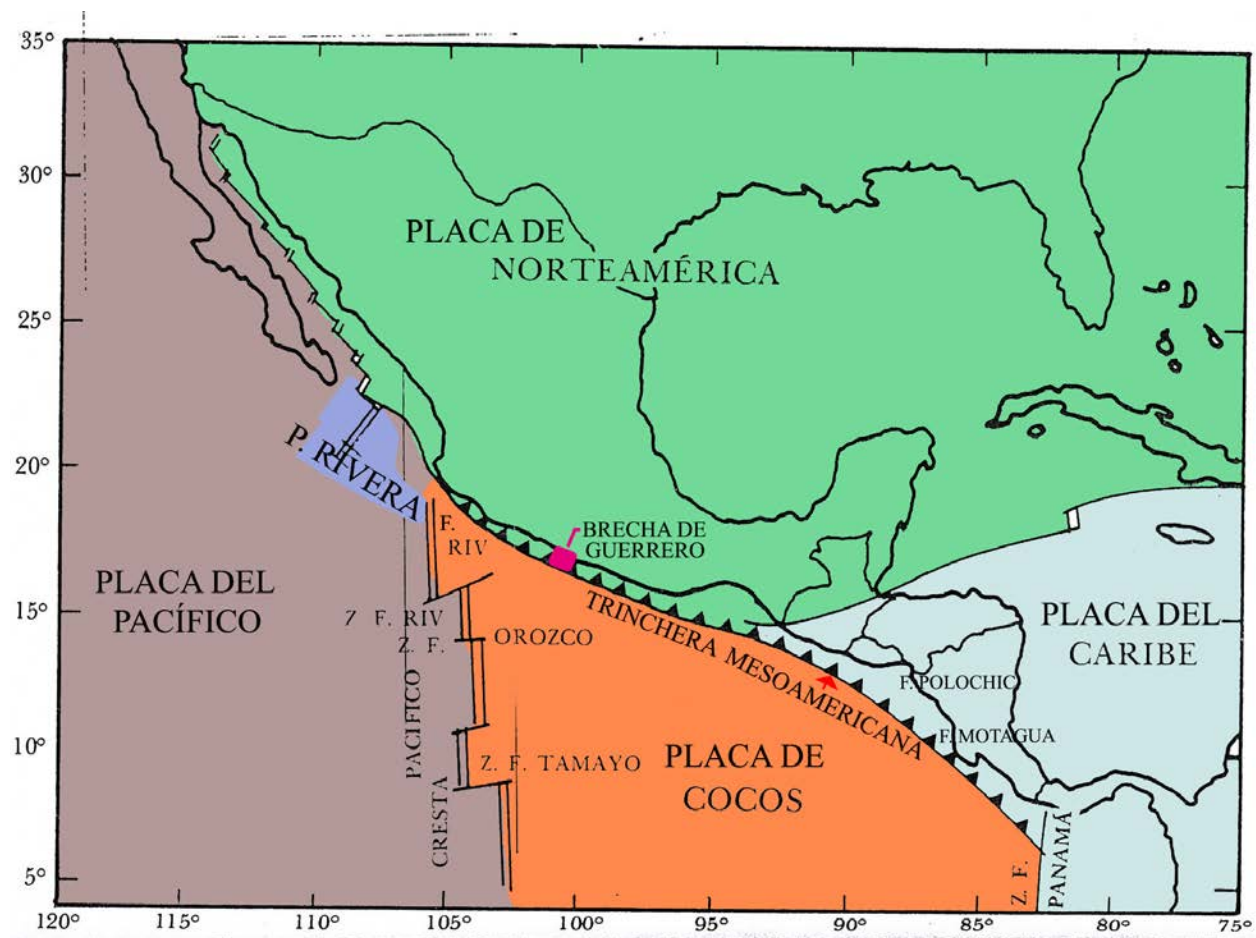


Figura 1.16 Valores de la escala de Mercalli de acuerdo a los efectos del sismo. Fuente adaptada de Cruz, op.cit., p.21 con información de INSIVUMEH, 2016, pp. 6-7.

1.3 Sismicidad en México

La República Mexicana, al igual que otros países altamente sísmicos, se encuentra dentro el Cinturón de Fuego (ver figura 19) al tener su costa oeste en el océano pacífico. De hecho, una parte del país está sobre la placa del Pacífico mientras que el resto está sobre la placa Norteamericana que colinda con la del Caribe; Cocos y Rivera (ver mapa 1.2).

Esta disposición de placas ha causado la creación de fallas, brechas y trincheras en las inmediaciones del país lo cual ha originado un sinnúmero de sismos que son continuamente monitoreados por el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES) y posteriormente graficados en un mapa de sismicidad por el Servicio Sismológico Nacional (SSN).



Mapa 1.2 Mapa de México que muestra sus placas tectónicas, fallas geológicas, brechas y trincheras. Fuente: Adaptada por la autora con información de Nava (op.cit., p. 82 y 86).

Las estadísticas de este mapeo sirven para establecer el epicentro de los sismos, así como para detectar los lugares que tienen una alta actividad sísmica que, por lo general, suelen ser las costas de los estados de Guerrero, Oaxaca y Chiapas. Esto se debe a que cerca de ellos se encuentran cuatro fallas geológicas (ver figura 29, p.33) las cuales, de acuerdo a Nava (op.cit., pp. 92) son:

Falla de Tamayo: Separa la placa de Rivera de la placa de Norteamericana

Falla de Orozco: Separa la placa de Cocos de la del Pacifico

Falla de Rivera: Separa la placa de Rivera de la del Pacifico

Falla de Chixoy-Polohic y Motagua: Separa la placa de Cocos del Caribe

Además, cercana a esa zona se encuentra la “Trinchera Mesoamericana” (ver figura 29) que se extiende desde el Golfo de California hasta el extremo sur del país, en Chiapas, y de ahí hasta Panamá. En donde las placas de Rivera y Cocos se adentran debajo de la Norteamericana. La segunda, al subducirse, forma diferentes ángulos de inclinación (echado) alcanzando 9° de profundidad en Michoacán, 12° en Acapulco, 14° en Oaxaca y 45° en Tehuantepec (Nava, op.cit, pp. 84-87).

Esto es transcendental pues entre más incrementa el ángulo de inclinación más aumentara la profundidad máxima de los hipocentros y el área de propagación. De hecho, en Tehuantepec se registra un “*origen sísmico en la corteza continental inferior y en la zona del manto*” donde se consideran hipocentros con profundidades mayores a 70 km (Protección Civil de Oaxaca, 2016, p. 40).

Aunado a lo anterior, dentro de México se encuentra una región que no ha tenido actividad sísmica en un largo tiempo, en la que se cree se ha acumulado energía elástica en sus rocas y presenta la probabilidad de una ruptura intensa. Esta región se llama brecha sísmica y está ubicada en el estado de Guerrero entre la Placa de Cocos y la Norteamericana.

La brecha, también llamada Brecha de Guerrero (ver figura 29), parte

desde Acapulco hasta Zihuatanejo y los límites de sus placas no han liberado energía desde hace 108 años por lo que especialistas en el área esperan que ahí se desarrolle un un sismo con una magnitud superior a 7.5 grados Richter puesto que antes de 1911 presentó actividad sísmica mayor a esos grados (SSN, 2014, pp. 3-5).



Recuperado 2019 de CENAPRED, 2019.

Esto representa un serio riesgo para la Ciudad de México por su cercanía con la brecha y por ser una super urbe en donde millones de personas podrían sufrir las consecuencias de un movimiento telúrico de grandes magnitudes.

No obstante, por medio de una investigación realizada por Husker, Ferrari, Arango, Carbo y Arzate (2018, p. 37) se encontró que la amenaza de la brecha sísmica podría ser menor a lo que se cree ya que presenta el fenómeno de deslizamiento lento en el cual las placas se deslizan de manera lenta e imperceptible.

Este tipo de deslizamiento se explica por las características geológicas de las placas que, ante conductividad eléctrica, mostraron que la capa de roca de la placa Norteamericana no permite el paso del agua, al contrario de las rocas de la placa de Cocos que llevan agua y tienen fluidos libres que están cubiertos por un sello impermeable que, al interactuar con las secas, hace que los fluidos incrementen, atrapándolas y reduciendo tanto la fricción como la acumulación de energía (Husker, et. al., op. cit., p.35-37).

Esta teoría representa un parteaguas que explica porque en tantos años no se ha desarrollado un evento sísmico en esta área, no obstante, a pesar de que sus hallazgos resultan positivos, requieren de investigaciones complementarias que confirmen este fenómeno por lo que por ahora lo único que se puede hacer es seguir monitoreando la región ya que aún existe la amenaza de cuatro fallas geológicas y de la Trinchera Mesoamericana.

De hecho, independientemente de la brecha, México está en una zona de alta sismicidad la cual, de acuerdo al Servicio Sismológico Nacional, "reporta en promedio la ocurrencia de 80 sismos por día de magnitud $M > 2.0$ " (SSN, 2019, p. 6).

Por esta razón, en el país se han instalado 64 acelerómetros de los cuales 12 están en la costa de Guerrero y el resto entre los estados de Jalisco, Colima, Michoacán y Puebla, aparte de los 37 que se encuentran en el estado de Oaxaca; los cuales juntos forman parte del Sistema de Alerta Sísmica Mexicano (SASMEX) que monitorea las 24 horas del día la ocurrencia de sismos de magnitud considerable en zonas cercanas a ciudades con gran densidad de población como lo es la Ciudad de México (CIRES, s.f).



Mapa 1.4 Tiempo de transmisión del SASMEX desde el hipocentro hacia los lugares aledaños. Recuperado 2019 de CIRES, s.f.

Además de esto, el SASMEX, por medio de los sismogramas, al detectar la magnitud del sismo avisa de manera inmediata con una alerta sísmica sonora a diferentes poblaciones del peligro al que se enfrentan para que pueda resguardarse en un lugar seguro antes de las ondas lleguen a ese lugar (Cruz, op. cit., pp. 86-89). Por ejemplo, en el caso de desarrollarse un sismo fuerte en el estado de Guerrero o en la Brecha, la Ciudad de México será alertada 80 segundos antes de que llegue ahí (ver Mapa 1.4).

Ese tiempo no parece mucho pero con ayuda de planes de contingencia, pueden distribuirse para salvaguardar la vida de los habitantes. Sobre todo, en la capital del país que previamente ha sufrido efectos devastadores en su población y edificación. No solo por su cercanía con los estados sísmicos sino por las condiciones de su tipo de suelo, que se explicaran con más detalle a continuación.

1.3.1 Efectos de los sismos en la Ciudad de México

Con la finalidad de comprender la geología del suelo de la Ciudad de México y la razón por la que los sismos con hipocentros tan lejanos la afectan, es primordial partir del origen de la ciudad.

Inicialmente, la zona estaba compuesta por pequeños islotes entre amplios lagos rodeada de



Figura 1.17 Traza de México - Tenochtitlan. Recuperado de CNEM,1987.

valles, montañas y volcanes, la cual fue ocupada por el imperio Azteca debido a sus ventajas políticas y militares. Su colonización fue tan prospera que en 1325 fundaron la ciudad de México-Tenochtitlan, construyeron chinampas para la siembra de alimentos, crearon canales, acueductos y consolidaron terrenos para edificar sobre ellos (Centro Nacional de Estudios Municipales [CNEM,1987] .

Así duraron casi 200 años hasta 1521 con la conquista de los aztecas a mano de los españoles. Los cuales decidieron asentarse sobre la antigua Tenochtitlan, nombrándola capital de la República Mexicana y cambiándole el nombre en 1585 como Ciudad de México (CNEM,op. cit).

Este suceso, trajo consigo una nueva traza en el área la cual empezaron a drenar al desecar poco a poco los lagos de Zumpango, Xaltocan, Texcoco, Xochimilco y Chalco por medio de drenajes y canales para redistribuir el agua a otros lugares y disminuir el problema de inundación de la zona (Reinoso, 2007, p.4).

De hecho, eso sirvió para que los asentamientos humanos proliferaran y se erigieran sobre un suelo tan complicado como diverso. El cual, por sus orígenes geológicos de ex lago, espacio de cultivo y tierra firme, tuvo que ser clasificada en tres zonas: la de lomas, de transición y la de lago.

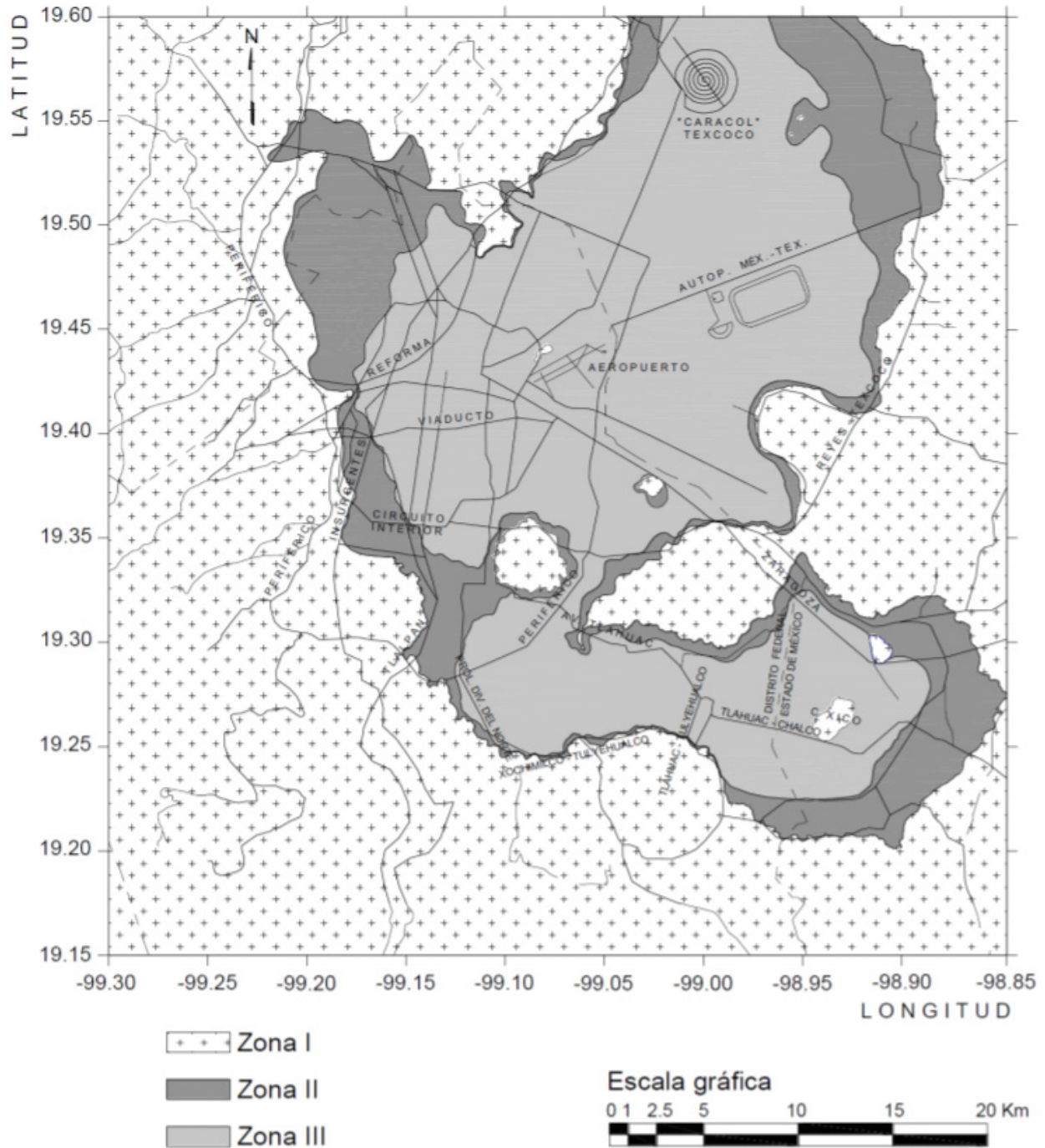
Las características de cada una las señalan las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones de la Ciudad de México actuales (en adelante NTCDCC) y son las siguientes:

▪ **Zona I o de Loma:** *formadas por rocas o suelos generalmente firmes (...); es frecuente la presencia de oquedades en rocas, de cavernas y túneles excavados en suelos para explotar minas de arena y de rellenos artificiales no controlados;*

▪ **Zona II o de Transición:** *En esta región los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos (...); está constituida predominantemente por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre (...) que tienen espesor de pocos metros.*

▪ **Zona III o de Lago:** *Integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son en general medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.*

Con ayuda de esta categorización se creó un mapa geotécnico para la Ciudad de México, la cual es obligatorio tomar en cuenta para construir en ella.



Mapa 1.5 Zonificación geotécnica de la Ciudad de México. Recuperado 2019 de NTCDC, 2017, p. 5.

A su vez, esta zonificación es muy importante debido a que la Zona III representa un peligro inminente por el comportamiento mecánico inestable de sus arcillas el cual, atrae partículas de agua lo que las hace sumamente compresibles ya que entre mayor cantidad de líquido tenga, más compresibilidad y plasticidad presentará (Berry y Reid, 2001, pp. 13-16).

Aunado a eso, la zona III, ante movimientos telúricos, presenta el fenómeno de amplificación. Esto es cuando se intensifica la señal sísmica durante el evento modificando la frecuencia de las ondas y causando una mayor duración.

No obstante, a pesar de que ahora se conoce este fenómeno, el entendimiento de los diferentes tipos de suelo dentro de la Ciudad de México es relativamente nuevo ya que fue hasta el reglamento de construcciones de 1966 en el que se habló por primera vez de su composición y hasta 1993 cuando se integró al reglamento debido al sismo de 1985 que devastó la Ciudad.

Es por ello que, para entender mejor la relación del tipo de suelo y el movimiento sísmico, se verán a continuación los efectos que ha experimentado la Ciudad de México ante los sismos de 1957, 1985 y 2017.

1.3.1.1 Los efectos del sismo de 1957

Para entender el impacto que los sismos han tenido dentro de la Ciudad de México, y en su evolución en la forma de construirse dentro de ella, es importante remontarse al sismo de Julio de 1957, mejor conocido como “*sismo del Ángel*”.

Esté sismo se originó en la costa del Pacífico, en Guerrero, cerca del puerto de Acapulco (ver fig. 30) a las 2.40 de la mañana al subducirse la placa de Cocos bajo la de Norteamérica. Su magnitud fue de 7.5 R y en la Ciudad de México su intensidad en la escala de Mercalli fue de VII (Figuroa, 1957, pp. 55-56).

Las poblaciones de San Marcos, Chilpancingo, Chilapa, Huamuxtitlán, Ayutla y Tuxtla en Guerrero sufrieron casi daño total en sus edificaciones debido a que estaban construidas con adobe, el cual ha demostrado un comportamiento estructural inadecuado ante sismos. Por otro lado, en la Ciudad de México por lo

menos 1000 reportaron algún tipo de daño. Aunado a eso, el número de decesos a nivel nacional fue de 54, de los cuales 39 fueron de la capital (Ventura, 2017, p. 2).

Es por ello que, a pesar de la lejanía del epicentro, la afectación en la capital del país fue trascendental debido a las características de su tipo de suelo en las que se encontró que, de 523 edificios dañados, el 96% se ubicaba en terreno blando (zona III). La razón de esto es porque el suelo interviene un rol importante en la transmisión de las fuerzas de cortante del edificio y al ser primariamente arcillas, tienen vacíos entre sus partículas y "*un contenido de agua medio de 300%*" lo que las hace ser extremadamente compresibles (Marsal, 1958, 12-17).

Marsal señala que el tipo de daños encontrados fue: la falta de control de calidad en la construcción de obras de concreto, la incorrecta colocación de acero de refuerzo, colado defectuoso en las uniones trabe-columnas, agrietamiento en los muros por una baja resistencia del mortero, excesiva flexibilidad de estructuras que provocaron choque entre edificios colindantes y un incorrecto diseño de cimentaciones que presentaban asentamientos diferenciales (op.cit, p. 23-25).

Hiriart complementa los daños señalando que en varios edificios la distribución de los muros no fue considerada desde el diseño original lo que causó diferencia en sus rigideces, introdujo excentricidad en las fuerzas laterales al desplazar el centro de torsión y crearon concentración de esfuerzos en los miembros de la estructura (1958, 29-30).



Figura 1.18 Edificios dañados en la Ciudad de México tras el sismo de 1957. Recuperado 2018 de Ventura, 2017, p. 2.

Aunado a eso, Narváez y Reinoso (2007, pp.65-66) realizaron a través de un análisis estadístico una tabla con información de los efectos que produjo el sismo en las edificaciones para considerar el tipo de daños que causó. Sin embargo, para propósito de esta investigación, solo se retomaron los edificios que presentaron de daño moderado a colapso.

Tabla 1.2 Descripción de los inmuebles dañados por el sismo de 1957.

EDIFICIO	DAÑO	ALCALDÍA	AÑO DE CONSTRUCCIÓN	NÚMERO DE NIVELES	USO	INMUEBLE EN ESQUINA	GOLPETEO	DAÑO EN COLUMNAS	DAÑO EN TRABES	PANDEO DE LOSA	FALLA EN CIMENTACIÓN	OTROS DAÑOS
Sistema estructural a base de Marcos de Concreto												
Juárez #76	M	C	1938	11	Oficinas	Si	Si	No	Si	Si	No	-
Morelos #110	M	C	1945	13	Oficinas	Si	-	Si	Si	No	No	-
Oaxaca #50	M	C	1955	11	Oficinas	No	No	No	No	No	Si	Falla de pilotes, asentamiento de 1m
Reforma #122	M	C	1951	14	Oficinas	No	Si	Si	Si	No	No	Daño en escaleras
San Juan de Letrán #23	M	C	1936	7	Cine	No	Si	Si	No	No	No	-
Topógrafos #7	M	C	1952	14	Residencial	Si	No	Si	Si	Si	No	-
Aquiles Serdán #29	G	A	1951	8	Oficinas	Si	No	No	Si	No	Si	Daño en escaleras y pilotes
Abraham González #3	G	C	1947	10	Oficinas	No	No	Si	Si	Si	No	-
Casco de Sto. Tomas	G	C	1950	4	Escuela	No	No	Si	Si	No	No	-
Insurgentes #263	G	BJ	1946	9	Oficinas	Si	No	Si	Si	No	No	-
Insurgentes #368	G	BJ	1948	5	Banco	Si	No	Si	No	No	No	-
Reforma #35	G	C	1956	14	Oficinas	No	No	Si	Si	No	No	-
Villalongín	G	C	-	5	Oficinas	No	No	Si	No	No	No	-
Reforma #1	G	C	1934	16	Oficinas	Si	No	No	No	No	No	Destrucción de muros
Frontera y Alvaro Obregón	CT	C	1957	5	Oficinas	Colapso Total						
C. Romero de Terreros #52	CT	CY	1957	2	Residencial	Colapso Total						
Sistema estructural a base de Marcos de Acero												
Reforma #77	G	C	1943	14	Oficinas	Si	No	Si	No	No	No	-

Nomenclatura.- Daño: M Moderado, G Grave, CT Colapso Total
 Alcaldía: C Cuauhtémoc, A Azcapotzalco, BJ Benito Juárez y CY Coyoacán

Fuente: Creación de la autora con datos tomados de Narváez y Reinoso, 2007, p.65-66.

De acuerdo a la tabla anterior puede confirmarse que los edificios dañados se concentraron en una zona de suelo blando, principalmente la que corresponde a la alcaldía Cuauhtémoc. También, puede observarse que los edificios entre 5 y 14 niveles fueron los que más se dañaron, así como los que estaban destinados para oficinas.

En cuanto a los daños estructurales, de 17 edificios 8 eran inmuebles en esquina, 11 tenían fractura en sus columnas, 9 en sus trabes, 3 en sus losas, 2 en su cimentación y por lo menos 2 experimentaron golpeo con sus colindancias.

A su vez, los edificios construidos con marco de concreto armado fueron más perjudicados que los de acero. No obstante, esto pudo deberse a que en aquella época la construcción con acero no era tan utilizada.

Como contraparte a estos efectos, fue a partir de este sismo que se actualizó el reglamento de construcciones al añadir por primera vez la composición del subsuelo de la Ciudad de México y agregar un capítulo de diseño estructural.

1.3.1.2 Los efectos del sismo de 1985

Para entender la evolución de la forma de construirse en la Ciudad de México, es importante hablar del sismo del 19 de septiembre de 1985. El cual se originó a las 7.18 de la mañana en el borde que divide Michoacán de Guerrero (ver *Mapa 1.3*), al subducirse la placa de Cocos bajo la de Norteamérica. Su magnitud fue de 8.1° Richter, IX en la escala de Mercalli (Beck y Hall, 1986, p. 2).

La intensidad del movimiento fue tal que, a pesar de no haberse desarrollado en la Ciudad de México, las catástrofes en esta fueron como nunca antes se había visto en territorio mexicano. Se estima que 770 edificios colapsaron, 250 000 personas se quedaron sin casa, 50, 000 resultaron heridos y más de 10,000 perdieron la vida (Cruz, op.cit, p. 48).



Figura 1.19 Edificios colapsados por el sismo de 1985. A la derecha el Hotel Regis. a la izquierda el edificio Nuevo León en Tlatelolco. Recuperadas 2018 de Revelo, 2016.

De hecho, sumando los inmuebles destruidos, se considera que 2831 construcciones en total presentaron algún tipo de daño, de los cuales 480 requería reparaciones considerables y 1581 reparaciones menores (Pan American Health Organization [PAHO], 1985, pp. 8, 9).

La razón de estos resultados fue primordialmente por el fenómeno de amplificación ya que, debido a las características del suelo, la sacudida que inicialmente venía de 45 segundos, se incrementó hasta más de tres minutos en la zona de lago (Trueba, 1986, p. 16).

Esto produjo una aceleración en suelo blando que sobrepasó un 17 por ciento la gravedad y cuyo contenido de frecuencia estaba dominado por un periodo de dos segundos. A diferencia del suelo firme que experimentó aceleraciones de 3 a 4 por ciento de gravedad (Beck y Hall, op. cit., pp. 3-4).

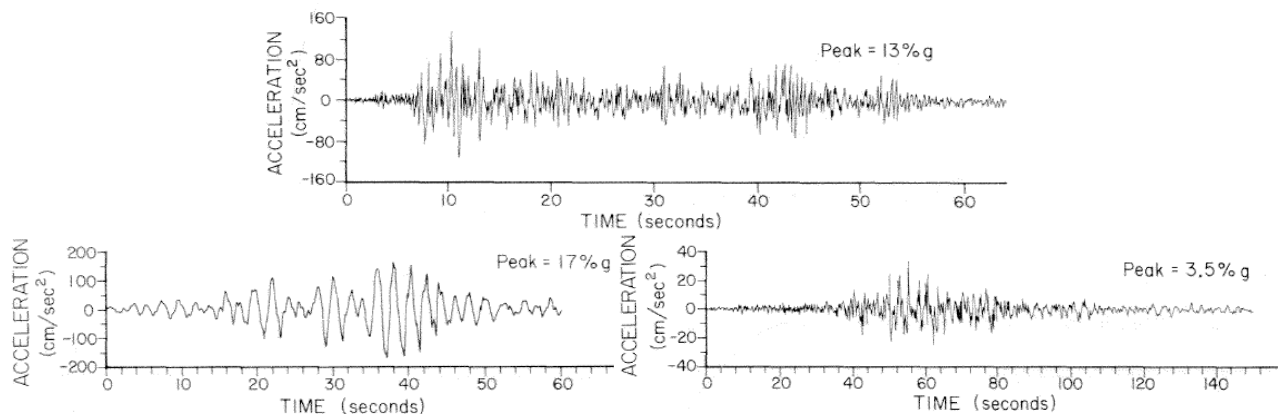


Gráfico 1.1 Arriba la aceleración del suelo cercano al epicentro, abajo la aceleración dentro de la Ciudad de México. Del lado izquierdo en terreno blando, a la derecha en terreno firme.

Fuente: Beck y Hall, 1986, p. 4.

A su vez, Beck y Hall señalan que las estructuras de mediana altura tienen periodos de vibración largos, al contrario de los edificios de pequeña altura que tienen periodos cortos. Lo que explica que los primeros hayan experimentado el efecto del sismo mucho más intenso que los segundos (op. cit., pp. 3-4).

De allí que, como el periodo dominante del terreno era de dos segundos, y las estructuras entre 6 a 15 niveles tenían periodos fundamentales entre medio a segundo y medio, cuando coincidieron, provocó que entraran en resonancia (Hall y Beck, 1986, p. 589-592).

Esto quiere decir que cuando el sismo comienza, el edificio empezará a moverse de lado a lado, en donde, por su inercia, intentara detenerse tras dar una vuelta (periodo), pero como coincide con el movimiento del suelo, esté lo volverá a impulsar, haciendo que oscile de un lado al otro sin poder detenerse (*ver subtema 2.4 para más detalle*).

Heberto Castillo estima que el periodo de dos segundos se repitió once veces y que tanto fue el precursor de la deformación del edificio como del posterior colapso. No obstante, este fenómeno no se observó ni en los edificios más altos ni en los más bajos ya que al no coincidir los periodos, el edificio podía parar su movimiento, así como evitar entrar en resonancia (Trueba, op. cit., p. 16).

Sin embargo, a pesar de este fenómeno, hubo daños que se encontraron en las construcciones que fueron causados por problemas constructivos. Su detección se obtuvo a través de un análisis realizado por Meli y Miranda a 330 edificios dañados, los cuales presentaron problemas como: fallas en columnas, trabes, losas planas y muros de concreto por cortante, por flexión y torsión; además de flexocompresión en columnas, tensión en muros de mampostería y uniones deficientes (1986, p.28). Estos aspectos se verán con más detalle en el capítulo 2.

Ahora bien, de los edificios colapsados se detectó que el 80% de los edificios se encontró no solo en la zona de lago sino dentro de la alcaldía Cuauhtémoc (PAHO, op. cit., p. 8).

Información que puede confirmarse a través de la información recopilada por Meli y Miranda (op. cit., p. 23-25) donde de los 330 edificios muestreados, 279 se concentraron en la alcaldía Cuauhtémoc, de los cuales 141 tenían un rango de altura de 6 a 10 niveles y 163 habían sido construidos de 1957 a 1976. El resto de los edificios dañados se ubico en zonas con suelos arcillosos como es Tlalpan, Benito Juárez y Venustiano Carranza.

Para concluir, a continuación se muestra una tabla de los edificios más representativos de los daños que causó el sismo de 1985.

Tabla 1.3 Descripción de los inmuebles dañados por el sismo de 1985.

EDIFICIO	DAÑO	ALCALDÍA	AÑO DE CONSTRUCCIÓN	Nº DE NIVELES	USO	TIPO DE ESTRUCTURA	IRREGULARIDAD EN PLANTA	INMUEBLE EN ESQUINA	GOLPETEO	FALLA EN COLUMNAS	FALLÓ EN LA S UNIONES	POCO ACERO DE REFUERZO	OTROS DAÑOS PRESENTADOS EN EL EDIFICIO
Hospital General de Ginecobstetricia	CT	C	1905	6	Hospital	M.C.R	No	No	No	No	No	No	No
Hospital General de México - Residencia Médica	CT	C	1905	8	Hospital	M.C.R	No	No	No	No	No	No	No
Hotel Regis	CT	C	1910	9	Hotel	M.C.R	No	No	Si	No	Si	No	Planta baja debil
Hotel Continental Hilton	CT	C	1940	12	Hotel	M.C.R	Si	Si	Si	Si	No	No	Colapso de los pisos 7-12
Multifamiliar Juárez	CT	C	1948	11	Residencial	M.C.R	Si	No	No	Si	No	Si	Pilotes inundados en el manto freático, planta baja debil
Hospital de Cardiología	CT	T	1960	9	Hospital	M.C.R	No	No	No	No	No	Si	-
Edificio Nuevo León, Tlatelolco	CT	C	1960	14	Residencial	M.C.R	Si	No	No	No	Si	Si	Pilotes inundados, soldadura incorrecta, planta baja debil
Hospital Benito Juárez	CT	C	1965	12	Hospital	M.C.R	Si	No	No	Si	Si	Si	Mostraba cuarteaduras por un sismo anterior
Conjunto Pino Suárez	CT	C	1970	15	Oficinas	M.A	No	No	No	Si	Si	No	Se doblaron las uniones soldadas
Secretaria de abastecimiento de agua	CT	C	S.f	10	Oficinas	M.C.R	No	No	No	Si	Si	Si	-
Av. San Antonio Abad #150	CT	T	S.f	10	Industrial	M.C.R	No	Si	No	Si	Si	No	Sobrepeso en la bodega, sin traves principales
Hotel de Carlo #35	CT	C	S.f	10	Hotel	M.C.R	No	No	Si	Si	Si	No	-
Durango #90	CT	C	S.f	11	Oficinas	M.C.R	No	No	No	Si	Si	Si	-
Fray Servando #154	CT	C	1957	9	Fabrica y Almacén	C. L. C	Si	Si	Si	Si	No	No	El edificio tenía sobrecarga, daño en lasas
Fray Servando #32	CT		1981	10	Oficinas	C. L. C	Si	No	Si	Si	Si	No	Daño en elementos no estructurales
Izazaga #65	CT	C	1972	12	Fabrica y Almacén	C. L. C	Si	No	No	Si	No	Si	El edificio tenía sobrecarga, daño en lasas
Insurgentes esquina con Zacatecas	CT	C	1957	7	Oficinas	C. L. C	Si	Si	No	Si	No	No	-
Monterrey # 87	CT	C	1957	6	Oficinas	M.C.R	Si	No	Si	No	Si	No	-
Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas (SCOP)	CT	C	1954	10	Oficinas	M.C.R	Si	No	No	Si	No	No	-
Av. Universidad # 13	CT	CY	1970	8	Residencial	C. L. C	Si	Si	No	Si	Si	No	-
Madrid # 58	CT	C	1940	8	Oficinas	C. L. C	Si	No	No	Si	No	Si	Las columnas cambiaron de rectangular a circular
Sevilla esq. Chapultepec	CT	C	1950	8	Oficinas	C. L. C	Si	No	Si	Si	No	No	Daño en el cubo de escaleras

Nomenclatura.- Daño: CT Colapso Total Alcaldía: C Cuauhtémoc, T Tlalpan y CY Coyoacán
M.C.R : Marcos de Concreto Reforzado M.A : Marcos de Acero C.L.C : Columna y Losa plana de Concreto

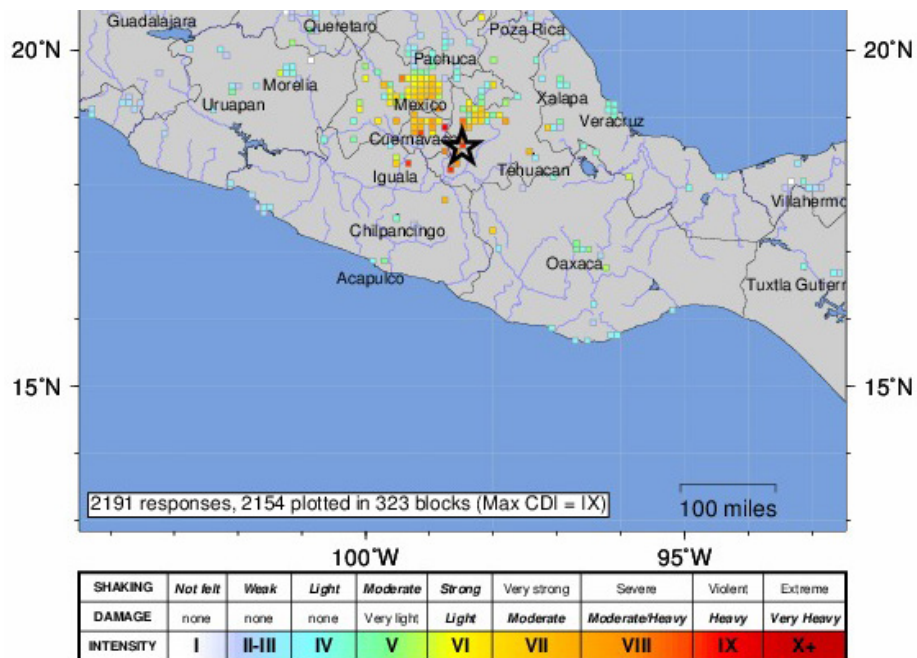
Fuente: Creación de la autora con datos tomados de Meli y Miranda, 1986, p.28; y Salcido, 2015, pp. 71 - 437

1.3.1.3 Los efectos del sismo del 2017

El 19 de septiembre del 2017 a las 13.40 horas, justo treinta y dos años después del terremoto más fatídico de la Ciudad de México, se desarrolló a 57 Km de profundidad entre el límite que divide Puebla y Morelos, un sismo de magnitud 7.1 debido a una falla de tipo intraplaca al subducirse la Placa de Cocos por debajo de la de Norteamérica (SSN, 2017, p.1, 2).

Este sismo se dio a 120 km de la capital de México y fue por su misma cercanía, aunado a su tipo de suelo con sedimentos lacustres, lo que provocó una serie de daños importantes en las construcciones dentro de la capital y sus zonas aledañas.

De acuerdo a una estimación realizada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2017) , el sismo fue catalogado dentro de la escala de Mercalli desde el grado VII hasta grado IX en algunas partes ya que produjo intensidades máximas en la región del epicentro, entre los estados de Puebla, Morelos y Guerrero que fueron disminuyendo al alejarse de la zona epicentral. Excepto en la Ciudad de México, en donde se llegaron a experimentar intensidades intensas y sacudidas severas.



Mapa 1.6 Estimación de las intensidades del sismo de 2017 en México. Retomado 2018 de USGS, s.f.

De hecho, en la Ciudad de México se estima que 228 personas fallecieron, 2 mil 273 viviendas sufrieron daño total y 44 edificios colapsaron, los cuales están concentrados principalmente en las alcaldías Cuauhtémoc, Benito Juárez, Coyoacán y Tlalpan (Esquivel, Islas y Serdán, 2018, p. 17- 23) y que a su vez están erigidas sobre sedimentos blandos.

De eso se puede inferir que los edificios derrumbados y con daños se concentran principalmente en la zona III donde, de acuerdo a datos recuperados de Torres, ahí se produjeron periodos de vibración menores a 2 segundos, una ampli-ficación de 300 a 500 veces mayor que en suelo firme y una duración de hasta 90 segundos (2017, p.18, 19).

Lo anterior se debe a que el suelo de lago está caracterizado por tener un espesor de 25 a 40 m de arcilla, en el cual predominan periodos de vibración de 1 a 2 segundos (Galvis, Miranda, Heresi, Dávalos y Silos, 2017, p.1), lo cual, dependiendo de su tipo de onda, afectará más a un cierto tipo de edificio.

Sobre esto, Cruz, Krishna y Ordaz señalaron que los edificios menores a 12 niveles en suelo firme presentaron aceleraciones moderadas, al contrario de los ubicados en suelo blando que presentaron aceleraciones de 188 gal, similares a lo que experimentaron los edificios dañados en 1985. Por otro lado, los edificios altos en suelo blando experimentaron de 1.5 a 4.9 aceleraciones menores que las de 1985 ya que en ese sismo algunas estructuras llegaron a alcanzar 760 gal (2017, p. 5-6). Los datos anteriores pueden observarse en los acelerogramas siguientes:

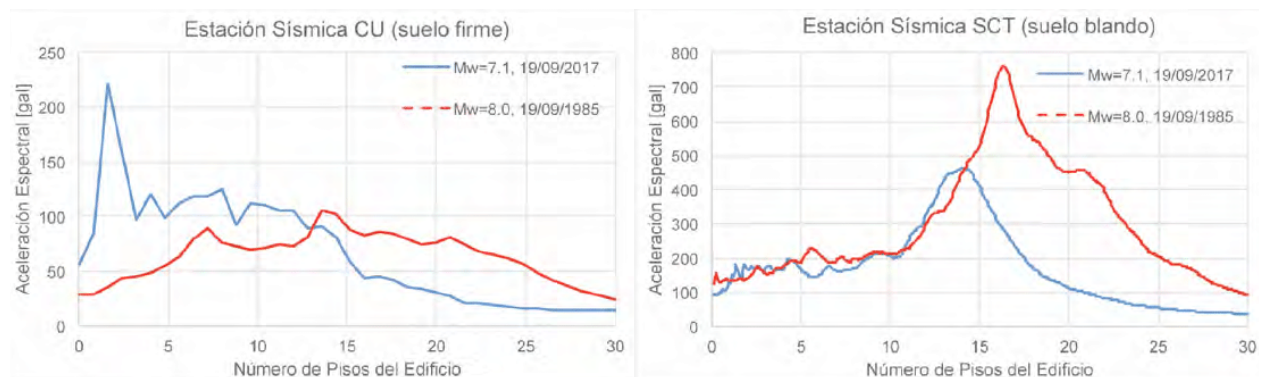


Gráfico 1.2 Comparación de aceleraciones experimentadas en edificios de diferentes alturas, en suelo firme y blando ante el sismo de 1985 (rojo) y 2017 (azul) (sin escala). Fuente: Cruz, et. al, op. cit., p. 6

Lo anterior muestra que el efecto del sismo dañó principalmente estructuras de entre a 4 y 7 niveles. En contraste con las dañadas en 1985 que fueron en su mayoría mayores a 7 pisos. Estos resultados se deben a las características de la onda que se propaga ya que las “ondas con mayor período de oscilación amenazan estructuras más altas. Contrariamente, ondas con períodos más cortos, amenazan estructuras más bajas” (Cruz, et. al., op. cit. p. 5).

En cuanto a los daños estructurales que se encontraron de los edificios colapsados, Galvis (et. al., op. cit., 17, pp.6-14) señala los siguientes:

- 90% fueron construidos antes de 1985
- 60 % tenía sistema estructural de columna y losa plana de concreto armado
- 59% eran inmuebles en esquina
- 57% tenían planta baja débil
- 33% tenían su mampostería sin confinar
- 25% tenían tanto piso blando como ubicación en esquina
- 5% de las edificaciones colapsaron debido al golpeteo de una colindancia más alta. Por ejemplo, un inmueble de seis pisos cayó sobre una casa de dos pisos (Bretaña 90 y 92) y otro de 5 niveles cayó sobre otra casa (Escocia 33 y 29).

La empresa ERN especializada en ingeniería sísmica coincide con los datos anteriores y añade que 5 edificios tenían irregularidad vertical y en planta, 2 presentaban el fenómeno de columnas cortas y otros presentaban deterioro en el inmueble producto de la falta de mantenimiento y daño acumulado por los sismos anteriores e incluso por el sismo de 1985 (Reinoso, 2018, pp. 44-61)

A manera de conclusión, de los daños señalados anteriormente y con información proporcionada por Salcido (2018, pp. 147-375), se realizó la tabla 1.5 que puede verse en la pagina siguiente que simplifica las fallas encontradas en los edificios que colapsaron ante el sismo del 2017.

Tabla 1.4 Descripción de los inmuebles dañados por el sismo de 2017.

EDIFICIO	DAÑO	ALCALDÍA	AÑO DE CONSTRUCCIÓN	NÚMERO DE NIVELES	USO	SISTEMA DE LOSA PLANA DE CONCRETO	IRREGULARIDAD EN PLANTA	INMUEBLE EN ESQUINA	GOLPETEO	PLANTA BAJA DÉBIL	OTROS DAÑOS PRESENTADOS EN EL EDIFICIO
Amsterdam #107	C	C	1980	9	Residencial	Marcos de Concreto	No	Si	Si	Si	Diferencia de rigideces en fachadas
Medellín #176	C	C	1968	5	Residencial	Si	No	Si	No	Si	El vencimiento de las columnas soltó las losas
Multifamiliar Tlalpan #10	C	T	1957	5	Residencial	Si	No	No	No	Si	Eliminación de muros de carga
Edimburgo #4	C	BJ	-	8	Residencial	Si	No	No	No	Si	Cimientos débiles
Miguel Alemán #106	C	BJ	-	6	Oficinas	Si	Si	Si	No	Si	-
Simón Bolívar #168	C	C	1960	5	Industrial	Si	No	No	No	No	Diseñado para cargar 250 Kg/m2, su carga real era de 350 ton/m2
Paseo de las Galias #47	C	I	1967	8	Residencial	Si	No	No	No	Si	Escases de rigidez lateral
Petén #915	C	BJ	1979	8	Residencial	Si	No	Si	Si	Si	No
Puebla #282	C	C	1967	4	Laboratorio	Si	No	No	Si	No	Columnas cortas
Rancho de los Arcos #32	C	C	1980	6	Residencial	Si	Si	No	No	Si	No
Alvaro Obregón #286	C	C	1942	6	Oficinas	Si	No	No	Si	No	Claros sin apoyo al centro, modificación a la estructura
Coquimbo #911	C	GM	1980	7	Residencial	Si	No	No	Si	Si	No
Bretaña #90	C	BJ	1957	6	Residencial	Si	No	No	Si	Si	Construida sobre una casona, no se reforzo la estructura original
Galicia #173	C	BJ	1951	5	Mixto	Si	Si	No	Si	Si	En la planta baja se rompió la unión de la losa con la columna
Escocia #4	C	BJ	1980	7	Mixto	Si	No	No	No	Si	No
Enrique Rébsamen #241	C	BJ	1967	5	Residencial	Si	Si	No	Si	Si	No
Balsas #18	C	BJ	1980	5	Residencial	Marcos de Concreto	No	No	Si	Si	Grietas diagonales con varilla oxidada
Concepción Beistegui #1503	C	BJ	1947	5	Mixto	Si	Si	Si	No	No	Fallaron las columnas causando el colapso de las losas
Colegio Enrique Rebsamen #11	C	T	1983	4	Escuela	No	No	No	No	No	Castillos y cimientos débiles, losa sobredimensionada
Emiliano Zapata #56	C	BJ	2014	6	Residencial	No	No	No	No	No	Dimensiones de los elementos menores al reglamento y sin acero de refuerzo adecuado

Nomenclatura.- Daño: C Colapso
 Alcaldía: C Cuauhtémoc, BJ Benito Juárez, T Tlalpan y GM Gustavo A Madero

Fuente: Creación de la autora con datos tomados de Galvis, et. al., 2017, p. 12 y Salcido, 2018, pp. 147-375.

1.3.1.4 Similitudes en los daños provocados por los sismos de 1957, 1985 y 2017

Como se vio previamente, en la historia de la capital mexicana existen tres eventos sísmicos que han marcado la memoria de los capitalinos tanto por sus efectos tangentes y cuantificables, como por el conocimiento constructivo que han generado.

Por ello, en el presente apartado se hace un análisis comparativo de las tablas 1-3, 1-4 y 1-5 que abordan los efectos originados por los tres sucesos, con el fin de detectar si existen similitudes de daño en las construcciones y si existen cuáles son.

Primero, para establecer la ubicación geográfica dentro de la Ciudad de México que más daños experimentó, así como su tipo de suelo, se hizo un conteo de los edificios que colapsaron en cada alcaldía, mostrado en el gráfico siguiente:

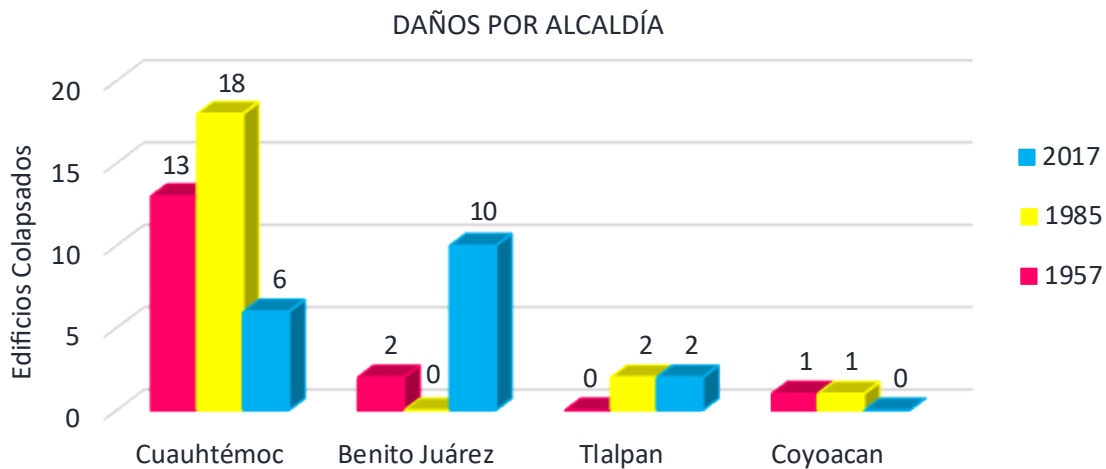


Gráfico 1.3 Daños causados por alcaldías tras los sismos de 1957, 1985 y 2017. Creación de la Autora con datos tomados de las tablas 1-2, 1-5 y 1-6 del presente documento.

Como puede observarse en el gráfico, la alcaldía que tuvo más edificios derrumbados es Cuauhtémoc al coincidir en los tres eventos con más de 10 edificios dañados, no obstante, la alcaldía Benito Juárez tras el sismo del 2017 también tuvo un número importante de colapso, sobre todo si se toma en cuenta que fueron 44 los dañados, lo que representa poco más del 20 % del total.

Las alcaldías Tlalpan y Coyoacán también tuvieron edificios dañados, que en un primer acercamiento implicaría que sus efectos fueron menores a las otras dos, sin embargo, no es del todo acertado en el caso de Tlalpan ya que las dos construcciones destruidas en el sismo del 2017 fueron El Colegio Rébsamen que cobro la vida de 26 personas y el Multifamiliar Tlalpan con 9.

Esto confirma que las alcaldías cuyos edificios han presentado más daño están ubicadas en la zona III, al tener algunas áreas de las mismas un tipo de suelo arcilloso y compresible que amplifica los efectos de las ondas.

En segundo lugar, se contabilizaron los edificios dañados de acuerdo a su uso para contextualizar el número de personas afectadas, así como la importancia de su utilización tras una eventualidad sísmica.

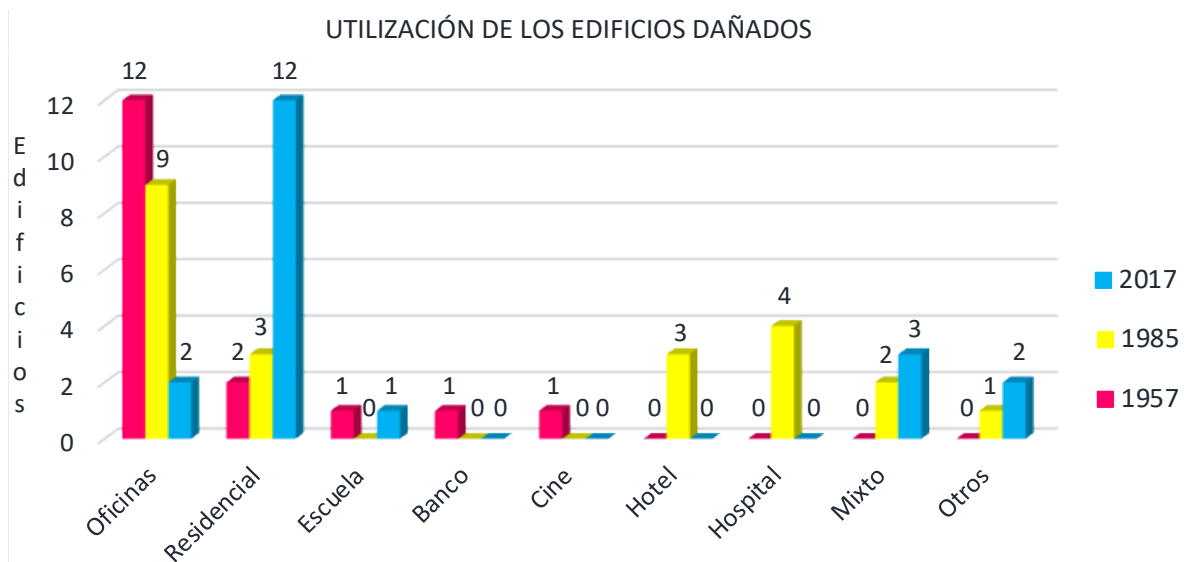


Gráfico 1.4 Daños en edificios de acuerdo a su uso tras los sismos de 1957, 1985 y 2017. Creación de la Autora con datos tomados de las tablas 1-2, 1-5 y 1-6 del presente documento.

En la gráfica puede verse que los edificios que sufrieron más daño en los tres eventos fueron aquellos cuyos usos eran para oficinas y vivienda, en donde los primeros han sido los más afectados. Esto es importante pues ambos están dirigidos a una parte de la población que, ante una eventualidad, no puede afrontar fluidamente las altas inversiones que requiere la reparación de la estructura ni el cese de su uso, sin contar que, al concentrar un gran número de personas, el desempeño inadecuado del mismo podría representar un riesgo para los habitantes.

Este es el mismo caso para los edificios mixtos que suelen tener actividades comerciales, ejecutivas y de vivienda. En cuanto a los de uso hospitalario, es evidente que éstos son los que requieren comportarse de la manera más óptima ante sismos pues no solo son necesarios tras este tipo de contingencias, sino también alberga un gran número de personas, muchos de ellos vulnerables.

En tercer lugar, se analizaron los edificios dañados de acuerdo a su altura, esto como se explicó anteriormente tiene una gran influencia en el comportamiento de la estructura ya que su periodo de vibración depende de la altura y, su coincidencia con el periodo del suelo puede hacer que entre en resonancia provocando su colapso.

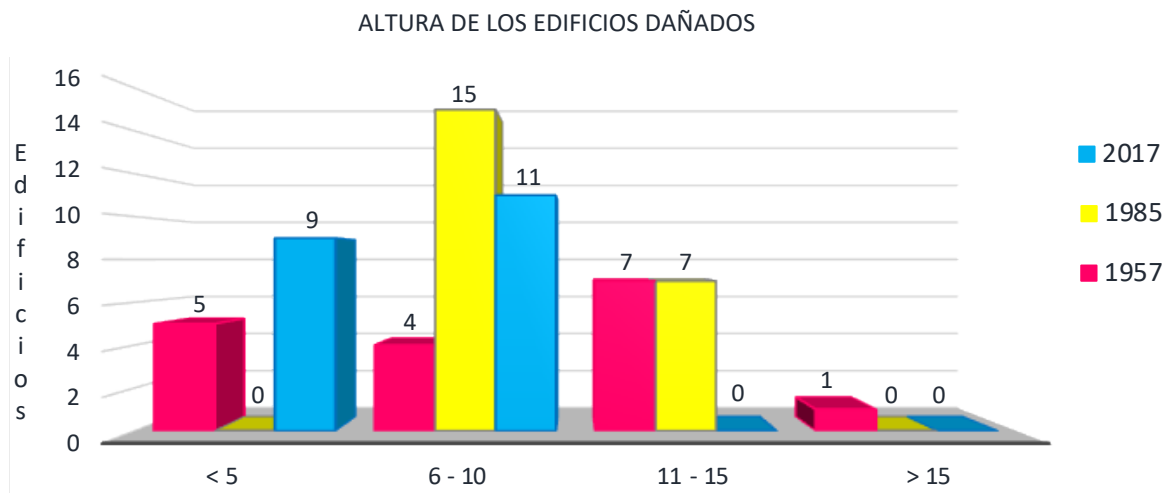


Gráfico 1.5 Edificios dañados de acuerdo a su altura tras los sismos de 1957, 1985 y 2017. Creación de la Autora con datos tomados de las tablas 1-2, 1-5 y 1-6 del presente documento.

En esta gráfica puede observarse que, en general, los edificios mayores a 16 niveles y menores a 3 han tenido comportamientos satisfactorios o, por lo menos, no han tenido daños severos.

Al contrario de aquellos que tienen de 4 a 15 pisos, principalmente los de 6 a 10 niveles que ante los tres eventos tuvieron un derrumbe. Esto puede deberse, como se vio antes, a que en ese momento su periodo de vibración era similar al periodo del terreno, lo que hizo que entraran en resonancia y colapsaran.

En cuarto lugar, se analizaron los tipos de daños que fueron detectados en los edificios y se compararon entre los tres eventos para encontrar similitudes.

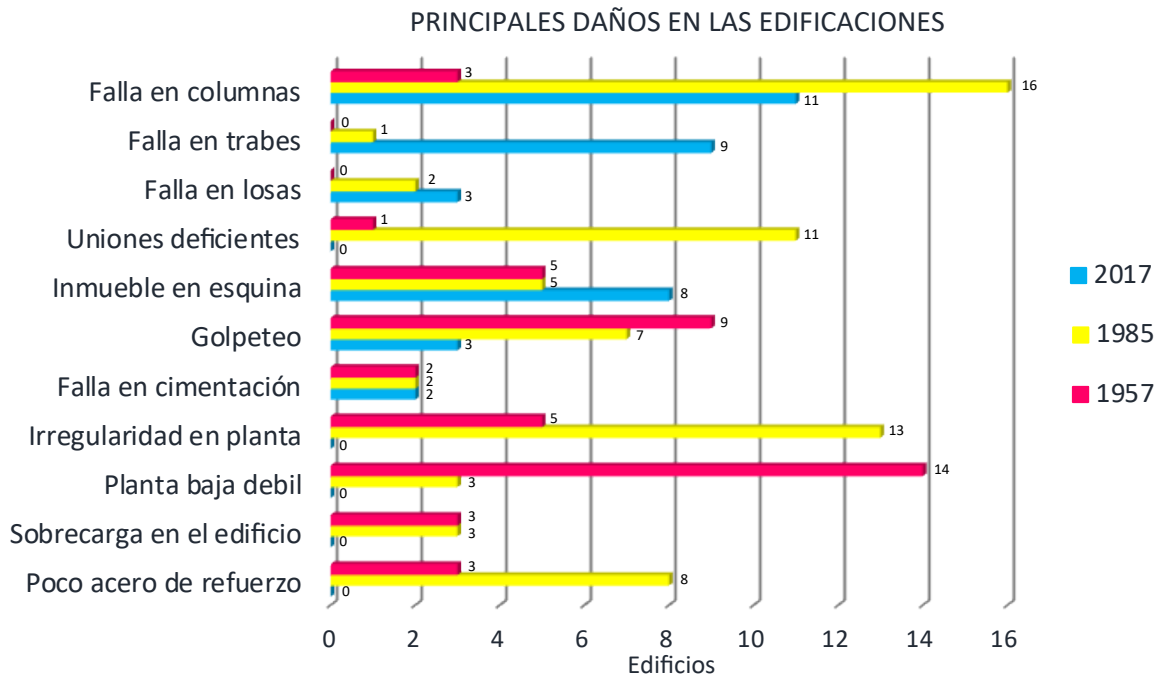


Gráfico 1.6 Principales daños encontrados en los edificios tras los sismos de 1957, 1985 y 2017. Creación de la Autora con datos tomados de las tablas 1-2, 1-5 y 1-6 del presente documento.

Como puede observarse en el gráfico anterior, la falla en columnas, golpeteo entre concordancias, falla en cimentación y aquellos inmuebles ubicados en esquina son los daños más recurrentes de los tres eventos. No obstante, una planta baja débil, irregularidad en planta, uniones deficientes y poco acero de refuerzo también reinciden en por lo menos dos eventos con varios casos.

Éstos resultados son importantes ya que al conocer las características de cada falla se puede evitar que se repitan en el futuro en edificios nuevos. O incluso, en existentes al detectar los daños y reforzar los elementos estructurales actuales. No obstante, esto será abordado con más detalle en el capítulo siguiente.

Por el momento, a manera de simplificación, se puede observar en la tabla 1-6 de la página siguiente las generalidades de los tres eventos así como los efectos causados y sus similitudes como: la alcaldía, la zona afectada, la altura de las construcciones, el uso de los edificios y las fallas constructivas.

Tabla 1.5 Generalidades de los daños causados tras los sismos de 1957, 1985 y 2017.

AFECTACIONES EN LA CIUDAD DE MÉXICO			
AÑO DEL SISMO	28 de Julio de 1957	19 de Septiembre 1985	19 de Septiembre 2017
EPICENTRO	Guerrero	Límite entre Michoacan y Guerrero	Límite entre Puebla y Morelos
MAGNITUD	7.5 R	8.1 R	7.1 R
INTENSIDAD	VII M	IX M	VIII - IX M
DECESOS	39 hab.	10,000 hab.	228 hab.
ZONAS AFECTADAS	Zona III	Zona III	Zona III
ALCALDÍAS MÁS DAÑADAS	Cuauhtémoc	Cuauhtémoc	Cuauhtémoc Benito Juárez
EDIFICACIÓN DAÑADA	1000 edificios	2831, de los cuales 770 colapsaron	2273, de los cuales 44 colapsaron
Nº DE NIVELES	5 - 15	6 - 15	4 - 10
USO DE LOS EDIFICIOS	Ejecutivo Residencial	Ejecutivo Hospitalario Residencial	Residencial Mixto
DAÑOS RECURRENTES	Golpeteo		
	Inmueble en esquina		
	Falla en cimentación		
	Falla en columnas		
	S.I.S	Irregularidad en planta	
	Falla en losas		S.I.S
	Falla en trabes		S.I.S
	S.I.S	Sobrecarga en el edificio	
	S.I.S	Planta baja debil	
	S.I.S	Uniones deficientes	
	S.I.S	Poco acero de refuerzo	

Simbología = S.I.S : Sin Información Suficiente que descarte o confirme la falla

Fuente: Creación de la Autora con datos tomados de los subtemas 1.3.1.1 al 1.3.1.3 del presente documento

Finalmente, a manera de conclusión del presente capítulo, puede resaltarse que las edificaciones que han sufrido mayores daños son las de estatura mediana (de 3 a 10 niveles), de tipo residencial y ejecutivo ubicados en la zona III, con daños en elementos estructurales pero principalmente con problemas que recaen en la configuración arquitectónica como: irregularidad en planta y en alzado, planta baja debil y ser un inmueble en esquina. Aspectos que podrían haberse evitado desde la elaboración del proyecto, y que serán analizados en el capítulo 2 y 4.



**Capítulo 2:
Criterios de diseño sísmico
en la Ciudad de México
basado en las NTCDS-2020**

2

Criterios de diseño sísmico en la Ciudad de México basado en las NTCDS-2020

En el presente capítulo se abordarán conceptos generales que explican los efectos que experimenta el edificio cuando se ve sometido a fuerzas sísmicas como: inercia, fuerza, aceleración, movimiento pendular, modo de vibrar, resonancia, amplificación, amortiguamiento, esfuerzo torsionante, entre otros.

Posteriormente, se analizarán las propiedades que deben poseer las estructuras sismorresistentes y los diferentes métodos de análisis sísmico que existen.

Cabe destacar que la realización de este capítulo está basado en el Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México del 2021 y en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del 2020 (NTCDS-2020 en adelante). Razón por la cual también se realizará un breve resumen sobre la evolución de la normativa sísmica.

De manera que todo lo analizado en este apartado servirá para familiarizarse con conceptos que se mencionarán a lo largo del documento, y que a la vez servirán como punto de partida para la elaboración del presente proyecto de investigación.

2.1 Las leyes de Newton que explican el movimiento del edificio ante un sismo

Para entender los efectos que un edificio experimenta cuando se desarrolla un sismo es importante partir de las leyes de la dinámica o de las tres leyes de Newton, las cuáles son: ley de inercia, ley del principio de acción y reacción, y ley de la dinámica.

2.1.1 Ley de Inercia

De acuerdo a Pérez (2002, p. 142) la 1ª ley de Newton o ley de la inercia establece que *“todo cuerpo se mantiene en su estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme, si la resultante de las fuerzas que actúan sobre él es cero”*.

Esto quiere decir que, por ejemplo, en el caso de un sismo, las fuerzas sísmicas moverán el terreno en el que están desplantados los cimientos y estos, a su vez, moverán a la estructura. No obstante, el edificio intentará quedarse en su estado de reposo, evitando moverse y generando con ello las llamadas fuerzas de inercia.

Estas fuerzas tienen la capacidad de alterar la estabilidad del edificio ya que pueden generar esfuerzos y deformaciones dentro del mismo como generar fuerzas cortantes en las columnas, transmitir un exceso de carga en la cimentación o en las uniones de los elementos estructurales (Bazán y Meli, 2006, p.29).

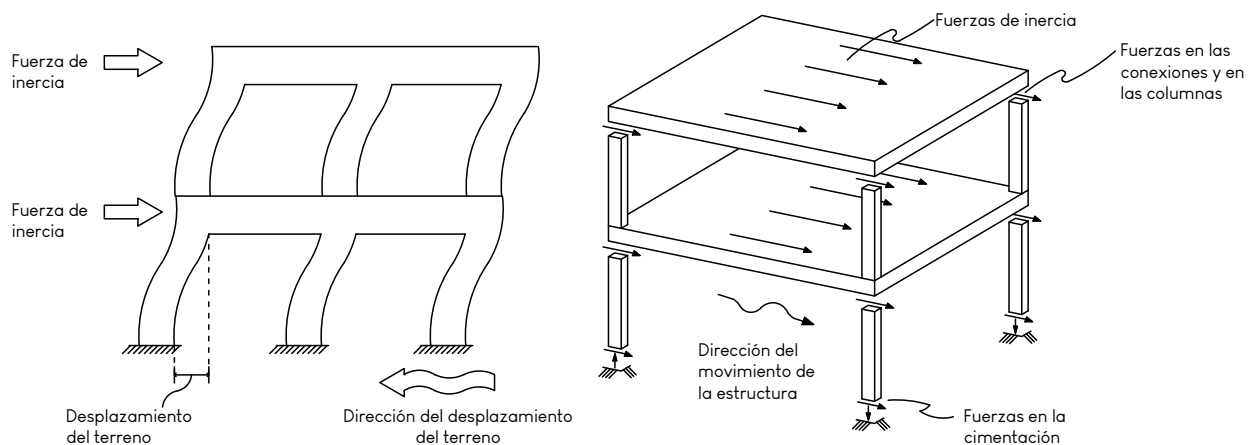


Figura 2.1 Esquema que muestra como actúan las fuerzas de inercia generadas por la vibración de la estructura ante un sismo. Fuente adaptada de Bazán y Meli, 2006, p.29.

2.1.2 Ley de acción y reacción

El principio de la 3º ley de Newton o ley de acción y reacción está basado en que “cuando un cuerpo A ejerce una fuerza sobre un cuerpo B, éste reacciona sobre A ejerciendo una fuerza de la misma intensidad y dirección, pero en sentido contrario” (Pérez, op. cit., p.145).



Figura 2.2 Esquema que representa la manera en la que se ejercen las fuerzas de acción y reacción en los cuerpos A y B. Creación de la autora con información de Pérez, 2002, p.145.

Es decir, en el caso de una construcción, cuando éste se opone al movimiento sísmico se generan fuerzas de reacción cuya resultante es igual pero contraria a la acción producida por el suelo, las cuales debido a que actúan sobre cuerpos con diferentes características no se pueden anular entre sí ni producir equilibrio (Creixell, 1993, p.19).

2.1.3 Ley de la Proporcionalidad entre Fuerzas y

Aceleraciones

Ahora bien, para calcular las fuerzas que un edificio experimentará ante un sismo se parte de la 2º ley de Newton la cual acorde a Perez establece que “toda fuerza resultante diferente de cero al ser aplicada a un cuerpo le produce una aceleración en la misma dirección en que actúa. El valor de dicha aceleración es directamente proporcional a la magnitud de la fuerza aplicada e inversamente proporcional a la masa del cuerpo” (op. cit., p.144).

De manera algebraica, esto responde a una ecuación donde la Fuerza (F^1) es igual a la masa (M^2) por la aceleración (a^3) ó:

$$F = M * a$$

1 La unidad de la Fuerza en el Sistema Internacional es un Newton (N). Donde un N es la fuerza que se ejerce sobre un kg de masa para que adquiera una aceleración de un m^2 , es decir: $1 N : 1 kg * 1 m/s^2$

2 La masa del cuerpo se calcula en kilogramos o gramos

3 El valor de la aceleración se maneja en m/s^2 o cm/s^2

Donde la masa es el peso total del edificio (P^1) que depende tanto de la carga muerta como de la carga viva, en el cual entre mayor sea su peso, mayores fuerzas sísmicas intervendrán en la edificación.

De modo que “*como el peso de un cuerpo representa la fuerza con que la Tierra atrae la masa de dicho cuerpo*” debe de tomarse en cuenta la aceleración de la gravedad (g) que vale 980 gals, 980 cm/s² o 9.8 m/s² (Pérez, op. cit., p.144).

Por lo tanto, el peso debe dividirse entre la gravedad y, al sustituir los conceptos anteriores, la ecuación también puede escribirse como:

$$F = (P / g) * a$$

Cabe aclarar que la aceleración del suelo tendrá gran influencia en el tiempo en el que se moverá la edificación, así como en su comportamiento y posibles efectos destructivos ya que lo que produce el impacto no es la velocidad sino el cambio de esta (Creixell, op. cit, p.21,22).

No obstante, uno de los problemas al definir la aceleración que experimentará el edificio es que, al ser eventos impredecibles, se desconoce la magnitud de los sismos futuros. Por ello, para fines de cálculo, suelen retomarse valores de eventos pasados u otras formulas.

Una de ellas es intercambiar (P/g) por la utilización del coeficiente sísmico (C) donde las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTCDS en adelante) de la Ciudad de México del 2008 lo definían como el “*cociente de la fuerza cortante horizontal que debe considerarse que actúa en la base de la edificación por efecto del sismo*”.

De manera que para lograr reducir la fuerza de aceleración en la base se utiliza la siguiente formula:

$$F = C * P$$

Donde la fuerza es igual al coeficiente sísmico multiplicado por el peso total del edificio. Este valor es fundamental en el diseño sísmico ya que ayuda a determinar

¹ Valor del peso del cuerpo en newtons

la fuerza que actúa en la estructura al distribuirse en toda la altura del edificio, así como en sus elementos estructurales y en su base (Pavón, op. cit, p. 195).

Sin embargo, aunque se utiliza la ecuación anterior, el coeficiente variará de acuerdo al proyecto ya que al tomar en cuenta su base, este dependerá del tipo de suelo donde se construya, de sus propiedades geológicas, topográficas y tectónicas así como del sistema constructivo propuesto y del uso que tendrá la construcción.

Siendo así que tras la modificación en 2017 de las NTCDS, el coeficiente sísmico pasó a calcularse a través de un programa que ofrece el gobierno de la Ciudad de México llamado Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño (SASID)¹ que, través de las coordenadas del terreno aparte de determinar el coeficiente, calcula el periodo (T_s), la aceleración máxima del terreno (a_0), el coeficiente de relación de desplazamientos (k) y el espectro de diseño. Para el resto de los estados, puede utilizarse el PRODISIS, generado por la CFE y el Instituto de Investigaciones eléctricas.

Este último es importante ya que de acuerdo a Pavón por medio de la duración del sismo, el movimiento del terreno y las aceleraciones máximas contra el periodo se puede obtener el espectro de respuesta para cada movimiento del terreno, el cual es imprescindible para conocer el efecto del sismo en un edificio (op. cit, pp. 192, 199), concepto que se verá más adelante.

2.2 Movimiento pendular, periodo y velocidad angular

Otro concepto que está estrechamente ligado con las leyes del movimiento y el comportamiento sísmico que experimenta un edificio es el “movimiento pendular” ya que se refiere a la capacidad que tiene el edificio de que ante un cambio de velocidad en el suelo esté empiece a mecerse de un extremo al otro.

El tiempo que tarda en moverse se llama “periodo” (T) y aunque la aceleración del terreno aumente o disminuya en el transcurso de su movimiento, esté no tendrá efecto en el periodo pues el tiempo será constante. Esto debido a que su duración es independiente del peso de la masa y de la amplitud de la oscilación (Creixell, op. cit, p.24).

¹ El SASID se puede acceder a través de la pagina <https://sasid.unam.mx/webNormasCDMX/>

En otras palabras, el edificio que en un principio está estático, al experimentar las aceleraciones del terreno sufrirá fuerzas de inercia que lo harán moverse y como la base del mismo esta desplantada en el suelo, lo que se moverá será la parte superior de la estructura, tomando como punto de partida su centro o eje central, ya que a partir de este punto se moverá de un lado a otro.

En cuanto al periodo, Creixell (op. cit., p.26) sostiene que éste será constante mientras el edificio no sufra roturas ni deformaciones plásticas, sin embargo, a la velocidad le pasará lo opuesto pues al moverse hacia el centro su velocidad será más rápida mientras que en los extremos, como es el punto donde retornará el recorrido, disminuirá totalmente para poder regresar al extremo contrario (proceso explicado en la figura 2.3).

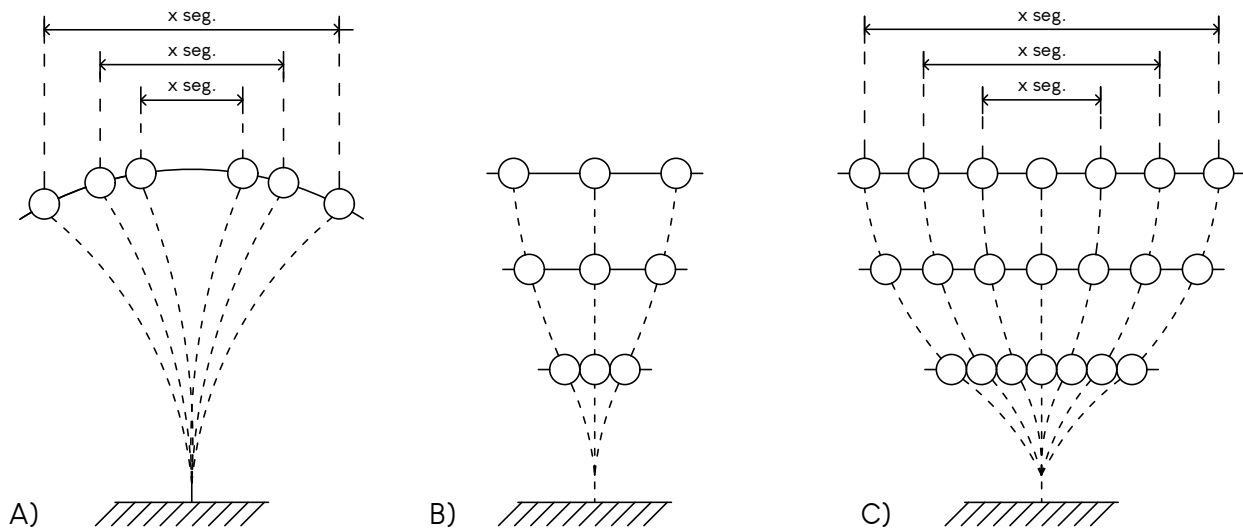


Figura 2.3 A representa el movimiento pendular del edificio. B el desplazamiento de un lado al otro del edificio por niveles y C el periodo y la velocidad angular que recorre cada nivel ante una fuerza. Fuente adaptada de Creixell, 1993, pp. 25 - 27.

Es por ello que el periodo debe ser calculado y la manera de hacerse es a través de la velocidad angular que es equitativo a un radian, es decir que su recorrido equivale a la longitud del radio de un círculo, y como su circunferencia es igual a 2π por el radio, independientemente de su tamaño, siempre será de 6.28 radianes. Por ello, la velocidad angular (w) siempre responderá a radianes entre tiempo (Creixell, op. cit., p.26). O, en otras palabras:

$$T = w \text{ donde } w = 6.28 / \text{tiempo}$$

Para que esta idea quede más clara si, por ejemplo, w equivale a 0.5 segundos y se quiere conocer el periodo (T) se tendría que hacer lo siguiente:

$$T = 6.28 / 0.5 \text{ seg.} = 12.56 \text{ seg}$$

De manera que, la velocidad angular no solo sirve para calcular el periodo sino también para determinar la fuerza que produce el edificio al desplazarse (y) tomando en cuenta tanto la masa (M) como la misma velocidad (w). Quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$F = M * w^2 * y$$

Por otro lado, el periodo, la velocidad angular y el movimiento pendular también están relacionados con otro concepto que se llama “modos de vibración”, el cual se verá a continuación.

2.3 Modos de Vibración

Para entender este concepto es vital comprender que cuando el terreno se mueve producto de la aceleración del suelo y el edificio empieza a tener un movimiento pendular, el primer movimiento que sentirá lo hará vibrar en toda su altura ocasionando un primer modo de vibración, o también llamado modo fundamental

No obstante, Creixell señalará que cuando el terreno sufra un segundo movimiento, la estructura volverá a vibrar llamándose segundo modo de vibración. De modo que, si el terreno vuelve a sufrir un cambio en su movimiento, el edificio experimentará un tercer modo de vibrar (op. cit., p.28-30).

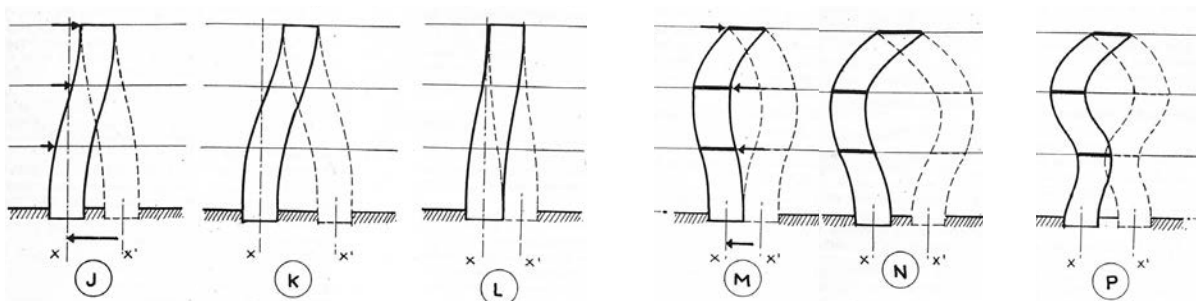


Figura 2.4 J, K, L hacen referencia al movimiento del edificio en un modo ante la aceleración del suelo, M y N a un segundo modo y P al tercer modo de vibración. Fuente: Creixell, 1993, p.29.

Esto quiere decir que la primera aceleración del terreno causará que el primer piso junto con los subsecuentes se desplazase de una manera en un cierto periodo de tiempo, pero si el sismo no cesa, este seguirá moviendo el terreno, creando una segunda sacudida que producirá que el primer piso se vuelva a mover incluso si los pisos superiores aún no habían terminado de experimentar la primera vibración. Por tanto, este suceso irá repitiéndose de acuerdo a las diversas aceleraciones que experimente la base de la construcción.

Aunado a eso, otros factores que influyen en su modo de vibrar son los valores de sus masas, es decir, el peso de cada nivel, así como de la flexibilidad de los elementos estructurales y de los diferentes esfuerzos que presenten (Creixell, op. cit., p.30).

Para entender esto con más claridad Pavón (op. cit., p. 190) señala que *“los edificios vibran simultáneamente de tantos modos como el número de pisos que poseen”* ya que éstos se deforman *“horizontalmente de un entrepiso a otro”* existiendo para cada modo de vibrar un periodo asociado.

Donde de acuerdo a Becerra, el *“esfuerzo cortante será mayor en la parte baja del edificio y disminuirá hacia arriba”*, por lo tanto, mientras más alto sea el edificio será más flexible, su periodo será mayor y tendrá más modos de vibración (2014, pp. 115-117).

En cuanto a los movimientos que experimentará el terreno, estos dependerán de las propiedades del suelo y de su cercanía con el lugar de origen del sismo, en los cuales en el caso de los epicentros cercanos con suelo firme los periodos de las ondas serán muy cortos aunque presentarán mayor aceleración mientras que los epicentros lejanos con suelo blando tendrán un mayor periodo, pero una aceleración menor (Creixell, op. cit., pp. 30-31).

Por ello, relacionando lo dicho por Becerra y Creixell, es recomendable construir edificios rígidos donde los periodos de vibración sean largos, es decir en suelo blando, y edificios flexibles donde los periodos de vibración del terreno sean cortos, o, en otras palabras, donde el suelo sea firme.

En el caso de la Ciudad de México, de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (2020) actuales, los periodos dominantes del sitio (T_s) donde se va a erigir el edificio deberán retomarse del SASID.

2.4 Resonancia y atenuantes

Para entender el siguiente punto se debe partir de la premisa de que antes de un evento sísmico, el edificio tiene en su estado de reposo una frecuencia natural, la cual cuando se propagan las ondas sísmicas y llegan a él, harán que su frecuencia se altere creando oscilaciones. Si en ese momento la vibración del terreno hace vibrar a la construcción con una frecuencia similar o idéntica, sus periodos y movimientos se sincronizarán dando lugar a una resonancia (Ramón, 2017).

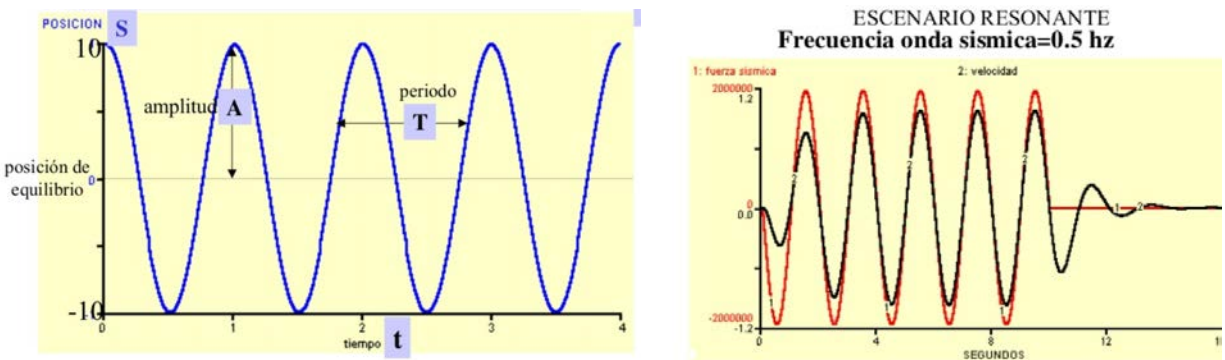


Figura 2.5 y 2.6. Muestra la propagación de las ondas y el fenómeno de resonancia. Retomado 2019 de Medin, 2014, 7 y 44

Este fenómeno debe de evitarse en la medida de lo posible ya que la resonancia puede causar que cada vez que coincidan los movimientos vaya aumentando el esfuerzo elástico de la estructura, así como aumentar su intensidad hasta que termine por hacerla colapsar (Creixell, op. cit., p.31).

Esta sincronización de acuerdo a Domínguez aumentará “*las deformaciones y aceleraciones de la edificación y en consecuencia los esfuerzos en sus elementos estructurales*” (2014, p. 1). Para evitar este fenómeno, se incorporan ciertas atenuantes.

En donde la atenuación no es otra cosa que la reducción de la aceleración máxima del terreno o la reducción de la deformación de la estructura. Siendo la deformación la capacidad de un objeto de cambiar su tamaño o su forma original cuando se le aplica una fuerza (Pavón, op. cit., p. 200).

Creixell señala los siguientes atenuantes (op. cit, p.32):

- Las grietas (mientras no comprometan la estabilidad del edificio) ayudarán a cambiar el comportamiento elástico de la estructura.

- En los elementos estructurales las deformaciones plásticas neutralizan los efectos activos de las deformaciones elásticas.

- Los elementos secundarios como los muros divisorios.

Cabe destacar que el no contar con ningún tipo de atenuante puede provocar el efecto de resonancia, en el cual se sincronizará el suelo y la estructura registrando varias veces un aumento en la aceleración del edificio. El número de veces que se incremente será denominado factor de amplificación, concepto que se abordará a continuación.

2.5 Amplificación y amortiguamiento

Como se dijo previamente, para evitar que la estructura entre en resonancia, se puede utilizar un factor de amplificación que aumente los esfuerzos calculados de la estructura.

Creixell establece que esto se logra al poner valores diferentes en el periodo de vibración del suelo (T_s) y el modo de vibración de la estructura (T_e), cuyas diferencias evitarán la resonancia (op. cit., pp.32-33).

Becerra concuerda al señalar que la “*amplitud de una respuesta dependerá de la relación entre T_s y T_e ya que mientras más cercana a la unidad sea esta relación mayor es la amplitud de respuesta*”, es decir, la diferencia entre ambos debe ser mínimo de una unidad (op. cit., p.30).

Aunado a la amplificación se encuentra el efecto de amortiguación el cual disminuye la intensidad de las fuerzas sísmicas y que, de acuerdo a Pavón, mejora la respuesta del edificio al reducir las oscilaciones en donde se le deberá considerar entre un 2 y 3 % de amortiguamiento crítico para una estructura. A su vez, comenta que la amortiguación depende de (op. cit., pp.190,191):

- El sistema estructural elegido
- El número de muros de carga
- El tipo de material que tendrá el edificio
- La cantidad de carga muerta, entre otros.

Además de ello, existen técnicas de control que ayudan a amortiguar el efecto del sismo tales como aisladores y disipadores, los cuales se verán con detalle en el capítulo 4.

2.6 Volteo en los edificios

Para entender cómo se causa el volteo de un edificio, hay que recordar que las fuerzas horizontales son empujes que provoca el sismo en el edificio con cierta tendencia a volcarlo.

Esta tendencia es debido a que en las columnas en las que se aplican las fuerzas horizontales causa tensiones mientras que en las del lado opuesto producirá compresiones dejando el centro como un eje neutro donde no existen esfuerzos (Becerra, op. cit., p.123).

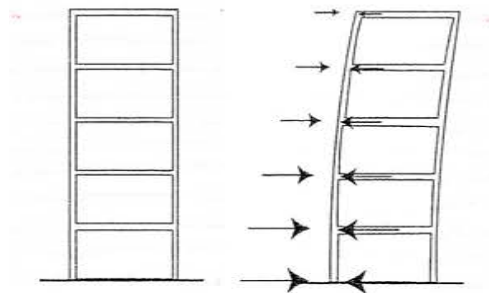


Figura 2.7 Las imagen izquierda es el edificio en estado de reposo y la del lado derecho es el edificio sometido a los empujes de que provoca el sismo. Fuente: Becerra, 2014, p. 25

Ante esto, Creixell señala que “las tensiones y compresiones son más fuertes cuanto más grande es el momento y cuanto más angosto es el edificio, en la dirección en la que se analiza” donde “para que haya equilibrio tendrá que haber a la vez un momento resistente igual y de signo contrario al del volteo” (op. cit., pp. 89-90)

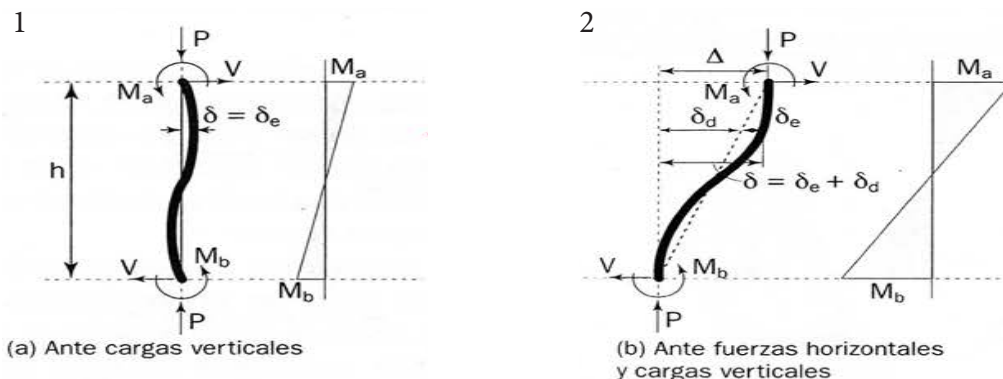


Figura 2.8 1 y 2 representan una columna sometida a diferentes momentos (M), compresión axial (P) y fuerza cortante (V), obteniéndose diferentes desplazamientos (A) y deformación horizontal (d) donde al fallar la base de las mismas puede rotar el elemento produciendo volteo

Fuente: Guevara, 2007, p. 107

Otro factor a considerar es la relación del edificio entre su altura, forma y peso ya que los edificios anchos y bajos tendrán menor tendencia al volteo, contrario a los que sean más altos, delgados y pesados (Becerra, op. cit., p. 124).

A su vez, los modos de vibración también influyen, principalmente el modo fundamental ya que en este caso las fuerzas actuarán en todos los pisos en una misma dirección desplazando considerablemente la parte superior de la base, en donde los modos subsecuentes de vibrar tendrán pocas posibilidades de causar el volteo ya que al moverse en diferentes direcciones contrarrestarán sus fuerzas. No obstante, si en el modo fundamental las fuerzas se ubican fuera del tercio superior y se produce resonancia, podría ocasionar el volteo del edificio (Becerra, op. cit., pp. 124-126)

Creixell señala que una manera de contrarrestar el volteo es empotrar adecuadamente el edificio al terreno para que se creen momentos que se opongan al volteo (op. cit., p.90).

De allí que la cimentación escogida sea elemental para evitar este fenómeno, por ello, su desplante deberá contar con la profundidad requerida para evitar el volteo y también el terreno deberá tener una adecuada resistencia. Esto último puede lograrse a través de un adecuado estudio de mecánica de suelos (Becerra, op. cit., pp.127-133).

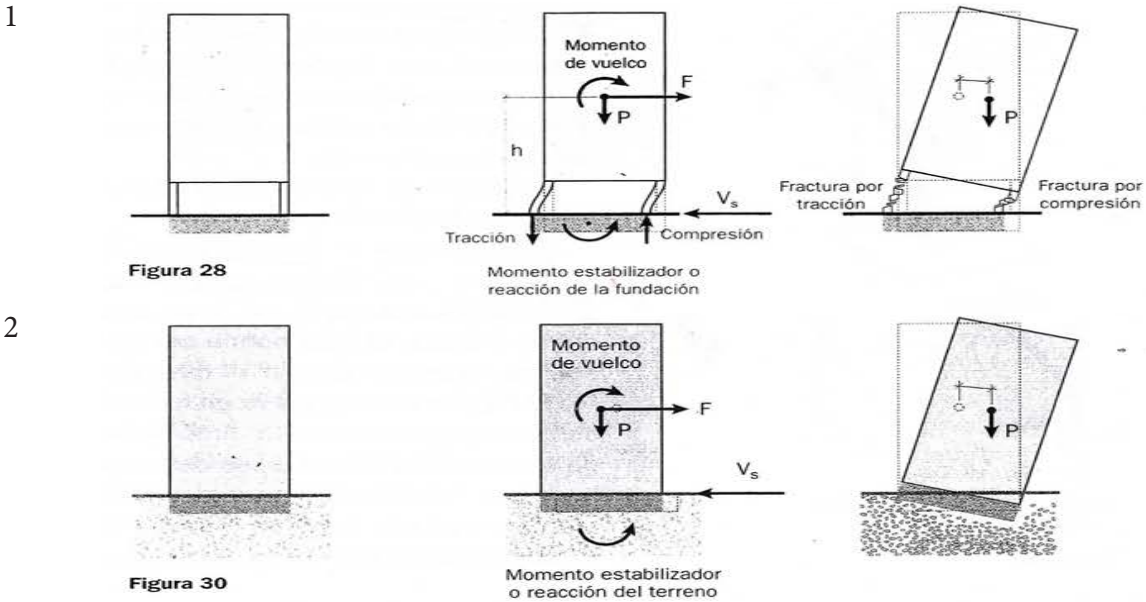


Figura 2.9 El 1 muestra el efecto de volteo originado por deformaciones de las columnas del primer piso mientras que el 2 muestra fallas debido al empotramiento de la cimentación al edificio
Fuente: Guevara, 2007, p. 108

Por lo anterior, se puede deducir que los edificios que son muy altos y tienen una base pequeña estarán más susceptibles al volteo a menos que esté tenga un empotramiento adecuado al terreno. Por ello, los criterios de diseño para proponer una geometría adecuada se verá en este capítulo más adelante.

2.7 Esfuerzos de torsión

Otros de los efectos que se pueden producir en el edificio cuando se desarrolla un sismo son los esfuerzos de torsión que se generan cuando este rota en el plano horizontal y, debido a las fuerzas de inercia, hace que la estructura gire sobre su eje vertical el cual corresponde al centro de gravedad determinado por las rigideces de los elementos verticales (muros y columnas) (Creixell, op. cit., p.161).

De manera practica, este fenomeno causará que cuando el terreno gire la losa inferior del edificio de un nivel girará con él produciendo desplazamientos y rotación en la parte inferior de las columnas, donde como la losa superior se mantendrá en su ubicación original hará que a partir de su eje gire con ella la parte superior de las columnas, pero en el sentido contrario al de la losa inferior, produciendo un momento torsional (Guevara, op. cit., p.111).

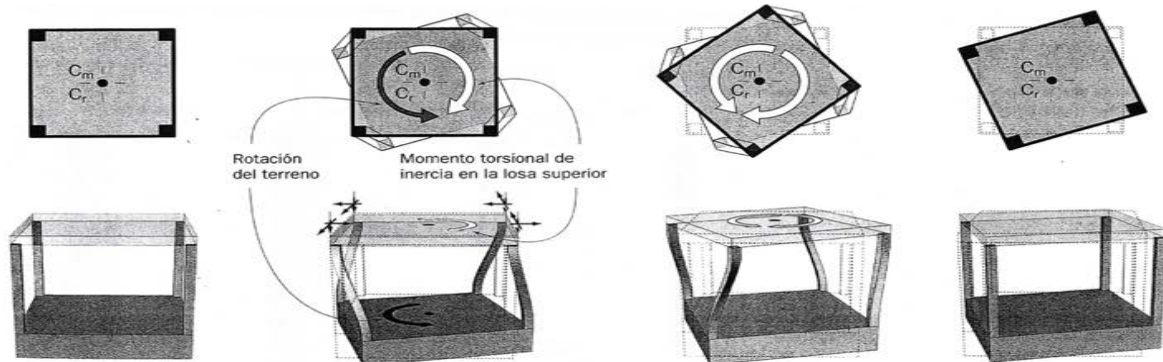


Figura 2.10 Efectos que puede producir la rotación del terreno en un edificio.

Fuente: Guevara, 2007, p. 111

Es así que la torsión se producirá cuando los empujes del sismo no coincidan con los elementos resistentes, cuando no haya una uniforme distribución de las cargas (al estar orientadas solo en una parte) y cuando las rigideces en los elementos verticales tales como muros y columnas sean diferentes (Creixell, op. cit., pp.101-102).

Un ejemplo de esta situación es cuando se tiene un inmueble en esquina con columnas en las dos fachadas y muros en las colindancias, ya que al ser diferentes elementos sus rigideces no coincidirán con el centro de gravedad por lo cual generarán momentos torsionantes que podrían causar que dentro de un mismo piso sus modos de vibración difieran.

De allí que las NTCDS-2020 señalen que las resistencias de los elementos verticales, como muros y columnas, deben ser de valores proporcionales así como del mismo tipo para evitar la diferencia de rigideces ya que si en un lado se ponen columnas y en el otro muros, ambos presentaran diferentes resistencias que no los hará trabajar como una unidad al presentarse las fuerzas cortantes.

Para calcular el momento de torsión, las NTCDS-2020 consideran la excentricidad torsional (e_s) como la distancia entre el centro de torsión de un nivel y la línea donde actúa la fuerza lateral. En donde para el momento torsionante de cada piso debe considerarse por lo menos una fuerza igual a la lateral multiplicada por la excentricidad que resulte más desfavorable para los elementos verticales de las siguientes ecuaciones:

$$1.5 e_s + e_a$$

$$e_s - e_a$$

Donde e_a es la excentricidad accidental y e_{ai} la que corresponde al i -ésimo nivel. Que se calculará con:

$$[0.05 + 0.05 (i-1) / (n-1)] b_i$$

Donde b_i es la dimensión del i -ésimo nivel en la dirección de análisis que tenga un mayor efecto y n el numero de pisos del sistema estructural. Considerando que si las fuerzas se aplican en 2 direcciones ortogonales, la excentricidad accidental solo deberá ser aplicada en la dirección en la que el sismo producirá mayor efecto.

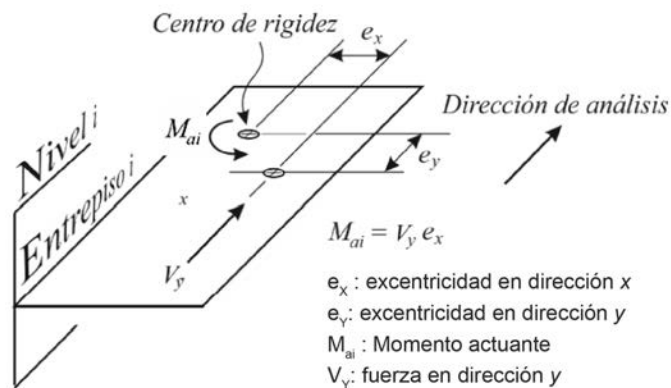


Figura 2.11 Muestra los elementos para calcular el momento de torsión de un nivel.

Fuente adaptada de las NTCDS-2020, p.23.

Aunado a lo anterior, las NTCDS-2020 establecen que la torsión sísmica se forma de dos partes: la propia del modelo que sería la natural y una accidental. En el caso de la primera, se obtiene del producto de una fuerza cortante (V) por una excentricidad natural o torsional (e_s), mientras que la segunda resulta de la misma fuerza cortante por una excentricidad accidental (e_a). En ambos casos. lo ideal es calcularlo por un modelo de análisis tridimensional.

2.8 Propiedades que deben poseer las estructuras sismorresistentes

Como se vio previamente, cuando se presenta un sismo éste provoca diferentes esfuerzos en el edificio por lo que es de suma importancia que la estructura este dotada de ciertas características que logren hacerles frente a estos fenómenos para preservar su integridad salvaguardando a los usuarios.

Para esto, Becerra señala que además de que los elementos estructurales deben de ser rígidos tiene que procurarse que ante un evento extremo el edificio desarrolle un comportamiento inelástico, es decir, que deje de ser elástico para convertirse en plástico, lo que hará que sus deformaciones se vuelvan permanentes pero que no causen el colapso del mismo (op. cit., p. 23).

Aunado a la rigidez, Pavón comenta que las propiedades que harán que el edificio resista las fuerzas sísmicas son la resistencia y ductilidad (op. cit., pp. 190,191).

A su vez, Meli coincide al establecer que las propiedades de resistencia, rigidez y ductilidad rigen un buen comportamiento en el edificio ante fuerzas laterales, sin embargo, señala que no es fácil el cumplimiento de las tres al mismo tiempo pues en el caso de las características que hacen muy rígida y resistente a una estructura, suelen hacerla también poco dúctil (2011, p. 441).

Para comprender mejor estas propiedades, se verán con más detalle a continuación.

2.8.1 Resistencia

Para lograr la resistencia de una estructura, ésta deberá estar basada en sus propiedades geométricas y en las características mecánicas de los materiales que la componen, de manera que estos ayuden a determinar la fuerza interna que se producirá ante la pérdida de funcionalidad de la misma, es decir, ante su estado limite (Meli, op. cit. p.88).

Siendo así que la resistencia del edificio estará directamente relacionada con los elementos estructurales, su tamaño, capacidad, materiales y tipos de conexiones entre ellos.

Con respecto a los valores de resistencia, las NTCDS-2020 señalan que *“para el diseño de todo muro, columna, contraviento u otro tipo de elemento que contribuya con más del 35% de la resistencia total en términos de fuerza cortante, momento torsionante o momento de volteo de un entrepiso dado se incrementarán las fuerzas sísmicas de diseño en 25% en relación con lo que le corresponderían al análisis estructural normal”*.

De allí que la mayor incertidumbre para un cálculo adecuado sean los valores relacionados con el control de calidad del material, el proceso de construcción o la capacidad de resistencia del material, que en el caso del concreto será su resistencia a la compresión y a la tensión (Meli, op. cit. p.89).

2.8.2 Rigidez

En cuanto a la rigidez ésta es la capacidad que tienen los elementos estructurales de soportar los esfuerzos sin deformarse.

En el edificio este se llama rigidez lateral o de entrepiso ya que *“representa la oposición de la estructura a ser deformada de un nivel a otro por las cargas horizontales aplicadas a cada nivel”* (Becerra, op. cit., pp. 111 y 25).

Por su lado, Pavón señala que mientras *“mayor sea la rigidez de una estructura menores serán sus deformaciones laterales mientras que entre mas flexible sea esta, menor será su rigidez y mayor la deformación”*. Por ello, aunque se sugiere que el efecto de las fuerzas sísmicas es menor en una estructura relativamente flexible, en una estructura que sea sumamente flexible las deflexiones laterales serán mayores lo que podría ocasionar golpeteo entre edificios (op. cit., p.188).

Cabe mencionar que una estructura rígida se considera que es indeformable por su falta de capacidad en disipar las fuerzas, sin embargo,

esto mismo puede provocar esfuerzos excesivos que conllevaran a la rotura de las uniones mientras que en el caso de las estructuras flexibles (no rígidas) ante la aplicación de grandes esfuerzos éstas pierden su forma al quedar evidentemente deformadas.

De lo anterior, se puede inferir que si bien es necesario que una estructura sea rígida también debe ser ligeramente flexible para evitar la rotura entre las uniones de los elementos estructurales.

2.8.3 Ductilidad

Como se dijo previamente, la ductilidad es una característica que varios autores citan como una propiedad necesaria para estructuras ubicadas en regiones sísmicas. Sin embargo, para esto primero debe definirse el concepto.

Se dice que *“un material dúctil es aquel que puede estirarse, formarse o encogerse a un grado significativo antes de fracturarse”* en la cual su deformación depende *“de su rigidez”* (Mott, 1996, p.53).

Esto debido a que la *“presencia o la ausencia de la ductilidad tiene un marcado efecto sobre la capacidad ultima de soportar la carga de un miembro”* (Fitzgerald, 1996, p. 437).

De ahí que Hibbeler establece que cualquier material que pueda someterse a grandes deformaciones antes de fracturarse es dúctil y que su utilización se basa en que *“estos tipos de materiales son capaces de absorber los impactos o la energía, y si estos se sobrecargan, por lo general presentan grandes deformaciones antes de fallar”*. Sin embargo, también señala que en *“la mayoría de los metales la cedencia constante no se producirá más allá del rango elástico”* (2017, p. 91).

Retomando lo anterior, esto quiere decir que, aunque cualquier material puede ser dúctil, es una propiedad propia de los metales ya que éstos pueden tener varias deformaciones sin fracturarse como es el caso del acero estructural.

Por el contrario, si el material no es dúctil se dice que es frágil ya que este

“es aquel que se fractura de súbito al someterse a carga con poca o ninguna deformación plástica” (Mott, op. cit, p.53).

Este último caso puede observarse en el concreto simple que, aunque es fuerte en compresión, es débil a la tensión. Por ello cuando experimenta un impacto, se fracturará. No obstante, si a este mismo concreto se le añade el acero de refuerzo, mejorará sus propiedades y soportará varias deformaciones antes de fracturarse.

Esto último es importante pues la ductilidad hace referencia a la capacidad de la estructura de modificar su forma excediendo sus límites de elasticidad, pero sin llegar a romperse o sufrir una deformación permanente (Becerra, op. cit., p.120).

Es por ello que ante fuerzas sísmicas es vital que los materiales de construcción sean dúctiles al soportar ciclos de carga y descarga y que, aunque sufra fracturas en algunas zonas, permita que la estructura se deforme, pero evite el colapso de la misma para permitir la evacuación del edificio (Pavón, op. cit, p.189).

También, cabe aclarar que cada material y sistema estructural, así como su tipo de conexiones presentará diferentes tipos de respuesta ante un sismo lo que generará diferentes tipos de deformación. Es por ello que las NTCDS-2020 señalan especificaciones para estructuras de concreto, acero, y mampostería, dentro de las cuales también considera su factor de comportamiento sísmico (Q) y su distorsión límite (y_{max}). Estas tablas pueden encontrarse en las páginas 42 a 53 de las normas.

Finalmente, como se dijo previamente, si la construcción fuera totalmente rígida, ésta al no tener la capacidad de deformarse sería poco dúctil lo que ante un evento de gran magnitud causaría daños en los elementos estructurales lo que podría disminuir la evacuación oportuna del mismo. Por ello, es importante considerar en la estructura una mayor resistencia que rigidez y un porcentaje de ductilidad para evitar el colapso de la misma.

2.9 Métodos de análisis sísmico

Existen dos maneras principales de englobar los conceptos anteriores en cálculos que logren predecir el comportamiento sísmico de una estructura, estos son el método dinámico y el estático. De acuerdo a las NTCDS-2020 (pp. 65-76) las especificaciones de cada análisis son las siguientes:

- Método dinámico: Se utiliza para el diseño de edificios mayores a 30 metros, de péndulos invertidos, diafragmas, muy irregulares o que pertenezcan al grupo A [ver tabla 2.1 del presente documento]. Esté a su vez se divide en:
 - Análisis modal: Puede usarse para el diseño de cualquier sistema estructural ya que estima la contribución de cada modo de vibrar, relacionando las propiedades del sistema estructural con su respuesta y demandas sísmicas.
 - Análisis no lineal paso a paso: Ofrece mejores aproximaciones a la respuesta de sistemas estructurales cuyos elementos desarrollan comportamiento no lineal estable. Retoma las 2 direcciones principales del movimiento de parejas de acelerogramas registrados durante temblores reales, de movimientos simulados, o de combinaciones de éstos.

En ambos casos, su uso requiere de un modelo tridimensional detallado que considere la participación de todos los elementos constructivos que puedan influir en su respuesta.

- Método estático: Se puede utilizar en estructuras de altura no mayor a 30 metros o irregulares de no más de 20 metros. Si se ubican en la zona I, los límites se amplían a 40 m y 30 m, respectivamente. No se podrá utilizar en estructuras del grupo A, muy irregulares, aquellas que no cumplan las condiciones de diafragma rígido y de planta simétrica (vistas en el subtema 2.10).

De manera general, cada análisis responde a diferentes características, las cuales se encuentran en detalle en las páginas 65-76 de las NTCDS-2020.

2.10 Evolución de la normativa sísmica en la Ciudad de México

Como se ha visto previamente, tanto a nivel mundial como nacional, los efectos que causan los movimientos telúricos en las edificaciones forman parte de una serie de lecciones aprendidas que contribuyen a mejorar los procesos de diseño, cálculo y construcción que, a través de reglamentos y normas, buscan disminuir en lo posible la creación de las mismas afectaciones en el futuro.

Un ejemplo de ello es el reglamento de construcción de la Ciudad de México que ha presentado varias modificaciones desde su creación debido a los efectos sísmicos que ha experimentado y que, de manera breve, se verán a continuación.

Inicialmente, el primer reglamento de construcción de la Ciudad de México se publicó en 1921, lo conformaban 37 hojas y no tenía ni un apartado de seguridad estructural ni de diseño sísmico. De hecho, apenas tenía dos artículos muy generales de cimentaciones.

Esté duró 21 años hasta que en 1942 se actualizó, apareciendo por primera vez un capítulo referente al diseño por sismo con 11 artículos que establecía que el cálculo para sismo no era obligatorio para todas las construcciones a menos que tuvieran más de dieciséis metros de altura, fueran lugares de reunión o su altura fuera el doble a la dimensión de su planta.

También, señalaba coeficientes sísmicos de 0.05 para lugares de reunión y 0.25 para construcciones de vivienda, oficinas, hospedaje e industriales. Además, se amplió la regulación para el concreto reforzado, de los elementos y tipos estructurales, y se hizo un capítulo entero de los diferentes tipos de cimientos y sus especificaciones.

En 1966 se realizó un reajuste debido a la detección de los efectos que produjo el sismo de 1957, ya que hasta ese momento se detectó que la Ciudad de México tenía diferentes tipos de suelo, los cuales clasificaron en zona de alta

compresibilidad (suelo de lago y transición actuales) con coeficientes de 0.06 a 0.15 y baja compresibilidad (suelo de loma) con coeficientes de 0.04 a 0.10.

Además, se instituyó que la separación entre edificios para evitar el golpeteo no debía ser menor a 5 cm y se establece utilizar análisis estático, dinámico y simplificado para cálculo sísmico. En el caso del simplificado, este permitía omitir los desplazamientos horizontales, las torsiones y momentos de volteo mientras las fuerzas cortantes totales no excedieran la suma de la resistencia de los muros.

Esto estuvo vigente hasta la actualización de 1976 en donde la zonificación pasó a dividirse en zona I (terreno firme), zona II (de transición) y zona III (compresible) con coeficientes sísmicos de 0.16, 0.20 y 0.24, respectivamente. En él, se incluyó por primera vez el factor de reducción por ductilidad, el espectro de diseño sísmico y el mejoramiento de los métodos de análisis.

Sin embargo, el sismo de 1985 trajo consigo situaciones estructurales y constructivas que no habían sido consideradas hasta el momento, por lo que en 1987 se realizó la mayor mejora al crear una serie de Normas Técnicas Complementarias (NTC en adelante) que, como su nombre lo dice, buscaban complementar las deficiencias de los reglamentos anteriores.

Estas normas fueron las siguientes:

- NTC para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería
- NTC para Diseño por Sismo
- NTC para Diseño por Viento
- NTC para Diseño y Construcción de Cimentaciones
- NTC para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto
- NTC para Diseño y Construcción de Estructuras de Madera
- NTC para Diseño y Construcción de Estructuras Metálicas
- NTC para Previsiones Contra Incendio

En cuanto a las NTC para Diseño por Sismo, se actualizaron todos los conceptos que estaban en el reglamento anterior y se cambió el coeficiente sísmico pasando a 0.4 y 0.6 para la zona III. Se creó un factor de reducción de fuerzas sísmicas y de comportamiento sísmico; y se estableció que todas las construcciones debían de analizarse ya sea de manera simplificada, estática o dinámica.

Además, se creó un capítulo referente a la regularidad de la planta y un anexo que hacía referencia a la interacción suelo-estructura que influye de manera muy importante en el comportamiento sísmico, sobre todo en los ubicados sobre suelo blando.

Posteriormente, se realizó una actualización del reglamento en 1993 en donde los edificios de vivienda, oficina y hoteles debían tomar un coeficiente de 0.16 en la zona I, 0.32 en la II y 0.40 en la III mientras que en escuelas y hospitales su coeficiente debía de ser 0.24, 0.48 y 0.60 en la zona I, II y II, respectivamente.

Además, se señalaba que los muros divisorios no debían contribuir a resistir las fuerzas y tenían que ser de materiales flexibles.

El reglamento, así como las normas, se mantuvieron sin cambios hasta el 2004, cuando se quitó la NTC para Previsiones Contra Incendio (NTC-PCI en adelante), se actualizaron las 7 NTC restantes y se crearon las 3 siguientes:

- NTC sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones
- NTC para el Proyecto Arquitectónico
- NTC para el Diseño Y Ejecución de Obras e Instalaciones Hidráulicas

En las NTC para el Proyecto Arquitectónico, se agregó lo que eran las NTC-PCI y se establecieron normas que contribuían a la habitabilidad de un edificio como: espacios mínimos de áreas, instalaciones, iluminación, ventilación, entre otros.

Sin embargo, cabe aclarar que desde su creación no cuenta con un apartado referente a la influencia de la regularidad de la forma en el desempeño sísmico y que solo ha sido modificada dos veces: una en el 2011 y la otra en el 2017 al modificar la capacidad de los cajones por m^2 de construcción.

En cuanto a las NTCDS, las reglas que se venían manejando se renovaron, se ampliaron los criterios de regularidad e irregularidad de la estructura y se agregaron los conceptos de desplazamientos laterales y vibraciones.

Además, la zona III se subdividió en cuatro, en donde a cada área le correspondía un coeficiente sísmico diferente, ya que las edificaciones destinadas a vivienda en la zona I tenían 0.16, 0.32 en la II, 0.4 en las zonas IIIa y IIIc, 0.45 en IIIb y 0.30 en IIIId, mientras que para las construcciones cuyo uso es esencial ante una contingencia, el coeficiente tenía que incrementarse un 50% a los valores establecidos para vivienda.

Después, tras el sismo del 2017, se actualizó el reglamento de construcción así como de las 10 NTC existentes además de la creación de 2 normas más las cuales son:

- Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones
- Normas para la Rehabilitación Sísmica de Edificios de Concreto dañados por el sismo del 19 de septiembre de 2017.

Estas dos normas son sumamente importantes y relevantes ya que abordan cosas que no habían sido consideradas anteriormente como el desgaste del edificio, el daño acumulado y el ser construido con aspectos técnicos menores a los que se manejan en la actualidad.

En cuanto a las NTCDS se actualizaron los conceptos existentes, se quitó el método simplificado de análisis y se agregó: el cortante basal mínimo, las acciones sísmicas de diseño, las aceleraciones de piso, las fuerzas de diseño

para diafragmas, la respuesta de elementos no estructurales e incluso las cargas sísmicas durante la construcción del edificio.

A su vez, se mejoraron las condiciones de regularidad e irregularidad, la zonificación de la Ciudad de México quedó establecida en Zona I, II y III sin subzonas.

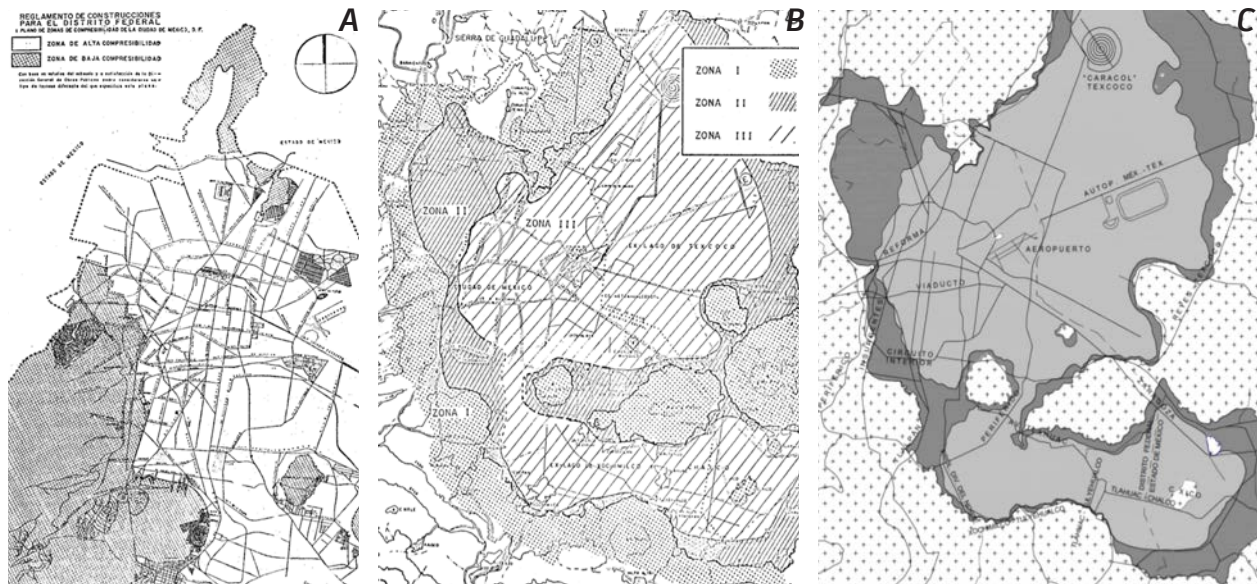


Figura 2.12 Zonificación a través del tiempo en el reglamento de la Ciudad de México. Recuperado del reglamento de 1966 y las NTC de 1987 y 2017.

Aunado a eso, se introdujo por primera vez que los espectros, el coeficiente, las acciones de diseño y los límites de seguridad se obtuvieran del Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño (SASID) con el fin de considerar los valores de la ubicación del predio para hacer más eficaz el cálculo.

Posteriormente, en el 2020 se volvieron a actualizar las NTCDS donde de 45 páginas pasó a 100 ya que se agregaron comentarios en cada uno de los conceptos de la norma para ampliar y/o detallar la información, así como para anexar diagramas de apoyo.

En cuanto a las condiciones de regularidad y planta baja débil, por primera vez se ilustran estas nociones en las normas con esquemas para clarificar la información (las cuales fueron incluidas en el capítulo 3 del presente documento).

Además, se agrega y establece que en todas las estructuras se deben de cumplir dos estados límites: el de prevención de colapso y el de limitación de daños; los cuales se especifican a continuación:

- Estado límite de prevención de colapso: Tiene como finalidad evitar que la distorsión de algún entrepiso exceda su deformación lateral, impidiendo con ello el colapso del mismo o de todo el edificio. En este interviene la ductilidad tanto del sistema estructural como del material elegido.
- Estado límite de desplazamiento lateral o limitación de daño: Se refiere a verificar que ningún entrepiso rebase la distorsión que podría provocar daño a elementos no estructurales o a la estructura.

Otro cambio es que, aunque de manera general se mantuvo la clasificación de las estructuras marcadas en las NTCDS-2017, se añadió que en los inmuebles de ambos grupos si un edificio no cuenta con medios propios de desalojo, se le deberá adicionar un cuerpo para desalojar. También, se detallaron más las especificaciones de cada grupo, quedando de la siguiente manera:

Tabla 2.1 Clasificación simplificada de las estructuras

Grupo A	Edificaciones cuya falla podría generar efectos graves como gran numero de vidas humanas, peligro para la población o esenciales ante una emergencia
Grupo A1	Edificaciones para las que se requiere tener mayores niveles de seguridad ya que su operación es necesaria para la población ante un sismo como: hospitales, aeropuertos, estaciones de transporte, subestaciones eléctricas y nucleares, estructuras para la transmisión y distribución de electricidad, centrales telefónicas, de radio y televisión, estaciones de bomberos, sistemas de agua potable, puentes vehiculares, pasarelas peatonales. Además de construcciones cuya falla puede implicar un severo peligro para la población por contener productos tóxicos, inflamables o explosivos.
Grupo A2	Edificaciones cuya falla podría causar un elevado número de decesos como: construcciones que alberguen más de 1000 personas; que afecten a una población muy vulnerable como escuelas de niveles preescolar, primaria o secundaria; o construcciones que contengan artículos de gran valor histórico, legal o cultural.
Grupo B	Edificaciones comunes destinadas a viviendas, oficinas, hoteles y construcciones comerciales e industriales.
Grupo B1	Edificaciones de más de 30 m de altura o con más de 6,000 m ² de área total construida, ubicadas en las zonas I y II; y construcciones de más de 15 m de altura o más de 3,000 m ² de área total construida, en la zona III. Además de inmuebles anexos a hospitales, aeropuertos o terminales de transporte, como estacionamientos, restaurantes, así como edificios destinados a educación media superior y superior.
Grupo B2	Edificaciones con una altura de entre 15 y 30 m o con un área total construida entre 3,000 y 6,000 m ² ; construcciones con una altura de entre 10 m y 15 m o con un área total construida entre 1,500 y 3,000 m ² , en la zona III.

Fuente: Fuente: Reglamento de construcciones para el Distrito Federal, artículo 139, pp. 83- 86

Asimismo, se modificaron las regulaciones para usar el método estático, limitándolo a estructuras de baja altura (menores a 30 metros) y prohibiendo su uso en estructuras del grupo A (que antes eran calculados con este método) o que sean muy irregulares. Esto con el fin de promover el uso del análisis dinámico en cualquiera de sus tipos, ya que este método ofrece una mejor representación sísmica.

Aparte de lo anterior, en esta edición se hace hincapié en implementar sistemas estructurales innovadores, requisitos más conservadores o sistemas de control sísmico siempre y cuando lo haya aprobado la Administración y se agrega que deberá cumplir las disposiciones de las Normas Técnicas Complementarias para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NCRSEE). Aunado a ello, se hace obligatorio el uso de espectros de sitio a través del SASID.

En cuanto a las actualizaciones del reglamento del 2021, señala que para las construcciones del grupo A y B1 que experimenten un sismo superior a los 90 cm/s² de aceleración del terreno, deberán entregar una Constancia de Seguridad Estructural que establezca que cumple los estados límite de falla y de servicio, ya que en caso contrario deberá de reforzarse, repararse, re-cimentarse o modificarse para cumplirlos.

Además, ahora los propietarios de edificaciones dañadas por un sismo deberán tramitar un Dictamen Técnico de Estabilidad y de Seguridad Estructural conforme a las NCRSEE, ya que, si los deterioros afectan la estabilidad, deberán rehabilitarse para satisfacer los estados límite de falla y servicio.


Otra disposición anexada es el fortalecer la revisión de la seguridad estructural de planteles educativos, a través de una revisión de seguridad cuando una escuela, de cualquier nivel, registre daños tras experimentar aceleraciones de 30 a 60 cm/s², 61 a 90 cm/s² o mayores a 90 cm/s². En caso de que muestre deterioro, al igual que los casos anteriores, será necesario rehabilitar para alcanzar los estados límites.

Por último, otra de las actualizaciones que establece tanto las NTCDS-2020 como el reglamento de construcciones del 2021, es que el propietario del inmueble deberá de estar al tanto de la seguridad estructural del edificio y que deberá formar parte responsable del mismo.

En suma, de lo presentado anteriormente, se puede ver que el conocer, aunque sea de manera general los cambios en el reglamento de construcción, es importante ya que cuando un edificio resulta dañado por un sismo, es necesario siempre remontarse a la fecha de construcción del mismo para saber que reglamento estaba vigente en ese momento y que deficiencias presentaba.

Entender eso es vital ya que, por ejemplo, antes del sismo de 1957 no se tenía regulado el tipo de suelo que existía en la Ciudad de México, el calculo por sismo no era obligatorio y la información referente a las cimentaciones eran muy generales. De allí que, si se cuenta con esa información, es posible inferir que cualquier edificio construido hasta 1957, que no haya sido reforzado desde esa fecha, es probable que sufra fallas en su estructura, como se vio en los 5 edificios que colapsaron en el 2017 (ver tabla 1-5).

Finalmente, esto demuestra que es necesario conocer el reglamento y las NTC anteriores y actuales tanto para edificar como para hacer propuestas de refuerzo a construcciones antiguas. Además de entender que estos documentos están en constante actualización y que aún se pueden hacer recomendaciones por situaciones que quizá no han sido incorporadas o consideradas todavía.



CAPITULO 3
**Criteria de regularidad
forma que influyen en el
comportamiento sísmico**

3 Criterios de regularidad y forma que influyen en el comportamiento sísmico

En el presente capítulo se mostrarán los criterios de regularidad que establecen las NTCDS y que hacen referencia a aspectos de la forma del proyecto como lo son: simetría en planta, relación del ancho-largo, relación altura-base, entradas, salientes, aberturas, huecos, dimensión de entresijos, altura de columnas, entre otros; los cuales son elementales para lograr un buen desempeño estructural.

Simultáneamente, se abordarán los efectos de no considerarlos en el proyecto ya que creará estructuras irregulares que dependiendo del nivel de irregularidad afectará a la edificación llegando a causar el colapso de la misma.

Posteriormente, se analizarán las formas que han impuesto las principales tendencias arquitectónicas y su incidencia en el comportamiento sísmico para ayudar a ilustrar el importantísimo papel que juega la geometría dentro de él.

De manera que el presente apartado tiene como propósito demostrar la relevancia de considerar las NTCDS al momento de elaborar un proyecto arquitectónico para que desde un enfoque multidisciplinario se pueda maximizar el diseño, así como la seguridad de la edificación.

3.1 Criterios de regularidad estructural que mejoran el comportamiento sísmico

Como se vio en el inciso 1.3.1.4 del capítulo uno, varios de los daños encontrados en las edificaciones tras los eventos sísmicos de 1957, 1985 y 2017 presentan ciertas similitudes, las cuales, generalmente, recaen en aspectos que tienen que ver con la forma de la estructura.

De hecho, fue en 1987, tras el terremoto de 1985, que aparece por primera vez un apartado sobre la regularidad de la forma y ahora es parte de los requisitos establecidos por las NTCDS, donde establecen que para un buen desempeño sísmico la estructura debe ser simétrica, sin interrupciones en planta y en alzado. Aunado a un sistema estructural detallado que evite la creación de deformaciones y resista las fuerzas a las que estará sometida.

De manera que para comprender los criterios que hacen que una estructura sea regular o no, a continuación, se abordarán los requisitos que establecen las NTCDS-2020 junto con una breve descripción de los efectos que causa el no considerarlos.

3.1.1 Simetría en planta

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 15 grados (NTCDS-2020, p.54).

Esto quiere decir que todos los elementos verticales dispuestos en planta deberán de formar ángulos rectos con los ejes principales o tener una variación máxima de 15°. Esto con la finalidad de que le den resistencia y rigidez a la estructura ante las cargas laterales.

Por el contrario, la asimetría de estos elementos en planta ayudará a crearse efectos de torsión, así como incertidumbres en la respuesta estructural de la edificación ante sismos intensos (NTCDS-2020, p.54).

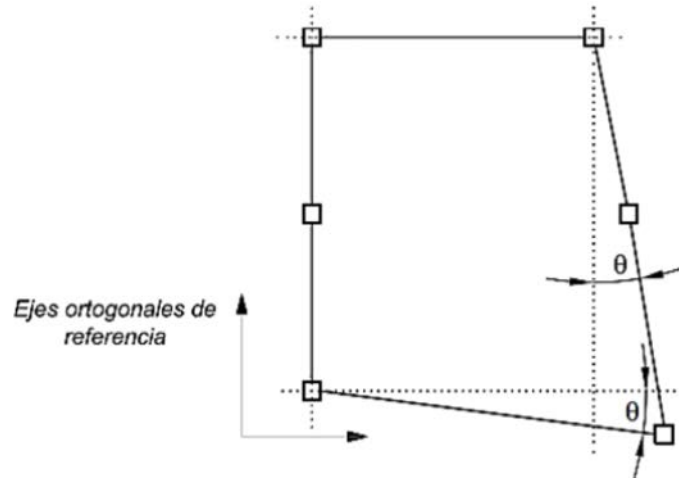


Figura 3.1 Diagrama que muestra la asimetría en planta. Recuperado de las NTCDS-2020, p. 54

3.1.2 Relación altura - base

“La relación de su altura a la dimensión menor de su base no es mayor que 4” (NTCDS-2020, p.54).

Esto porque demasiada esbeltez puede incrementar los momentos de volteo, así como una excesiva transmisión de cargas a la cimentación y al subsuelo. También porque las reducciones bruscas suelen ir con un cambio de rigidez y tiende a crear “chicoteo”. Es decir, amplificación de la vibración (Bazán y Meli, op. cit., p.180).

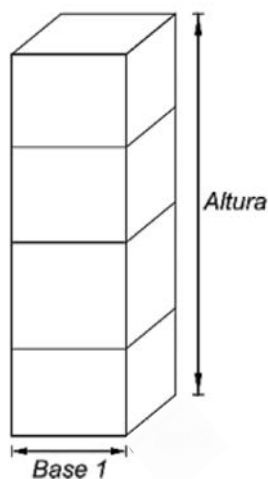


Figura 3.2 Esquema que ilustra la esbeltez de un edificio. Recuperado de las NTCDS-2020, p. 55

3.1.3 Relación largo - ancho

“La relación de largo a ancho de la base no es mayor que 4” (NTCDS-2020, p.55).

Esto porque en las bases de las plantas muy alargadas, los movimientos de un extremo al otro actuarán de formas distintas al recibir diferentes esfuerzos, lo que hará que la planta vibre y oscile de diferentes maneras al no ser uniforme. A su vez, al pasar esto se concentrarán los esfuerzos en el centro u otras zonas lo que podría ocasionar modos de falla o la ruptura del edificio (Bazán y Meli, op. cit., pp.178-179).

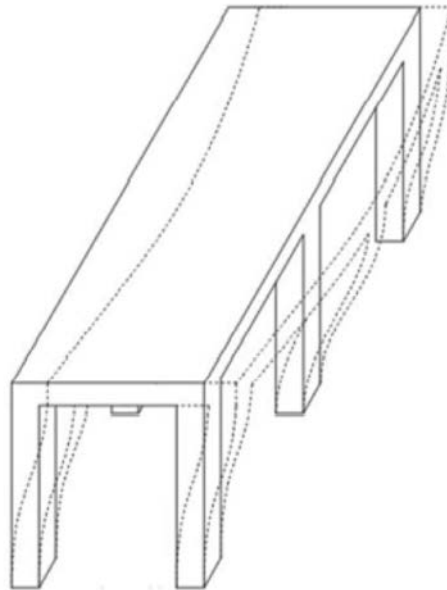


Figura 3.3 Efectos producidos en un edificio alargado. Recuperado de las NTCDS-2020, p. 55

3.1.4 Entrantes y salientes

“En planta no tiene entrantes ni salientes de dimensiones mayores al 20% de la dimensión de la planta medida paralelamente a la dirección en que se considera el entrante o saliente” (NTCDS-2020, p.56).

Esto porque las entrantes y salientes provocan concentración de esfuerzos en las esquinas de estas zonas, lo que generará incertidumbre, modos de falla en sitios donde el análisis no lo previó, efectos de torsión e invalidará la hipótesis del diafragma rígido (NTCDS-2020, p.56).

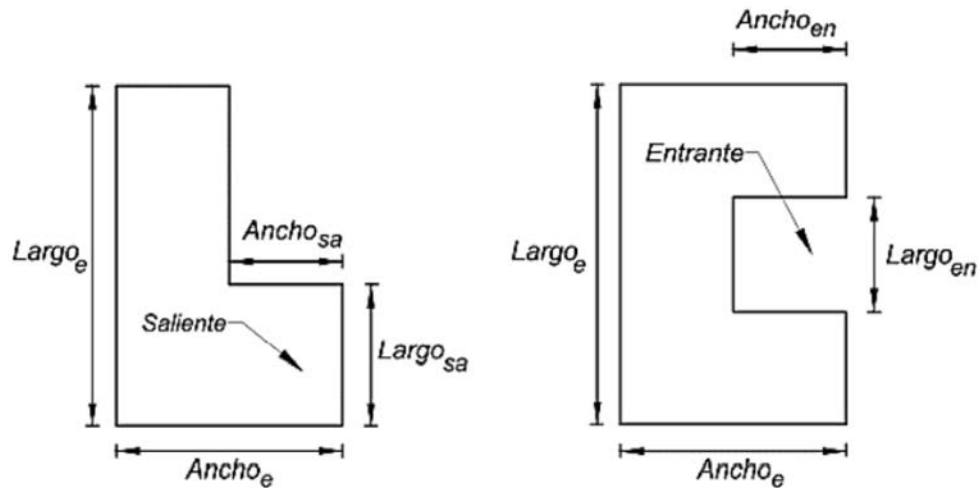


Figura 3.4 Ejemplos de entrantes y salientes. Recuperado de las NTCDS-2020, p. 56

3.1.5 Diafragma rígido

“Cada nivel tiene un sistema de piso cuya rigidez y resistencia en su plano satisfacen lo especificado para un diafragma rígido” (NTCDS-2020, p.56).

Para comprender este concepto, es importante resaltar que un diafragma rígido es un elemento que tiene poca dimensión en una dirección y mucha en la otra, teniendo tal rigidez que no se deformará fácilmente. Un ejemplo de esto son las losas, que deberán tener suficiente peralte para proveerla de resistencia. De manera que las NTCDS-2020 establecen que para que para que estos miembros sean considerados así deberán contar con las siguientes especificaciones (p. 27):

- Una “deformación máxima del diafragma menor que el 50 por ciento del promedio de las deformaciones laterales de los planos estructurales ubicados en el entrepiso” inmediato inferior

- Sistemas de losas de concreto “sobre tableros de acero que en planta exhiban una relación de largo a ancho menor o igual a 4”

- No tengan entradas ni salientes mayores al 20° o no tengan aberturas que excedan el 20° de su área en planta ni difieran en posición

Lo anterior debido a que él no contar con estas características podría crear diafragmas con falta de rigidez y resistencia, así como modificaciones en las fuerzas reales que actuarían sobre los elementos verticales y que por lo tanto no habrían sido considerados en el análisis (NTCDS-2020, p.56).

3.1.6 Aberturas y Huecos

Las NTCDS-2020 establecen que la losa no deberá tener aberturas que excedan un 20% de su área en planta y las áreas huecas deberán estar en la misma posición de un nivel a otro, excepto en la azotea (p.57).

Lo primero porque las aberturas grandes implican deficiencias en los diafragmas e incremento de excentricidades mientras que, en lo segundo, el cambio de posición generará esfuerzos en las columnas que no son uniformes en la altura, lo que producirá esfuerzos difíciles de prever (NTCDS-2020, p.57).

Además, estos huecos podrían causar zonas débiles en donde el sismo intentará disipar su energía, lo que inducirá a fallas locales (Meli, op. cit., p.478)

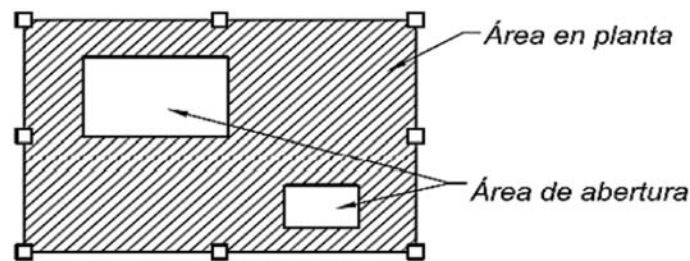


Figura 3.5 Ejemplos de aberturas en planta. Recuperado de las NTCDS-2020, p. 57

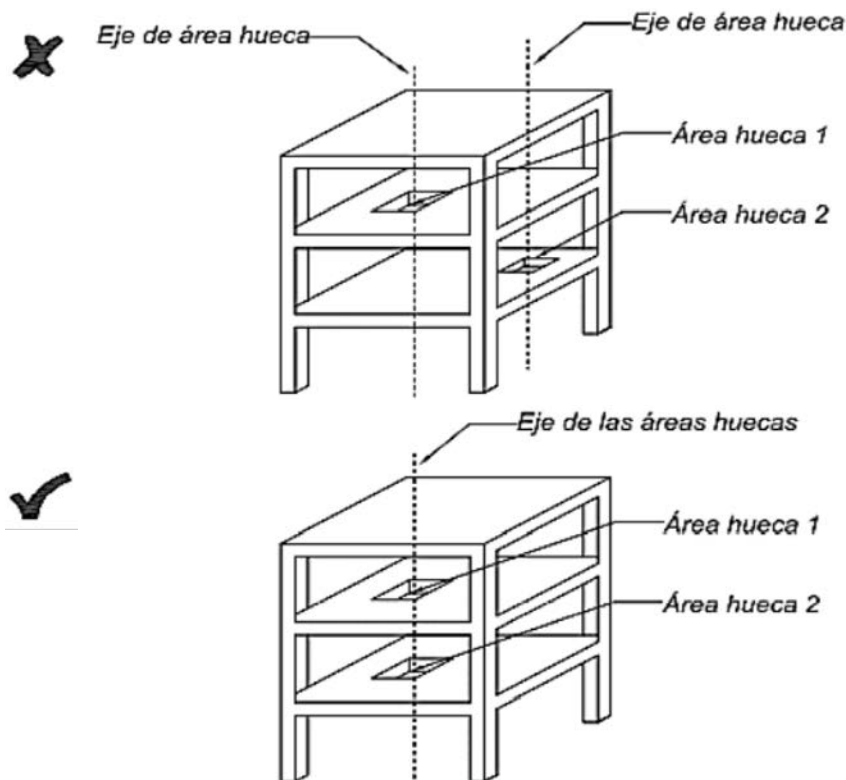


Figura 3.6 Ejemplo de ubicación de huecos, el diagrama superior muestra una posición incorrecta. Recuperado de las NTCDS-2020, p. 57

3.1.7 Peso de entrepiso

“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” (NTCDS-2020, p.58).

Este criterio del peso es porque como se vio previamente, las fuerzas de inercia son proporcionales al peso del edificio y, por lo tanto, las aceleraciones serán mayores (Bazán y Meli, op. cit., p.176).

De igual forma, los cambios de peso entre pisos generarán modificaciones en la distribución de sus cargas y en los modos de vibrar del edificio lo que conllevara a concentraciones de deformación, de esfuerzos y de una disminución en las aproximaciones obtenidas en los análisis sísmicos que podrían fomentar la aparición de fallas no contempladas (NTCDS-2020, p.58).

3.1.8 Dimension de entrepisos

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 (NTCDS-2020, p.58).

Esto debido a que un aumento en la planta incrementará los esfuerzos en el nivel anterior al generar una discontinuidad de rigideces que hará que toda la deformación lateral se concentre en ese piso (Guevara, op. cit., p.173).

Asimismo, los cambios en las dimensiones podrían inducir una respuesta de péndulo invertido, es decir, al no tener las mismas proporciones podría haber dificultades con el eje central por lo cual el movimiento pendular¹ actuara de manera opuesta, volviendo el edificio inestable, generando problemas de cabeceo y efectos de segundo orden. Esta condición deberá ser especialmente cuidada ya que el no considerarlo llevará a la estructura a clasificarla como muy irregular ya que requerirá análisis más específicos (NTCDS-2020, p.58).

¹ Ver subtema 2.2 sobre el movimiento pendular

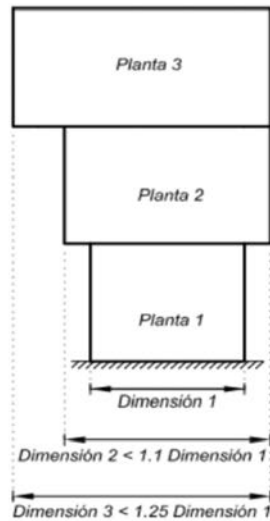


Figura 3.7 Diferencias de las dimensiones en altura. Recuperado de las NTCDS-2020, p. 58

3.1.9 Restricción de columnas

“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 con él” (NTCDS-2020, pp. 58-59).

Con esto se busca reducir la utilización de columnas que trabajen en “doble altura” ya que su rigidez, distribución de momentos y cortantes será muy diferente a las demás, aparte de ser más proclive al pandeo, tener una rigidez y resistencia a cargas laterales menor, así como afectar la rigidez de la losa de entre piso en la cual se ubique y, por consiguiente, disminuir la acción del diafragma (NTCDS-2020, pp. 58-59).

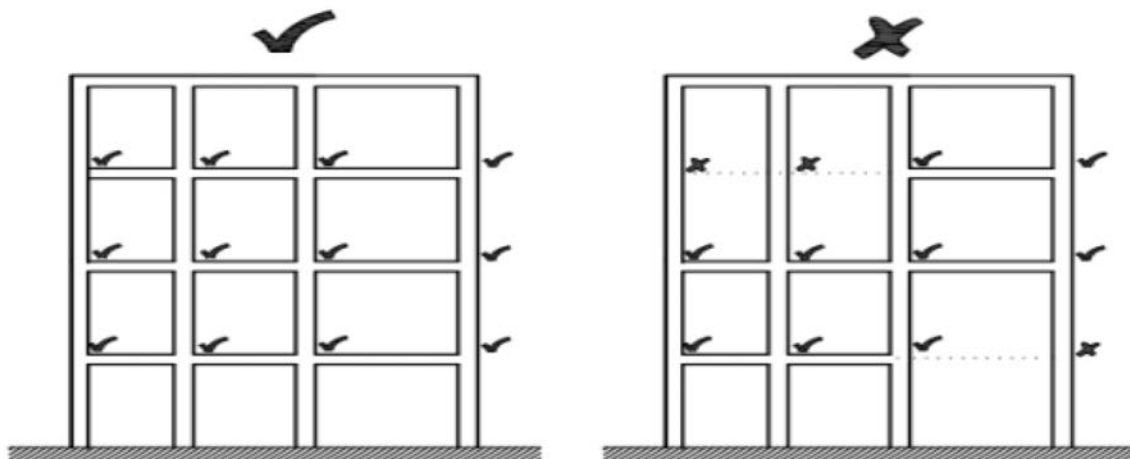


Figura 3.8 Ejemplo de una rigidez adecuada e incorrecta. Recuperado de las NTCDS-2020, p. 59

3.1.10 Altura de columnas

En cada nivel todas las columnas deberán tener la misma altura, aunque puede variar su altura de un piso al otro. La única excepción será el último nivel (NTCDS-2020, p. 59).

La razón de esta especificación es que, si en un mismo nivel hay una columna de menor tamaño, está se verá sometida a un incremento de esfuerzo de cortante al ser más rígida lo que conllevará a fallas frágiles y torsionantes (Guevara, op. cit., p.173).

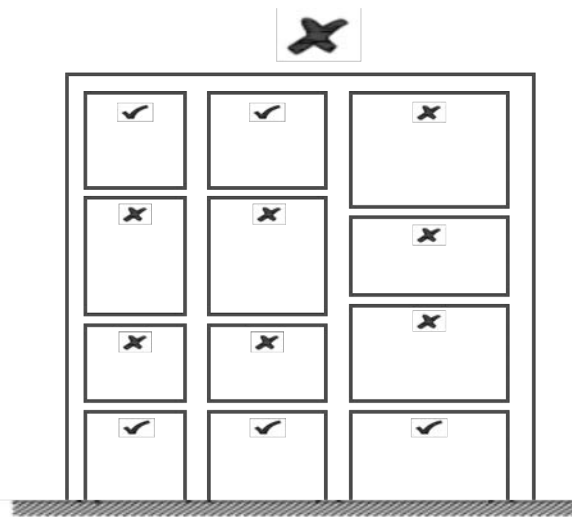


Figura 3.9 Ejemplo de variaciones de altura. Fuente: Creación de la autora.

3.1.11 Rigidez lateral

“La rigidez lateral de ningún entrepiso difiere en más de 20% de la del entrepiso inmediatamente inferior. Excepto el último piso” (NTCDS-2020, p. 60).

El incumplimiento de este requisito causará cambios bruscos en las rigideces laterales del entrepiso lo que a su vez podría generar formación de pisos débiles, cambios en los modos de vibrar, modos de falla no previstos y discontinuidades en la deformación del edificio (NTCDS-2020, p. 60).

También, ante sismos severos, podría causar el colapso del edificio debido a que los elementos verticales no logran resistir los daños al quedar sometidos a grandes deformaciones originados por la diferencia de rigideces (Guevara, op. cit, p.173).

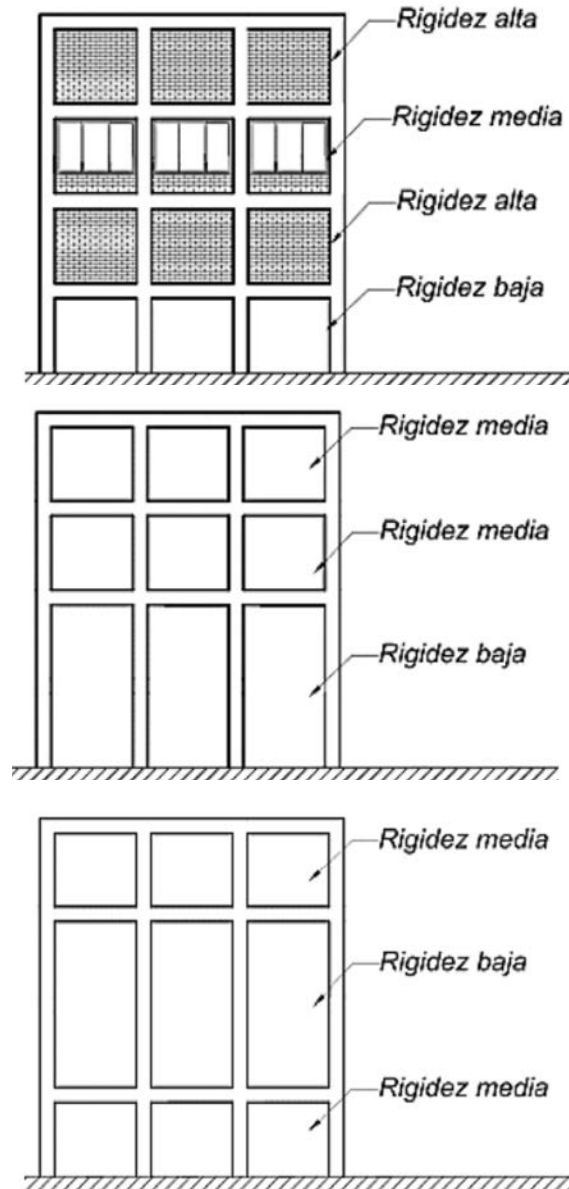


Figura 3.10 Ejemplo de rigideces dependiendo su estructuración.
Recuperado de las NTCDS-2020, p. 60

3.1.12 Desplazamiento lateral

“En ningún entrepiso, el desplazamiento lateral de algún punto de la planta excede en más de 20% el desplazamiento lateral promedio de los extremos de esta” (NTCDS-2020, p. 61).

Para entender este criterio, es importante recordar que cuando tiembla, el terreno rota sobre su plano, pero debido a las fuerzas de inercia, está girando sobre su centro de gravedad, originando los efectos de torsión.

Ahora bien, si la edificación está en esquina o tiene asimetría en planta, tiene mayores posibilidades de que sus desplazamientos excedan el promedio al incrementarse su momento torsional y sus esfuerzos, lo que la conllevará a fallas ante demandas menores (NTCDS-2020, p. 61).

Una manera de evitarlo es cuidar el desplazamiento lateral dentro del porcentaje, ya que como se vio en el subtema 1.3.1.4 (capítulo 1) las construcciones que tenían estas características fueron de las más afectadas en los sismos de 1957, 1985 y 2017.

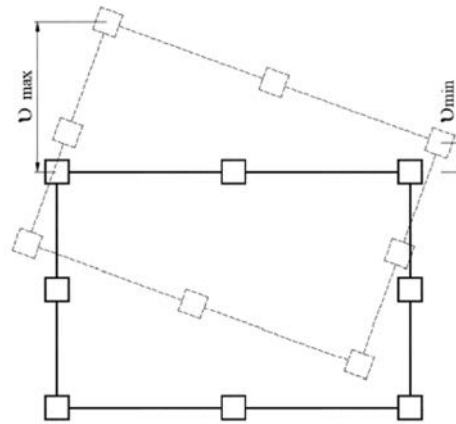


Figura 3.11 Ejemplo de desplazamiento de un edificio. Recuperado de las NTCDS-2020, p. 61

3.1.13 Factor de comportamiento sísmico

En el diseño de sistemas, el cociente de la capacidad resistente a carga lateral para todos los entrepisos deberá tener los siguientes valores (NTCDS-2020, p. 61):

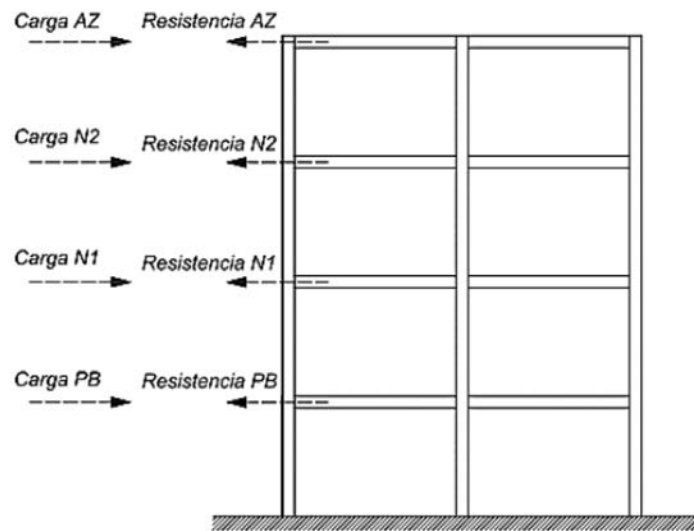
- Para $Q = 4$, ningún entrepiso tendrá una capacidad resistente menor al 85% del promedio de los cocientes
- Para $Q \leq 3$, ningún entrepiso tendrá una capacidad resistente menor al 75% del promedio de los cocientes

Para verificar su cumplimiento se calculará la capacidad resistente de cada piso tomando en cuenta los elementos que contribuyan a su resistencia.

De manera que cualquier estructura que no cumpla los requisitos será considerada irregular y podría considerarse que trabajara de manera errática

ante un sismo ya que puede provocar vibraciones torsionales en el edificio al no coincidir con el centro de la masa o el también llamado centro de torsión (Guevara, op. cit., p.128).

Es así que lo que se pretende con esta especificación es que la distribución de la resistencia entre los elementos estructurales no difiera demasiado entre niveles pues, aunque se acepta el daño de una estructura ante un sismo severo, el tener resistencias similares evitará que un nivel se dañe en exceso, todo con el fin de que la unidad logre disipar gran parte de las fuerzas sísmicas (NTCDS-2020, pp. 61, 62).



Si $Q = 4$ entonces no se debe cumplir que

$$\frac{\text{Resistencia entrepiso } i}{\text{Carga entrepiso } i} < 0.85 \text{ Promedio } \frac{\text{Resistencia entrepisos}}{\text{Carga entrepisos}}$$

Si $Q \leq 3$ entonces no se debe cumplir que

$$\frac{\text{Resistencia entrepiso } i}{\text{Carga entrepiso } i} < 0.75 \text{ Promedio } \frac{\text{Resistencia entrepisos}}{\text{Carga entrepisos}}$$

Figura 3.12 Condiciones de resistencias y cargas laterales. Recuperado de las NTCDS-2020, p. 62

NOTA: El siguiente punto es una especificación de las NTCDS separada de las condiciones de regularidad, pero al ser una de las pautas que deben considerarse en el diseño sísmico y que su aplicación implica cierta irregularidad en la estructura, en el presente documento se contemplará dentro de los criterios de regularidad:

3.1.14 Planta baja débil

Las NTCDS-2020 establecen que:

Si en un edificio el cociente de la capacidad resistente entre la fuerza cortante de diseño para el primer entrepiso es menor que 60 por ciento del mismo cociente para el segundo entrepiso y para más de la mitad de los entrepisos restantes, se considerará que el edificio cae en el caso denominado “planta baja débil” (p.63).

Lo anterior quiere decir que cuando exista una distribución dispareja de las resistencias y rigideces de los elementos verticales en los diferentes niveles del edificio, podría existir algunos niveles que sufran más afectaciones al ser más débiles que el resto. Si este piso débil se encuentra en la planta baja va a tomar la mayor parte de la deformación, y no solo será el que tenga más daño si no que la disipación de energía se concentrara en ese piso, modificando la deformación de todo el edificio y comprometiendo la seguridad del mismo (NTCDS-2020, pp. 63, 64).

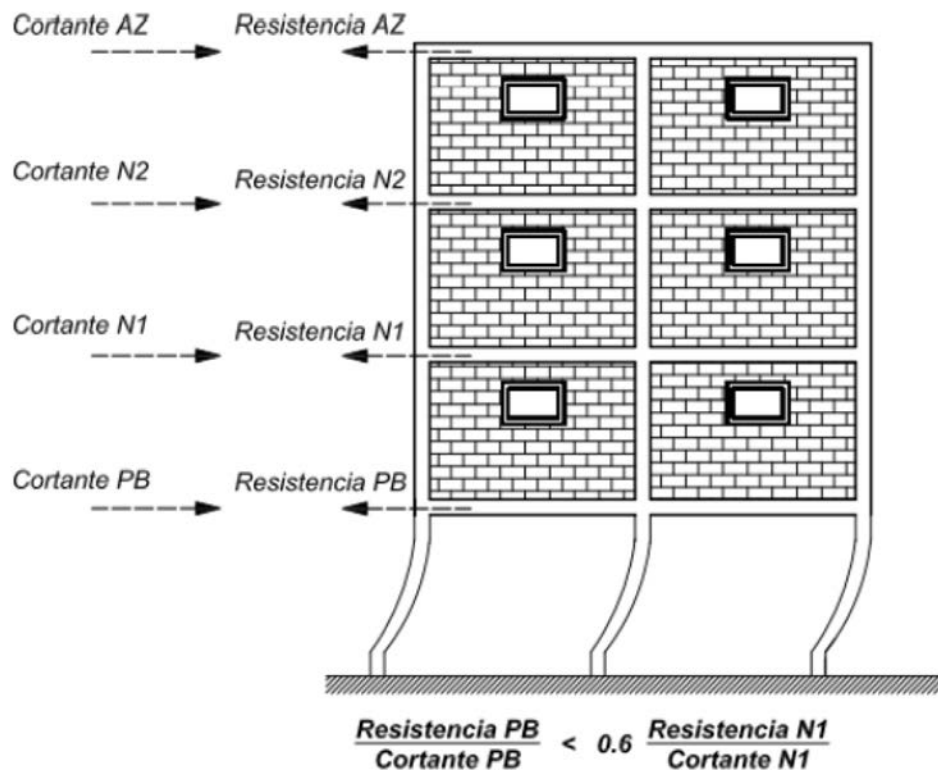


Figura 3.13 Planta baja libre y las acciones de cortante. Recuperado de las NTCDS-2020, p. 64

Este fenómeno por lo general se da cuando los pisos superiores son habitacionales o de oficinas, estructurados con muro de carga y con una planta tipo que difiere con la distribución del primer piso pues tiene uso comercial o de estacionamiento constituido por columnas.

Otro ejemplo es cuando a la planta baja se le ponen columnas más altas que la de los niveles superiores para dejar un espacio de gran altura (Becerra, op. cit., p.32) y que hará que ese piso tenga una rigidez y resistencia lateral menor al resto de los pisos, lo que causará en esa planta una concentración de fuerzas que producirá el colapso del edificio (Miranda, 2005, pp.1-2).

En suma, la regularidad de la forma del edificio depende tanto en planta como en alzado ya que ambos definirán la distribución de la rigidez, resistencia, masa reactiva (peso) del edificio, así como su comportamiento sismorresistente, por ello, deberán de evitarse formas de U, T, H, +, debido a la concentración de esfuerzos en la unión de los diferentes cuerpos que la componen (Guevara, op. cit., p.138, 145-149).

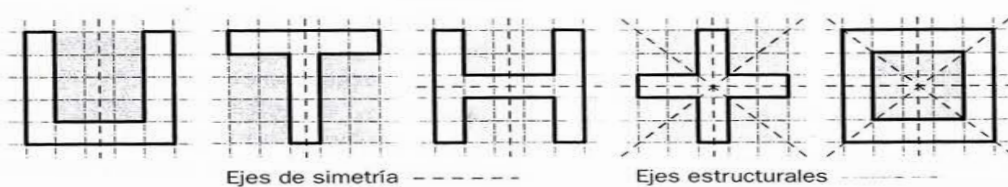


Figura 3.14 Formas en planta que no se comportan de manera adecuada ante un sismo.

Fuente: Guevara, op. cit., p. 148

Bazán y Meli señalan que una manera de solucionar esto sin cambiar la forma del edificio es dividirlo en cuerpos individuales y unirlos mediante juntas de construcción (op. cit., p.177).

Adicional a estas observaciones, Meli (op. cit., p.477-479) señala que el mayor número de elementos estructurales y secciones deberán llegar a la fluencia (esfuerzo máximo sin llegar a la deformación plástica) para lograr mayor disipación de energía.

3.2 Criterios de irregularidad estructural que afectan el comportamiento sísmico

Una vez establecidas las condiciones de regularidad, es importante señalar que éstas al no tomarse en cuenta podrían originar comportamientos erráticos en la estructura que evitaren una correcta disipación de energía. Por ello, dependiendo de los requisitos que no se cumplan, podrían clasificarse como:

- Estructuras irregulares
- Estructuras muy irregulares

En ambos casos, el tener una estructura de ese tipo, hará que los cálculos requieran métodos más complejos para su estudio así como se les asignará ciertas penalizaciones en su análisis como un “*castigo en el factor de reducción por comportamiento sísmico que se permite aplicar a las ordenadas del espectro de diseño*” (NTCDS-2020, p.65).

Lo anterior con el propósito de desalentar la creación de estructuras irregulares, por ello, para entender en que consiste, a continuación se abordarán de manera particular.

3.2.1 Estructura irregular

De acuerdo a las NTCDS-2020 (p.63) las edificaciones serán consideradas irregulares cuando presenten concentración de esfuerzos y cuando:

- No cumplan uno de los requisitos 5, 6, 9, 10, 11, 12 y 13
- No satisfagan dos o más de los requisitos 1, 2, 3, 4, 7 y 8

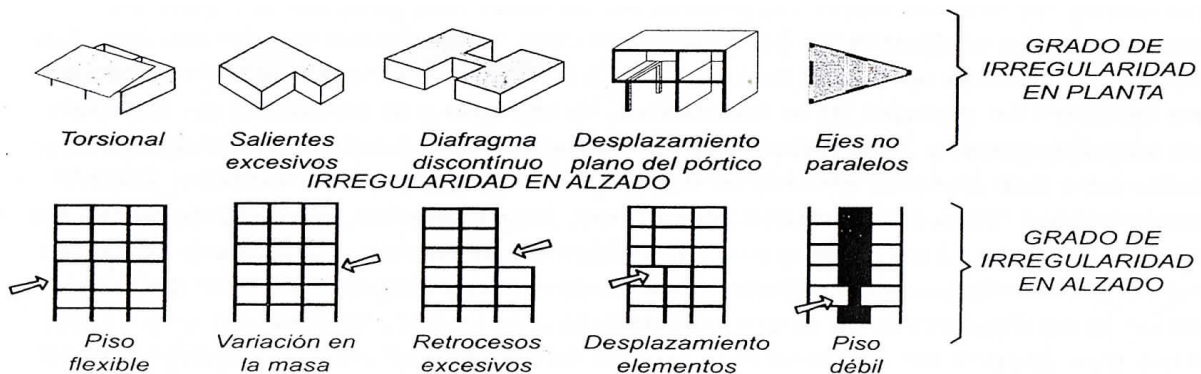


Figura 3.15 Irregularidad en Planta y Alzado. Fuente: Guevara, (2007), p. 111

3.2.2 Estructura muy irregular

Las NTCDS-2020 mencionan la existencia de otro tipo de estructuración, la cual se considera muy irregular y se produce cuando (p.63):

- *No cumple dos o más de los requisitos 5, 6, 9, 10, 11, 12 y 13*
- *El desplazamiento lateral de algún punto de una de las plantas excede en más de 30% el promedio de los desplazamientos de los extremos de esta*
- *La rigidez lateral o la resistencia al corte de algún entrepiso excede en más de 40% la del entrepiso inmediatamente inferior.*
- *Más de 30% de las columnas ubicadas en un entrepiso no cumplen con el requisito 9*
- *Cuando se produce el efecto planta baja débil*

El tener alguna de las características anteriores no solo hará que los cálculos deberán de requerir métodos más complejos de análisis, sino que también tienen mayor probabilidad de funcionar erráticamente ante la aparición de un sismo. Aunado a ello, al entrar dentro de esta categoría, las NTCDS-2020 establecen ciertas penalizaciones a su análisis como un “*castigo en el factor de reducción por comportamiento sísmico que se permite aplicar a las ordenadas del espectro de diseño*”.

También, en el caso de planta baja débil, no se aplicará ninguna reducción por ductilidad al espectro de diseño ni se reducirá la distorsión máxima que pueda tener un entrepiso crítico. De hecho, se requiere la incorporación de una estructura muy rígida con muros de concreto que eliminen el piso débil (NTCDS-2020, p.65).

Siendo así que independientemente de cuál de las dos clasificaciones de irregularidad se encuentre una estructura, las NTCDS-2020 solicitan que el análisis dinámico paso a paso no lineal sea el utilizado para evitar la incertidumbre del sistema.

3.3 Separación entre colindancias

Por último, otro punto a tener en consideración al momento de diseñar un proyecto es la separación entre edificios. Las NTCDS-2020 señalan que entre predios debe de haber una distancia que no sea menor a 50 mm (5 cm) *“ni menor que el desplazamiento lateral calculado para el nivel de que se trate, determinado con el análisis estructural para la revisión del estado límite de prevención de colapso, que considere los efectos de giro y del corrimiento de la base del edificio”* (pp 19-20).

En caso de que no se tomen en cuenta los efectos señalados, las normas estipulan que deberá incrementarse en el cálculo de los desplazamientos laterales en 0.003 veces de altura para la Zona II y 0.006 para la Zona III.

Esto es importante para evitar el efecto de golpeteo entre edificios ya que cuando dos cuerpos están pegados y difieren en alturas, la losa de uno podría golpear las columnas del otro y provocar su colapso. Para disminuir esto podrían incluirse aparatos que disminuyan el impacto del sismo y que son las llamas juntas sísmicas o juntas constructivas (Bazán y Meli, op. cit., p.181).

Las NTCDS-2020 también señalan que, si el edificio colindante no tiene separación con el lindero entonces la nueva construcción deberá dejar la distancia de la que debería tener la colindante más la requerida para ese proyecto. Lo mismo para diferentes cuerpos de un mismo proyecto, excepto en el caso de que los dos cuerpos tengan la misma altura, las losas coincidan a la misma altura, no haya salientes y tengan la misma estructuración, ya que para ese caso podría dejarse una separación igual a la mitad de dicha sumatoria.

Aunado a ello, se establece que las separaciones deberían estar marcadas en los planos arquitectónicos y estructurales, además de que deberán estar libres de cualquier obstrucción para lo cual podrían usarse tapajuntas cuya revisión será cada 5 años o después de un sismo intenso.

3.4 Criterios de forma en las tendencias arquitectónicas y su incidencia en el comportamiento sísmico

Para entender las tendencias de la arquitectura contemporánea y su influencia tanto en el proyecto arquitectónico como en su comportamiento sísmico, es importante remontarnos a dos hechos históricos que cita Ortega (1999, pp. 39-41) que revolucionaron las técnicas constructivas y posteriormente los estilos arquitectónicos:

- El primer hecho lo conforman la incorporación del acero y el concreto como materiales estructurales, así como la creación en 1892 del sistema Hennebique que proponía la utilización de losas, traveses y columnas de concreto reforzadas con armaduras y varillas de acero.

- El segundo hecho lo creó Auguste Perret en 1905 cuando construyó en Rue Franklin el primer edificio de concreto armado, el cual enlazó con el contexto urbano al diseñar por primera vez una planta baja con uso comercial. El resultado fue una arquitectura innovadora que impulsó la construcción de este material y estableció a Perret como precursor de la arquitectura moderna.

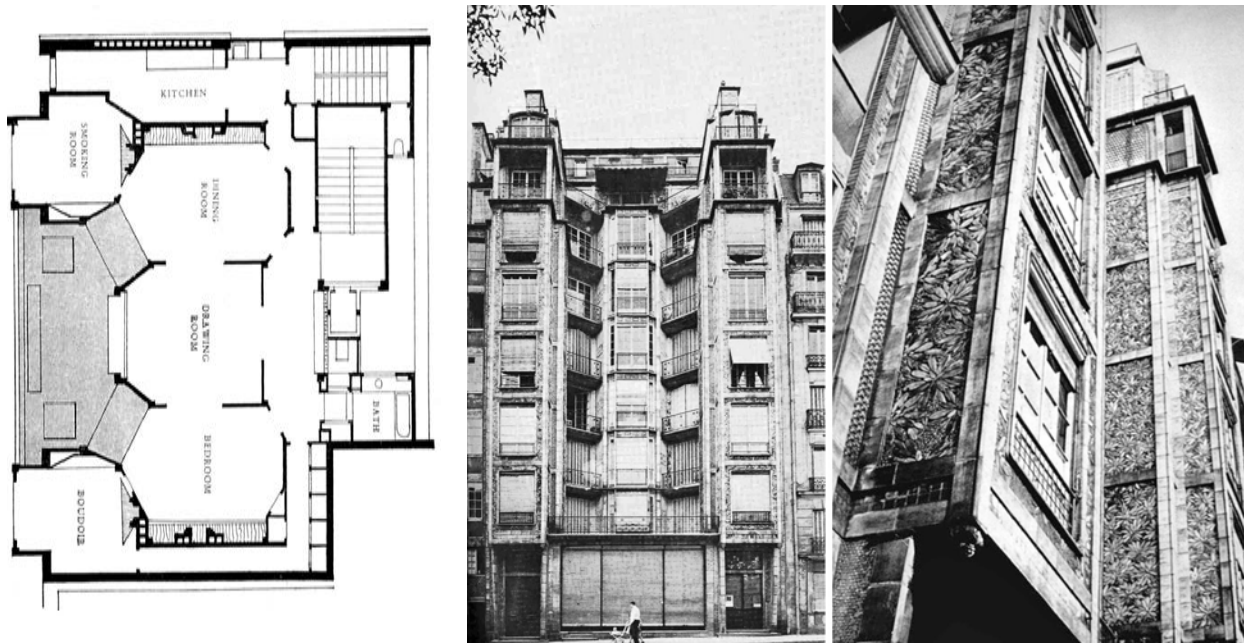


Figura 3.16 Planta tipo rotada y fachada del edificio Rue Franklin de Auguste Perret. Recuperado 2020 de <https://hasxx.blogspot.com>

De hecho, lo trascendental del evento fue que sirvió como evidencia para demostrar que podían construirse edificios de considerable altura con columnas, vigas y losas de concreto armado. Además de que con este sistema se podían edificar ventanas más grandes que las que se estaban utilizando en los edificios clásicos (Guevara, op. cit., p. 29).

No obstante, lo realmente importante de este hecho para la arquitectura moderna fue que la visión de Perret influyó en una generación de arquitectos posteriores como Le Corbusier, Walter Gropius y Ludwig Mies van der Rohe, los cuales formaron el modernismo arquitectónico.

3.4.1 Movimiento moderno

Como se recordará, Le Corbusier, Walter Gropius y Ludwig Mies van der Rohe fueron quienes en los años 20s impulsaron el inicio del movimiento moderno al promover una construcción funcionalista que sugería que la forma debía responder a una función y que rechazaba los ornamentos tan utilizados de las construcciones clásicas.

Es así que ellos renovaron y establecieron tanto una nueva forma de diseñar como de construir, que cambiaría la arquitectura del futuro. Por ejemplo:

- Mies van der Rohe optó por impulsar el acristalamiento continuo del inmueble al desarrollar en 1958 muros cortina (ventanales de piso a techo) para el edificio Seagram Building en Nueva York.



Figura 3.17 Seagram Building: El primer edificio con muros cortina. Recuperado 2020 de Pérez, 2014.

• Walter Gropius propuso la utilización de configuraciones ricas en formas y composición que logran crear diferentes vistas en una edificación como puede verse en La Bauhaus.



Figura 3.18 Bauhaus Dessau por Walter Gropius. Recuperado 2020 de Duque, 2014.

• Le Corbusier fue más lejos al desarrollar “los cinco puntos de la nueva arquitectura” que, de manera general, pueden ilustrarse con la siguiente imagen:

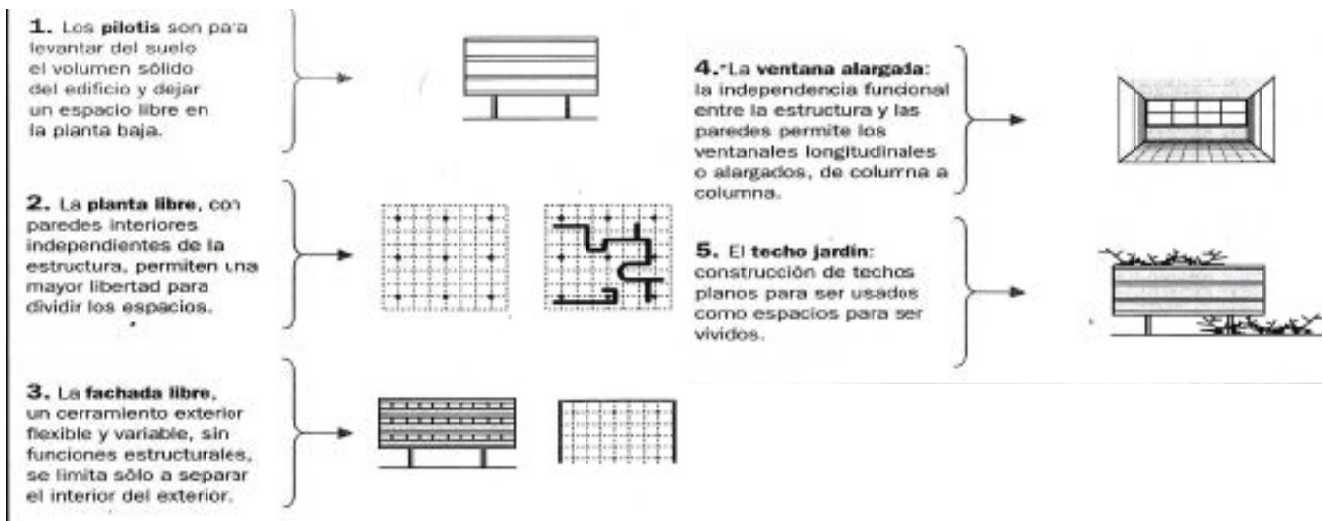


Figura 3.19 Los 5 puntos de la nueva arquitectura de Le Corbusier. Fuente: Guevara, op. cit., p. 29.

Con esta ideología en mente, y con el surgimiento de la segunda guerra mundial, los arquitectos Rohe y Gropius tuvieron que abandonar Alemania para trasladarse a Estados Unidos, lo que condujo que el estilo se propagara a América, convirtiéndose más tarde en una tendencia que empezó a utilizarse internacionalmente.

Es así que su impacto arquitectónico fue sin precedentes, ya que, contrapuesto a los órdenes historicistas, este estilo renovó la arquitectura por lo atractivo que resultaban sus formas y por la facilidad con la que podía replicarse el sistema constructivo en cualquier parte del mundo. No obstante, el error de recrearlo en otros continentes fue que no se consideraron las características del entorno en el que iba a ubicarse ni su desempeño ante fenómenos naturales.

Esto se debió principalmente a que el estilo surgió en Europa, en lugares como Alemania y Francia, en donde no suelen presentarse eventos sísmicos, pero también porque la ingeniería sísmica empezó a estudiar científicamente el impacto que generaban en las estructuras hasta pasada la mitad del siglo XX.

De esta manera, al trasladar ideas de los años 20s a zonas sísmicas que aún no comprendían del todo el efecto del movimiento telúrico en las construcciones, provocó que los inmuebles, ante un sismo intenso, no presentaran un buen desempeño.

Un ejemplo de ello es la utilización de columnas y losas con ausencia de vigas (losas planas de concreto) que formaban marcos en los cuales se dejaba el piso de la planta baja estructurado con columnas altas mientras que los demás niveles eran estructurados como muros de carga (ver figura 3.20). Esta situación, como se recordará del apartado 3.2.2, son situaciones que originan una “planta baja débil” y categorizan a este tipo de estructura como una muy irregular.

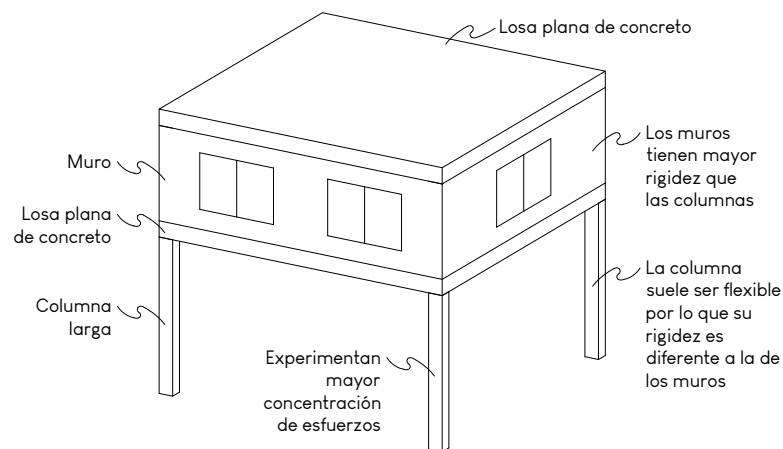


Figura 3.20 Ilustra los efectos de aplicar los “pilotis” de Le Corbusier. Fuente: Creación propia.

De hecho, su ineffectividad ha sido probada pues como se abordó en el capítulo 1.3.1.4, este fue uno de los daños que más se presentó en los edificios colapsados tras los sismos de 1957, 1985 y 2017, ya que la diferencia de rigideces entre las columnas y los muros hará que las primeras experimenten una mayor concentración de esfuerzos que eventualmente ocasionara su falla o incluso el colapso de las mismas.

Es por ello que actualmente se alienta que los elementos estructurales sean los mismos en todos los entre pisos y en el caso de que no sea posible, que se realice un análisis detallado que considere esta diferencia de rigideces.

Por otra parte, la estructuración de losas planas con columnas de concreto reforzado se prohibió inicialmente en países como Estados Unidos, Chile y Nueva Zelanda por su pobre comportamiento estructural ante fuerzas sísmicas (Galvis, et. al., op. cit., p. 12) para posteriormente prohibirse en el resto de los países.

Una propuesta alternativa a las losas planas de concreto es el sistema de marcos rígidos conformado por columnas, losas y vigas de concreto reforzado que posee bondades en la configuración arquitectónica y que tiene mejor comportamiento sísmico que el de las losas planas pero que, comparado a otros sistemas, también presenta deficiencias, como se verá en el capítulo 5.

Retomando los puntos que establece Le Corbusier, se cita el de “la ventana alargada” la cual sugería una utilización exagerada de ventanales y ventanas que, si bien tienen un abanico de posibilidades tanto estéticas como climáticas y energéticas, debe ser estudiado con detalle, no por la propuesta de las ventanas sino por la forma en la que suele estructurarse este tipo de edificio.

Un ejemplo de ello puede encontrarse en los inmuebles en esquina, donde por su ubicación privilegiada, el proyectista suele dejar dos fachadas con muchas aberturas y, dos fachadas (las de sus colindancias) con muro corrido que las cierra por completo (ver figura siguiente).

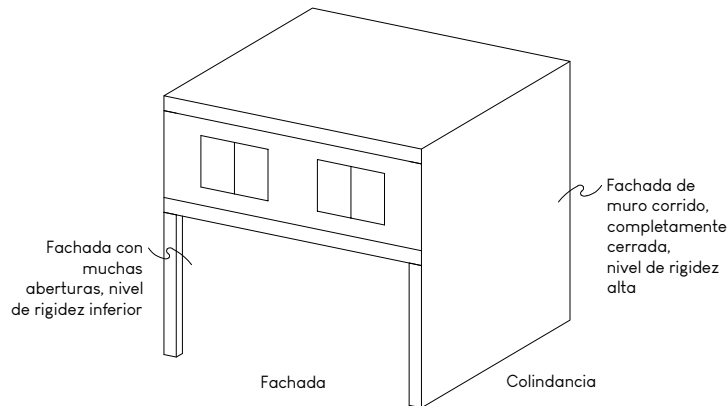


Figura 3.21 Muestra problemas de rigidez en un inmueble en esquina. Fuente: Creación propia.

Esto provoca que el inmueble presente diferencia de rigideces al tener más resistencia aquellas con muro corrido que aquellas en las que se tienen muchos vanos, lo que producirá efectos de torsión al ser 2 lados flexibles y 2 lados rígidos causando, en el peor de los casos, el colapso. Habrá que recordar, también del capítulo uno, que las construcciones constituidas de esta manera han sufrido un gran número de derrumbes ante los eventos de 1957, 1985 y 2017.

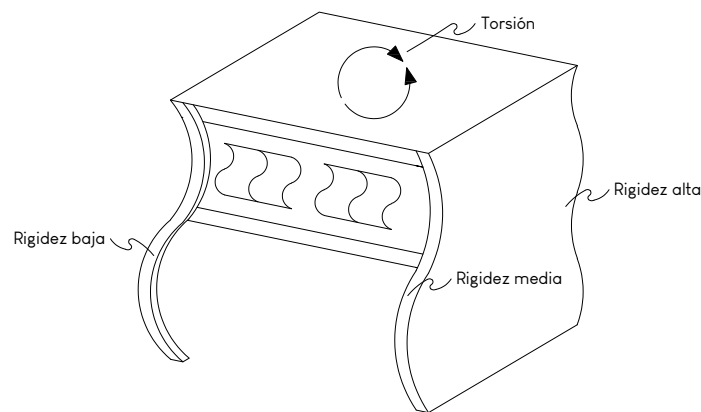


Figura 3.22 Ilustra los efectos de torsión que puede producirse en edificios en esquina estructurados con diferencia de rigideces. Fuente: Creación propia.

Es así que la alienación del estilo en los lugares de inserción y la monotonía del mismo dio pie para que en los años 70s surgiera el posmodernismo. No obstante, la diferencia de pensamiento entre los arquitectos no logró establecer un estilo único, lo que dio como resultado que en los años 80s surgieran diferentes corrientes de pensamiento y estilos que forman parte de la arquitectura contemporánea y que a su vez tienen diferentes comportamientos sísmicos, como se verá a continuación.

3.4.2 Movimiento contemporáneo

El movimiento contemporáneo, a diferencia del moderno, está conformado por varias tendencias arquitectónicas en la que ninguna de ellas domina, lo que le confiere al proyectista actual una serie de posibilidades de diseño, formas y configuraciones que puede retomar e incluso adoptar a su gusto.

Es así que entre esta diversidad de filosofías se encuentra la arquitectura: deconstructivista, high tech, orgánica y minimalista, que son las más famosas y utilizadas de este movimiento.

Es por ello que, a continuación, se hablará de manera breve de las características de las corrientes contemporáneas citadas anteriormente, sin abarcar de manera específica los orígenes y representantes de los mismos, ya que para el presente documento lo elemental al hablar de ellos son sus criterios de forma y su incidencia en el comportamiento sísmico.

3.4.2.1 Deconstructivismo:

El deconstructivismo es un estilo que se basa en el juego de la geometría al enriquecer sus formas con ángulos, lo que provoca por lo general que los muros pierdan su verticalidad. Son figuras caprichosas, sin un patrón fijo y regidas por la creatividad del arquitecto (Bussagli, 2011, pp.186-187).



Figura 3.23 Biblioteca Central de Seattle, Rem Koolhaas. Recuperado 2020 de: <https://gastv.mx>

En este estilo los edificios son principalmente irregulares, tanto en planta como en alzado, ya que para diseñarlos se descompone la forma, creando figuras asimétricas, llenas de entrantes y salientes.

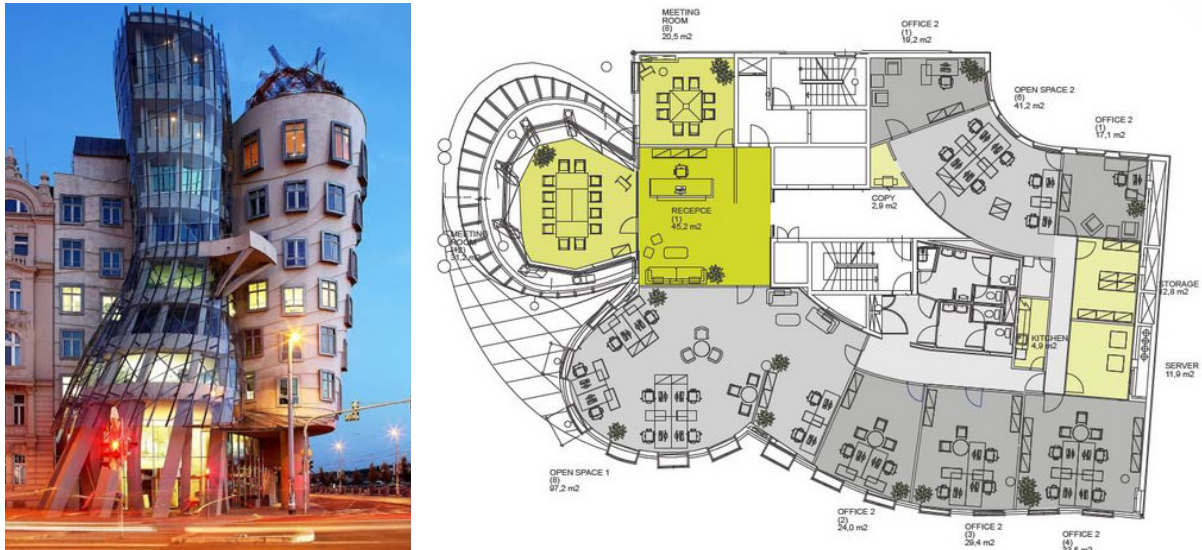


Figura 3.24 Ejemplo de irregularidad en planta y alzado: la Casa Danzante de Frank Gehry.
Recuperado 2020 de <https://es.wikiarquitectura.com>

El problema de este tipo de edificios, ante un evento sísmico, es que por la asimetría puede existir una desigualdad en la distribución de las cargas que, como se recordará del capítulo dos, generará efectos torsionantes. Es decir, un nivel girará en una dirección mientras que el nivel inmediato lo hará en la dirección contraria produciendo desplazamientos y rotaciones de los apoyos.

Por otro lado, el gran número de entrantes y salientes en las edificaciones forma puntos débiles debido a que las esquinas entrantes concentrarán un mayor número de esfuerzos que puede desencadenar en deformaciones y fallas. De hecho, como se cito previamente en las NTCDS-2020, estos elementos no deben de ser mayores al 20% de la dimensión de la planta (ver subtema 3.1.4).

De lo anterior, puede inferirse que la filosofía de este estilo es contraria a los criterios que señala un desempeño sísmico adecuado e incluso, a opinión de la autora, de la utilización efectiva del espacio arquitectónico. Siendo éstos dos posibles razones por las cuales el deconstructivismo no se implementó en edificios residenciales dentro de la Ciudad de México.

De lo anterior, puede inferirse que la filosofía de este estilo es contraria a los criterios que señala un desempeño sísmico adecuado e incluso, a opinión de la autora, de la utilización efectiva del espacio arquitectónico. Siendo estas dos posibles razones por las cuales el deconstructivismo no se implementó en edificios residenciales dentro de la Ciudad de México¹.

3.4.2.2 High Tech

De acuerdo a Bussagli (op. cit., pp.188), la principal característica del estilo High Tech es que la estructura es la protagonista estética del edificio, la cual se caracteriza por el uso incesante de materiales industriales como el vidrio y el acero, así como la integración de la tecnología al mismo.

Su diseño es contrario a la estética homogénea por la que apostaba el movimiento moderno ya que busca e invita la variedad al contar con diversos acabados industriales en los que no solo se exhibe su estructura, sino también sus uniones, instalaciones y zonas de servicio.

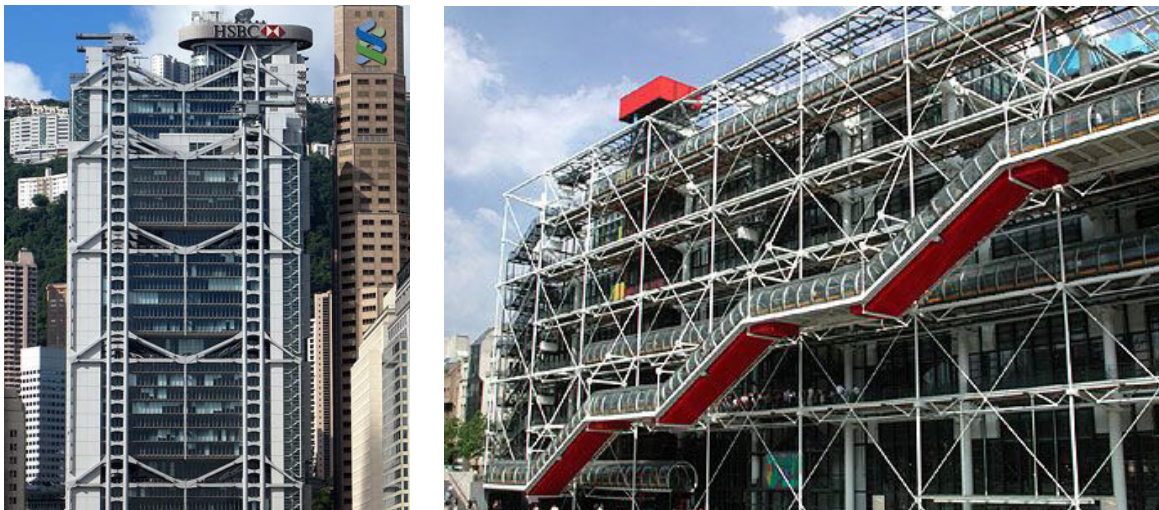


Figura 3.25 Edificios con estilo High Tech. Recuperado 2020 de: <https://arquigrafico.com>

Sus formas son más conservadoras que el deconstructivismo ya que prefieren figuras geométricas como rectángulos, círculos, óvalos y polígonos para no perder ni la simetría ni la funcionalidad del inmueble.

¹ Buendía Sánchez, L. M. (2012), Estimación de daños a contenidos de museos por sismo: caso Museo Soumaya y Museo Nacional de Antropología de la Ciudad de México. [Tesis de Licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México.

A sí mismo, si la estructuras de acero se diseñan con una alta ductilidad, lograrán una mejor desempeño que los de concreto ya que como se vio en el capítulo uno, los edificios de este material se han comportado de manera más estable, recordando que, tras los eventos sísmicos de 1957, 1985 y 2017, solo dos edificios de acero colapsaron y estos fueron en el 85 por problemas de unión entre sus elementos.

En cuanto a su desempeño sísmico, si no se contrapone a las condiciones de regularidad antes vistas, por lo general será efectivo ya que al ser la estructura la protagonista del diseño y quedar visible, en caso de daño parcial será más fácil de reparar.

En relación al estado del High Tech en la Ciudad de México, este no se ha observado en edificios residenciales, no obstante, si se ha utilizado en edificios icónicos como: la biblioteca Vasconcelos, la torre de Ingeniería de la UNAM y la torre BBVA Bancomer, los cuales hasta el momento han presentado un buen comportamiento sísmico.

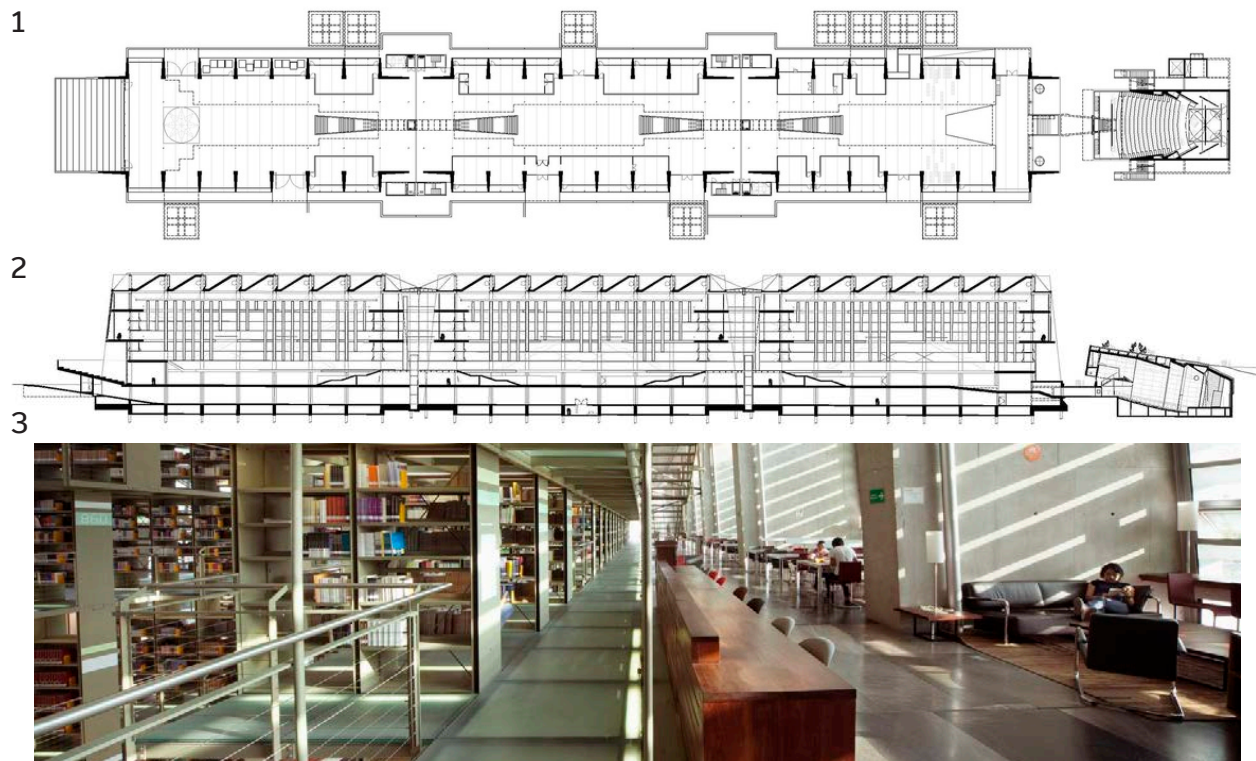


Figura 3.26 Biblioteca Vasconcelos por Alberto Kalach. Muestra en 1 la planta arquitectónica, 2 corte longitudinal, 3 vista del interior. Recuperado 2020 de: <https://www.archdaily.mx>

3.4.2.3 Organicismo

El organicismo o arquitectura orgánica establece que la edificación debe fundirse con el medio ambiente y, por lo tanto, acoger tanto la naturaleza del entorno como de sus materiales, al tiempo que crea una composición unificada en la que las formas sean funcionales y racionales (Bussagli, op. cit., pp.252-253).

Frank L. Wright establece que el edificio orgánico debe “incluir todo lo necesario y nada innecesario para resolver el problema arquitectónico inmediato” al tiempo que se une con la naturaleza misma, utilizando los materiales, técnicas de construcción, sitio y contexto cultural del lugar en el que se edifique (Ettinger, 2007, p. 106-110)

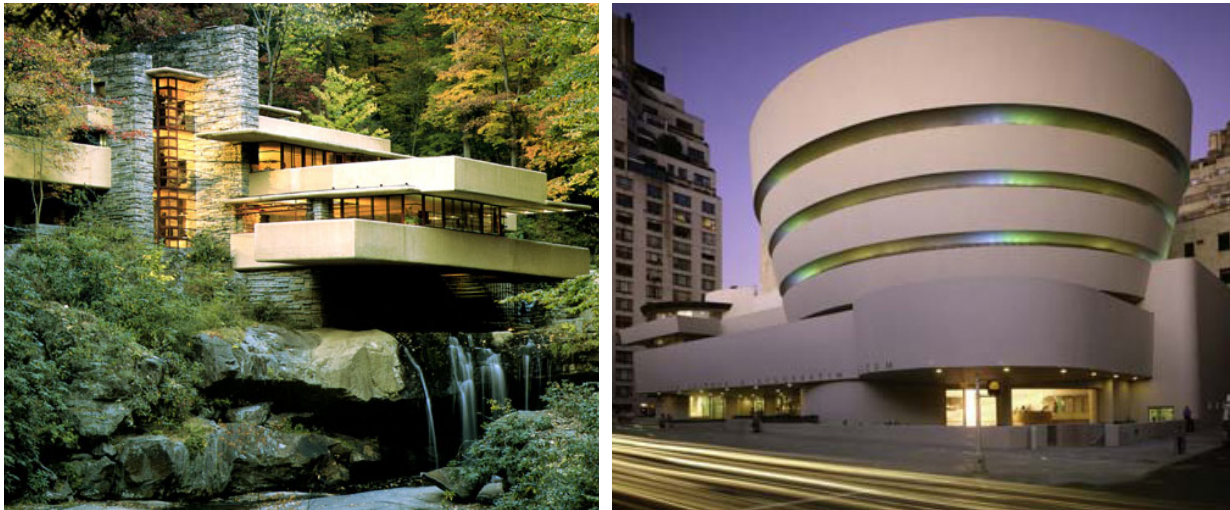


Figura 3.27 Edificios orgánicos de Frank L. Wright.

Recuperado 2020 de: <https://sites.google.com/site/arquitecturasxxxxxxxxi>

Es bajo esta premisa que las figuras son muy variadas, ya que, al responder a ubicaciones específicas, no pueden ser reproducidas en otro lado. No obstante, apuestan por la utilización de figuras geométricas como rectángulos, círculos, óvalos y polígonos, la distinción no es importante mientras se ajuste a un objeto natural. Sin embargo, contrario al deconstructivismo, si buscan que la geometría sea funcional y racional.

Es por ello que, por lo general, la aplicación del estilo se centra en edificios de mediana altura e incluso en aquellos de uno o dos pisos.

En referencia a su comportamiento sísmico, algunas construcciones tienden a presentar el mismo problema que el deconstructivismo al tener un gran número de entrantes y salientes en sus edificaciones causando puntos débiles en las esquinas sustentantes, las cuales al concentrar un mayor número de esfuerzos podrían desencadenar desprendimientos ante un sismo.

En relación a la arquitectura orgánica en la Ciudad de México, su uso no se ha observado en edificios residenciales, pero si en complejos residenciales como la Casa Nautilus, Conjunto Satélite y Nido Quetzalcóatl, las cuales son primordialmente de formas curvas con techos verdes en un intento de quererlas hacer fluir con su entorno y crear ambientes térmicos.

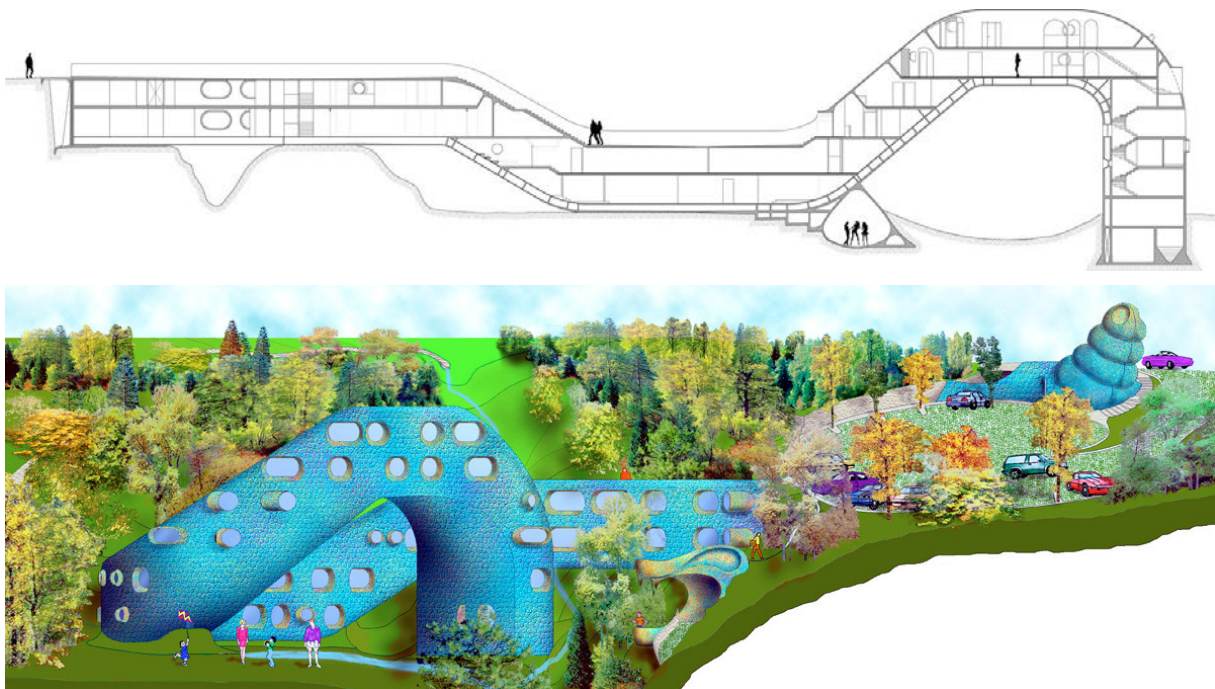


Figura 3.28 Residencial Nido Quetzalcóatl de Javier Senosiain en Corte y Render.

Recuperado 2020 de: <https://www.archdaily.mx>

Aunque estos complejos, diseñados por el Arq. Javier Senosiain, desde el punto de vista de la autora presentan algunas deficiencias en el aprovechamiento de espacios, así como de amueblamiento, su comportamiento sísmico ha sido efectivo tanto por su poca altura como por su estructura ligera de ferrocemento reforzada con varilla trenzada y con malla de gallinero tensado recubierto con poliuretano esparado (Mendoza, 2009, pp. 18-19).

3.4.2.4 Minimalismo:

La corriente minimalista retoma algunos aspectos del funcionalismo como la utilización del vidrio, el concreto y el acero. Su propósito es crear espacios fluidos en donde el interior y el exterior se conecten, apostando por la transparencia de espacios acristalados generados en superficies pulidas o espejos de agua (Villanueva, 2013, p.84).

Sus formas son altamente geométricas ya que suelen usarse en su forma original y se rigen tanto por la organización del espacio como por su función.

En cuanto a su desempeño sísmico, uno de los mayores problemas que presenta este estilo es que al utilizar formas simples e intentar crear un juego entre ellas, se crean composiciones con grandes entrantes y salientes.



Figura 3.29 Edificio Darcon 5 por Arquitectura en Proceso: Vista en perspectiva y planta nivel 2. Recuperado 2020 de: <https://www.archdaily.mx>

Estas formas a su vez ocasionan en algunos casos que el piso inmediato superior tenga una dimensión mayor a la inferior, lo que puede crear pisos flexibles e incrementar los esfuerzos en el nivel anterior al generar una discontinuidad de rigideces.

Otras situaciones que también suelen presentarse es el desplazamiento de elementos, una planta baja libre, diafragma discontinuo, variación en su masa y retrocesos excesivos, características que, como se recordaran del subtema 3.2, hacen a una estructura irregular y propiciarán problemas al momento de disipar la energía del sismo.


En referencia a la inserción del minimalismo en la Ciudad de México, el arquitecto Luis Barragán es el representante más exitoso y destacado del “minimalismo mexicano” así como Ricardo Legorreta, Enrique Norten, entre otros.

Su uso se ha implementado principalmente en casas habitación y en edificios de mediana altura en los cuales hasta al momento no han sufrido daños ante sismos.



Figura 3.30 Renders del edificio Popocatepetl 526 de Enrique Norten, ejemplo de un proyecto minimalista. Recuperado 2020 de: <https://www.ten-arquitectos.com/popocatepetl>

Una vez abordadas las diferentes tendencias arquitectónicas y su desempeño sísmico de acuerdo a su forma estructural, es importante resaltar que el análisis realizado no es con el propósito de limitar la creatividad del arquitecto, si no para ser utilizado como conocimiento que maximice el proyecto arquitectónico y la fase de estructuración.



**Capítulo 4:
Técnicas de control
sísmico para edificios**

4 Técnicas de control sísmico para edificios

A lo largo del documento se ha hablado de los efectos que causa el sismo y de criterios tanto normativos como de forma que deben seguir las construcciones para resistir los efectos telúricos, sin embargo, hasta el momento no se han abordado las técnicas constructivas que pueden utilizarse como complemento para mejorar el comportamiento estructural de la edificación ante este tipo de eventos.

Por ello, en este capítulo se abordarán los dispositivos de control sísmico que existen para aislar y disipar la energía del sismo además de un breve recorrido de la situación actual de estos elementos en otros países y en la Ciudad de México.

Todo esto con el fin de analizar la información y elaborar a partir de ello algunos criterios que deberá considerar el arquitecto al momento de incluirlo en un proyecto arquitectónico (ver capítulo 5 para más información).

4.1 Técnicas de control sísmico

Desde que el ser humano comprendió que la Tierra se movía y que podía causar serios desastres en la superficie terrestre, éste se ha dedicado a buscar la manera de prevenir sus efectos. Es por ello que en la actualidad existen diferentes técnicas que, dependiendo de su ubicación en la estructura, aíslan o reducen la energía sísmica que ingresa a ella.

Éstas tecnologías originalmente estaban dirigidas para edificios altos como torres y rascacielos, pero al aumentarse su comercialización, su aplicación se extendió hacia los edificios medianos. Para regularizarlos, la Organización Internacional de Estándares (ISO por sus siglas en inglés) establece en la ISO 3010:2017 las *“Bases para el diseño de estructuras sometidas a acción sísmica”*¹ y los clasifica en sistemas de control: pasivo, activo, semiactivo e híbrido.

Los primeros se refieren a que *“no requieren una fuente externa de potencia”*, es decir, no necesitan energía para funcionar ya que absorben las fuerzas producidas por el movimiento. Inversamente, los de control activo requieren una fuente externa de potencia, como actuadores y sensores. Por otra parte, los semiactivos requieren una menor energía que los activos y *“no suministran energía mecánica a la estructura”* mientras que los de control híbrido utilizan una combinación de sistemas pasivos y activos (Gómez, Marulanda, Thomson, 2008, pp. 80, 81).

Es así que, para propósito de este trabajo de investigación, solo se abordaran los sistemas de control pasivo por no requerir energía externa ni incrementar la inversión, que es precisamente lo que en ocasiones impide su inclusión en proyectos.

Estos sistemas se clasifican en dos: aisladores de base y disipadores, los cuales se abordaran a continuación para conocer el funcionamiento de cada uno.

¹ Bases for design of structures - Seismic action on structures

4.1.1 Aisladores de base

Los aisladores sísmicos o aisladores de base son dispositivos que se encargan de eliminar las fuerzas horizontales a partir de desligar el edificio del movimiento del suelo, reduciendo con ello la acción del sismo. Se colocan entre la cimentación y la estructura de un inmueble y se dividen en: elastomericos y de deslizamiento.

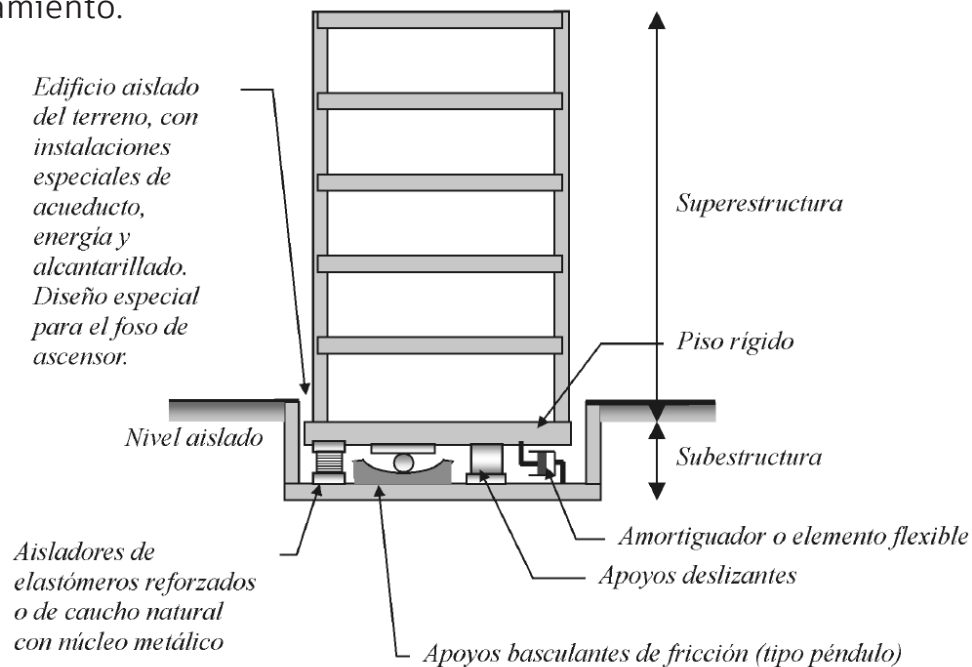


Figura 4.1 Muestra la ubicación de los aisladores de base.

Fuente: Oviedo, y Duque, 2006, p. 110

García (2017, p. 7) señala que su efectividad parte de la flexibilidad del dispositivo ya que esto permite cambiar el periodo fundamental de vibración del inmueble añadiendo diferentes niveles de amortiguamiento y generando una reducción tanto en las aceleraciones espectrales como en los desplazamientos.

Wagner (2017, p.12) coincide y además señala que la eficacia de la reducción de las aceleraciones depende de la cantidad de energía que el sistema de aislamiento pueda absorber y disipar.

No obstante, un factor importante a considerar es el tipo de suelo ya que para mejorar sus beneficios se recomienda que las edificaciones reposen en suelo firme y que tengan periodos de vibración menor o iguales a un segundo (García, op. cit., p. 8).

Para ilustrar esto, García (op. cit., p. 8) realizó una comparativa de un inmueble aislado sobre suelo blando que, como se vio en el capítulo uno, corresponde a un periodo de 2 seg. y otro en suelo duro con periodo de 0.51 seg. con ello demostró que aquel ubicado en suelo firme logró reducir más las aceleraciones que el aislado en suelo blando.

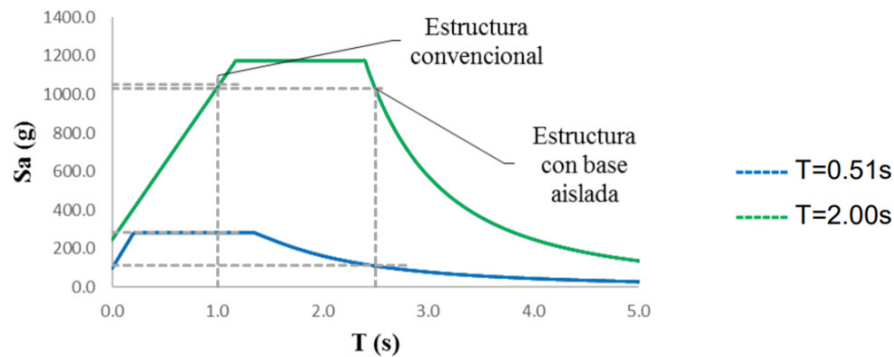


Gráfico 4.1 Comparativa entre un edificio con aislamiento en suelo blando (2.00 s) y suelo firme (0.51 s). Fuente: García, op.cit., p. 8.

Este hecho podría responder la pregunta del por qué no se aplican este tipo de sistemas en la Ciudad de México, sin embargo, hay que recordar que existen tres tipos de suelo en ella, uno el cual es esencialmente firme (zona I) y en donde bien podrían incorporarse estas técnicas ya que el sismo también afecta esas regiones.

Por ello, en el presente documento se tomarán en cuenta como métodos de control sísmico que podrían ser aplicados en la capital, sin embargo, se abordaran de manera general al tener impedimentos de incorporación en la zona III.

4.1.1.1 Elastoméricos

Dentro de los aisladores de base elastomericos existen tres tipos que dependen del material con el que están fabricados, los cuales son: caucho natural, caucho natural con núcleo de plomo y capas de caucho intercaladas con placas de acero.

De acuerdo a Pradilla y Chio, el de caucho natural fue el primer aislador sísmico que se diseñó, el cual era económico (comparado a otros sistemas) pero no muy práctico pues solo conseguía un 15% de amortiguación y requería la incorporación de otro método de control (2012, pp. 108-109).

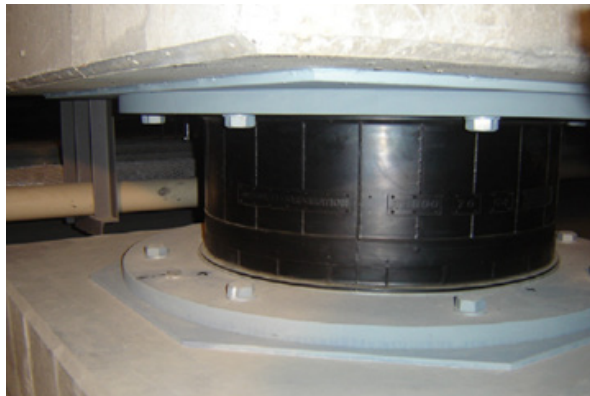


Figura 4.2 Aislador elastomérico de caucho natural.

Fuente: Genatios, y Lafuente, op. cit., p. 56

Con el propósito de perfeccionarlo, se optó por introducir en el centro un corazón de plomo que mejorara la disipación de energía en donde para sismos pequeños absorberá la fuerza sísmica manteniendo la rigidez de la estructura, mientras que para sismos mayores iniciará un proceso de deformación en el cual las capas de caucho comenzaran a actuar absorbiendo parte de los esfuerzos, amortiguando con ello entre un 15% y 35% a la estructura (Pradilla y Chio, op. cit., pp. 108-109).

Cabe señalar que para que éste sea efectivo y se logre la uniformidad del mismo, el hueco del núcleo debe ser menor a su diámetro real para que el elemento de plomo entre a presión en las capas del caucho (Pradilla y Chio, op. cit., p. 109).

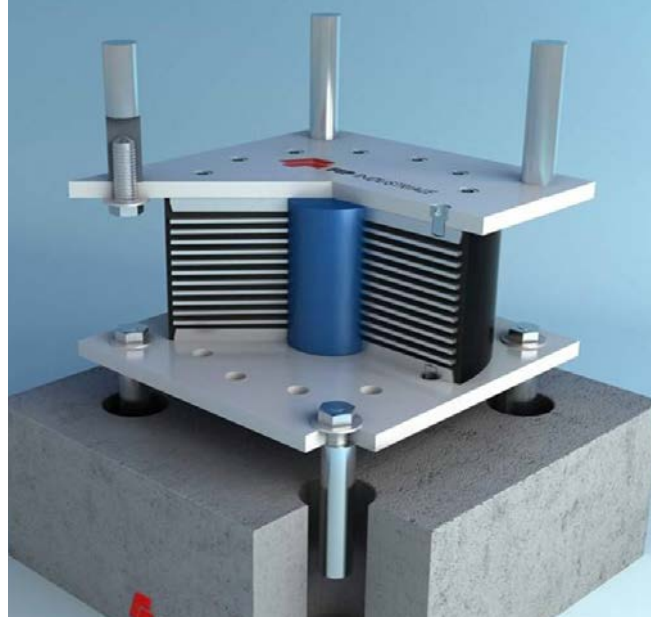


Figura 4.3 Aislador elástico de caucho con corazón de plomo.
Recuperado 2020 de <http://www.sismica.cl>

Ahora bien, el tercer tipo de aislador está compuesto por capas de caucho intercaladas con placas de acero, en donde el caucho está mezclado con carbón extra fino, aceite o resina. Se conocen como aisladores de alto amortiguamiento o High Damping Rubber Bearings (HDRB por sus iniciales en inglés) y logran proveer a la edificación un amortiguamiento mayor al 15% (García, op.cit., p. 21).

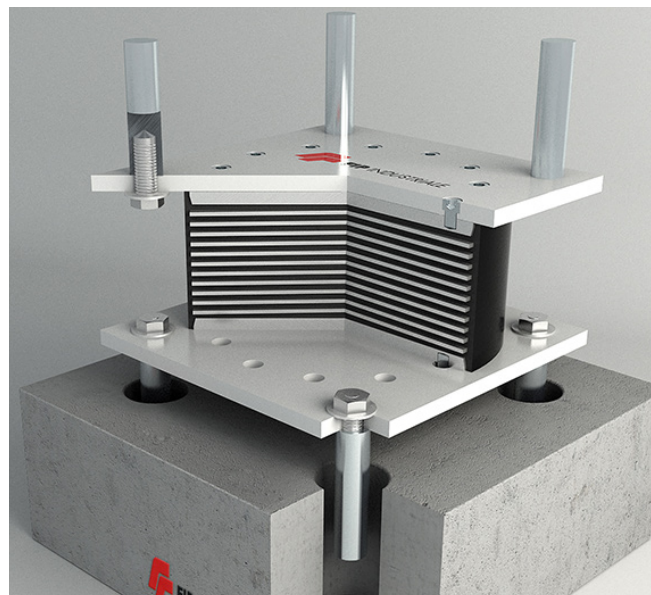


Figura 4.4 Aislador elástico de alto amortiguamiento (HDRB).
Recuperado 2020 de <http://www.sismica.cl>

4.1.1.2 De deslizamiento

Otro tipo de aisladores de base son los de deslizamiento que consisten en dos placas metálicas colocadas una en la cimentación y otro en la base de la estructura y, al igual que los elastómeros, su desplazamiento permite aislar el movimiento del suelo hacia la estructura.

Existen de dos tipos: el de placa lisa y el de superficie curva. No obstante, el primero se activa por medio de fusibles por lo que no forma parte de los sistemas pasivos y por ello se omitirá en el documento.

En cuanto al segundo, éste genera un movimiento mecánico pendular por lo cual también se conoce como Sistema de Péndulo de Fricción (FPS por sus siglas en inglés). Su rango de amortiguamiento varía entre 10% a 40% y las planchas de acero al tener un recubrimiento de teflón requieren un mantenimiento mínimo (Pradilla y Chio, op. cit., pp. 108-110).

En cuanto a su funcionamiento, este dispositivo tiene una “base cóncava sobre la que se coloca un patín esférico articulado y una platina de cubierta” que ante una fuerza se desplazará de forma horizontal, pero al finalizar logrará regresar a su posición original (Oviedo y Duque, 2006, pp.110, 111).

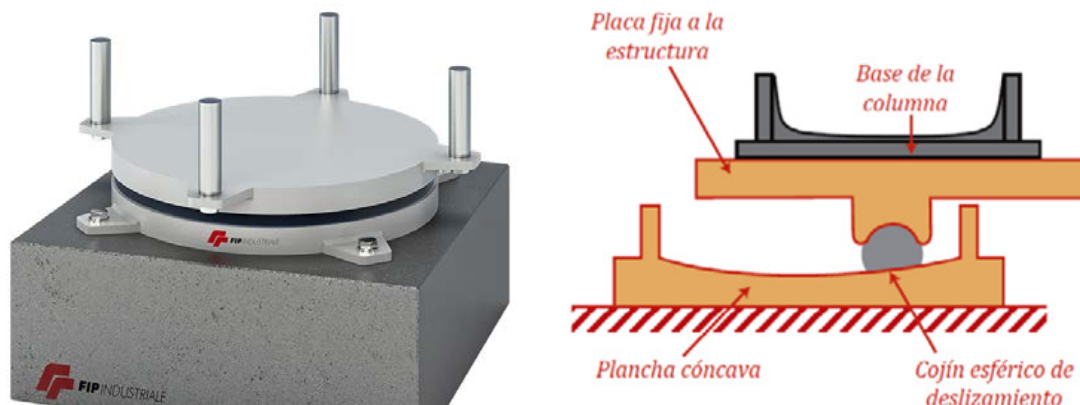


Figura 4.5 Aislador de péndulo de fricción. Fuente: Genatios, y Lafuente, op. cit., p. 56

Su eficacia depende del radio de la base curva ya que esto controlará “la rigidez efectiva del aislador y el periodo de oscilación de la estructura, reduciendo la torsión al mínimo al coincidir el centro de rigidez de los rodamientos con el centroide del elemento estructural de apoyo” (Pradilla y Chio, op. cit., pp. 108-110).

4.1.2 Disipadores

Los disipadores, a diferencia de los aisladores sísmicos, son elementos que suelen instalarse en la parte superior y visible de la edificación. Tienen como propósito disminuir la energía sísmica que ingresa a la estructura y pueden incluirse tanto en edificios nuevos como en viejos al ser un método complementario para reforzar el inmueble.

Estos dispositivos se dividen en: histeréticos metálicos, viscoelásticos, de fluidos viscosos y de masa sintonizada (TMD), no obstante, a continuación, solo se verán los primeros por ser más accesibles y económicos que los últimos dos, los cuales se han utilizado ampliamente en torres y rascacielos.

Entre las ventajas de los histeréticos y viscoelásticos están la *“reducción de la demanda sísmica en la estructura principal y la concentración del daño en puntos y elementos estratégicos fáciles de sustituir después de un evento significativo”*. Además, al aumentar la rigidez protege a los elementos no estructurales como muros y acabados (Oviedo y Duque, op. cit., pp. 114-115).

A continuación, se abordarán con más detalle.

4.1.2.1 Histeréticos

Los disipadores histeréticos también llamados amortiguadores metálicos de fluencia, aprovechan las propiedades de deformación inelástica del material que lo conforma, los cuales pueden ser de acero, plomo o con memoria de forma que logran identificar el esfuerzo mecánico del dispositivo (Instituto Mexicano del Cemento y Concreto [IMCYC], 2011, p. 82) .

Su comportamiento se modela a partir de curvas fuerza-desplazamiento y entre los más utilizados se encuentran los tipos ADAS (nombrado así por las siglas en inglés de Added Damping and Stiffness) y los tipos TADAS (nombrado así por Triangular Added Damping and Stiffness).

De acuerdo a Genatios y Lafuente (2016, pp. 118-120) estos instrumentos añaden tanto amortiguamiento como rigidez a la edificación, se calculan a través de ciclos de histéresis y tienen las siguientes características:

- ADAS: Son placas que en la parte frontal se ven como X pero de manera lateral parecen una I, disipan la energía sísmica a partir de la deformación de sus placas de acero y para su diseño se necesita conocer “la rigidez, fuerza límite de cedencia y el desplazamiento correspondiente a la fuerza de cedencia”.

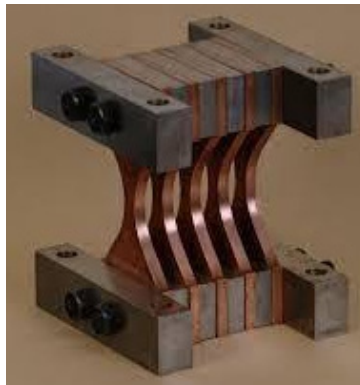


Figura 4.6 Disipador ADAS.

Fuente: Oviedo, y Duque, 2006, p. 113

- TADAS: Placas triangulares, similares a los ADAS, que en un extremo están soldados a un tubo externo rígido mientras que en el extremo contrario las placas quedan libres, son sometidos a esfuerzos de flexión y se deforman en curvatura simple.



Figura 4.7 Disipador TADAS.

Fuente: Oviedo, y Duque, 2006, p. 113

4.1.2.2 Viscoelásticos

A diferencia de los anteriores, los disipadores viscoelásticos son dispositivos metálicos que funcionan a través de la incorporación de fluidos elásticos como: siliconas, aceites o polímeros que al ser deformados por las fuerzas de cortante reducen la energía sísmica (Oviedo y Duque, op. cit., p. 114).

Lo anterior lo logran a través de su composición en forma de riostra diagonal que logra minimizar el movimiento al deslizarse las placas de acero con el material viscoelástico. Se coloca de manera externa, fuera de la estructura primaria del edificio, para permitir que ésta permanezca dentro del módulo elástico para evitar daños por el sismo (Genatios, y Lafuente, op. cit., pp. 121-123).

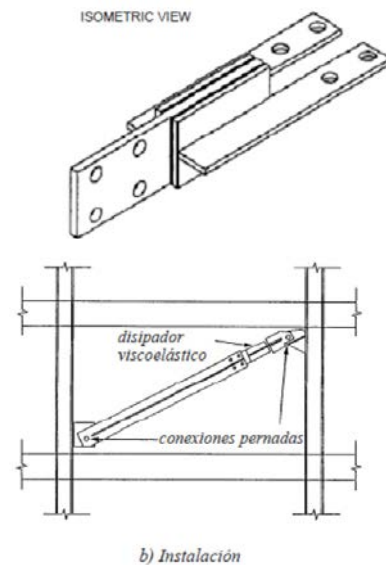


Figura 4.8 Disipador viscoso.

Fuente: Derecha Oviedo, y Duque, 2006, p. 113; Izquierda <http://www.nuyuntek.cl>

Una desventaja de esta aplicación es que los fluidos suelen ser “sensibles a los cambios de temperatura, frecuencia y deformación y resulta necesario minimizar la influencia de esta variable en su rango de servicios” para que la edificación pueda tener un comportamiento predecible. A su vez, para que funcione requiere la instalación de un gran número de dispositivos para evitar un comportamiento resonante (Palacios, 2009, pp. 32-35).

4.2 Técnicas de control sísmico utilizadas en países sísmicos

Como se vio en el capítulo 1, los edificios con alturas entre 5 a 12 niveles ubicados en la zona III de la Ciudad de México han sido los que más fallas y colapsos presentaron ante los eventos sísmicos de 1957, 1985 y 2017, lo que señala una problemática en esta área y en este tipo de inmuebles que no ha sido abordada en su totalidad.

Ya que, si bien la reglamentación en la capital ha ido perfeccionándose, el número de edificios que utilizan técnicas de control sísmico es muy bajo. Por ello, para alentar su uso, se cita a continuación el estado actual de estas técnicas en países como Chile y Japón, así como en la Ciudad de México.

4.2.1 Técnicas utilizadas en Chile.

Chile es un país de América del Sur que se encuentra sobre la Placa Sudamericana la cual colinda con la Placa de Nazca. Se localiza dentro del Cinturón de Fuego y, al igual que México, su contacto entre placas está en continua interacción lo que ha ocasionado que se desarrollen un sinnúmero de sismos en el país.

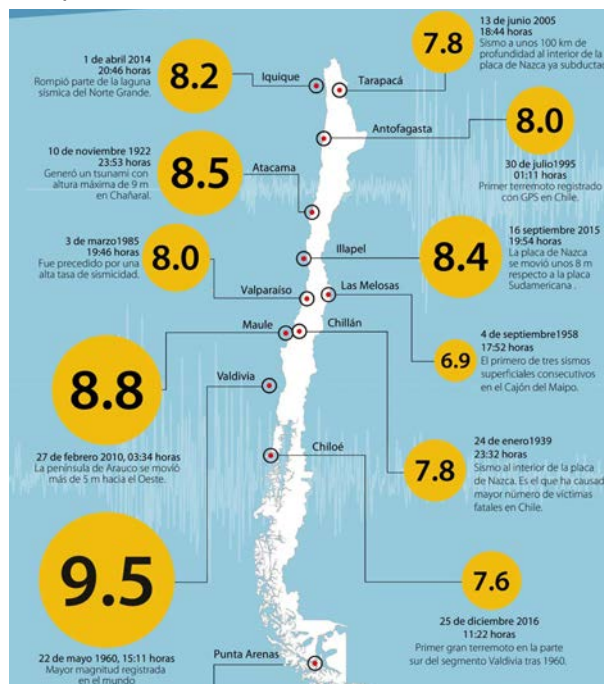


Figura 4.9 Muestra los terremotos que ha experimentado Chile. Recuperado 2020 de CSN UChile

Como se puede ver en la imagen anterior, el sismo más fuerte de la se originó en 1960 en Valdivia con 9.5° Richter y el de 2010 en Maule con 8.8° Richter.

Si se analizan los efectos destructivos de ambos eventos, se puede recopilar que en el primero se originaron 5000 decesos, contrario a los 512 que se desarrollaron 50 años después en el de Maule (datos recopilados de Lazo, 2008, p.64 y Organización Panamericana de la Salud, 2010, pp. 14-17).

Esto tiene relación con la diferencia de la magnitud del fenómeno, pero también puede implicar que las pautas utilizadas para disminuir el efecto sísmico han sido efectivas, de hecho, al analizar su reglamento de construcción se pueden notar sus continuos esfuerzos por mejorar la respuesta estructural de los inmuebles ante este tipo de situaciones.

Es así que Chile actualmente tiene uno de los reglamentos más completos a nivel internacional, al contar con tres normas referentes a este fenómeno los cuales son (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2017, p. 5) :

- Norma Chilena 433 (NCh433): Hace referencia al diseño sísmico en las edificaciones
- Norma Chilena 2745 (NCH2745): Aborda el diseño de edificios con aislamiento sísmico
- Norma Chilena 2369 (NCH2369): Establece el diseño sísmico para edificaciones industriales

La utilización de estas pautas puede entreverse en la investigación realizada por Llera, Vásquez, Poulos y Favier (2015) que demostraron que en este país se encontraban por lo menos 64 edificios con algún tipo de control sísmico, de los cuales 75% utilizaba aislamiento sísmico de base, 18% disipadores de masa sintonizada (TMD), 7% otro tipo de sistema de disipación y 1% un dispositivo semiactivo (p.19).

A su vez, la investigación de Llera et. al. (op. cit., p.19-20) resaltó que los edificios en los cuales se implementaron más este tipo de técnicas fue en construcciones medianas ya que 39 de las 64 muestreadas tenían alturas entre 1 a 11 niveles, siendo los inmuebles con 5 y 7 pisos los que más presentaron algún tipo de control sísmico al concentrar el 20% de la muestra junto con aquellos de 11, 6 y 9 niveles que a su vez representaban el 20% al contar cada uno con cuatro edificios estructurados con esos métodos.

Lo anterior demuestra que Chile no solo es un país interesado en mejorar el comportamiento sísmico de las estructuras sino también en implementarlo en edificios medianos, lo cual contrasta con la situación actual de México en donde los edificios con algún tipo de control sísmico son, por lo general, torres de gran altura.

Además de lo presentado anteriormente, también se puede observar que el reglamento chileno es más preciso que el de México, ya que si bien las NTCDS-2020 cuentan con el Apéndice B que hace referencia a edificios con disipadores de energía sísmica, si se hace mención en el capítulo 12 de las normas (p.91) que no se incluyen en el mismo recomendaciones para estructuras con aislamiento sísmico en su base.

En el caso de los edificios industriales, en el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad Mexicana [CFE], en el capítulo C.1.3, sección 3.12 si hace referencia al aislamiento sísmico y a los disipadores de energía. No obstante, las recomendaciones allí señaladas son primordialmente para estructuras del sector energético, lo que representa un problema de conversión y aplicación si quiere utilizarse para otro tipo de estructuras.

4.2.2 Técnicas utilizadas en Japón.

Otro país que tiene alta actividad sísmica y se encuentra en el Cinturón de Fuego es Japón. Ubicado en Asia Oriental, se encuentra sobre las Placas Euroasiática y Okhotsk, al tiempo que colinda con la Placa del Pacífico, Filipinas y Amur.

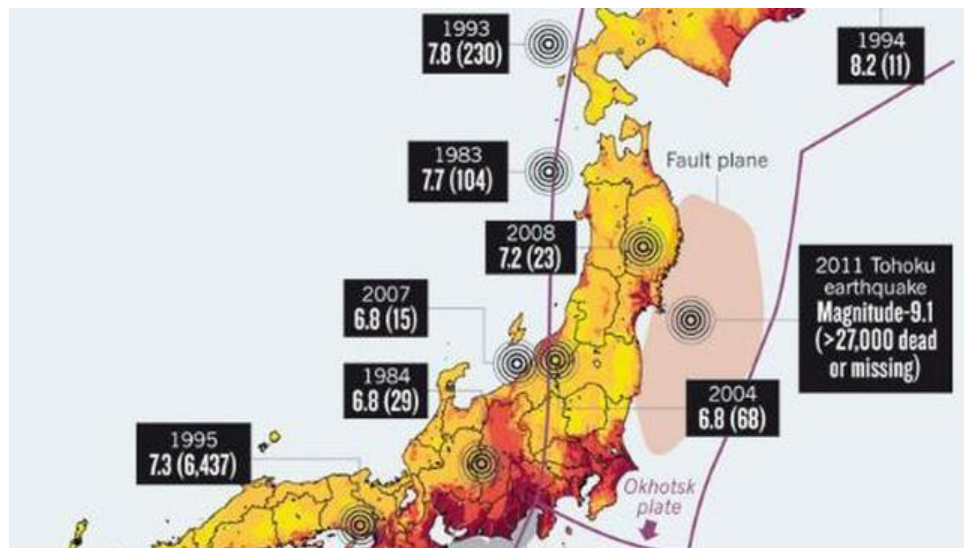


Figura 4.10 Ilustra los terremotos desarrollados en Japón.

Recuperado 2020 de CSN <https://www.abc.es>

Como puede verse en la imagen anterior, al igual que Chile, este país a lo largo de su historia ha experimentado sismos de gran intensidad, entre ellos el de Tohoku-Oki del 2011 de magnitud 9.1° que causó el fallecimiento de 15, 844 habitantes y uno de los más antiguos, el de Kanto de 1923 de 7.8 grados que causó serios daños en Tokio y sus regiones circundantes causando un total de 91,344 muertes (Okazaki, 2012, p. 3) .

De hecho, el impacto social, económico, político y constructivo del sismo de Kanto cambió tanto la perspectiva en Japón que a partir de 1924 se introdujo al reglamento de construcción las primeras regulaciones de diseño sísmico, no obstante, su aplicación solo se limitaba a algunas zonas.

El cambio sustancial llegó hasta la actualización de 1981 cuando se incorporaron nuevos estándares en los que se establecía que los edificios debían de resistir un sismo entre 6 a 7 grados de magnitud.

Es así que para diferenciar los edificios se denominó Kyu-Taishin (anteriores) a aquellos que no contaban con cálculos sísmicos mientras que aquellos que si lo consideraban y habían sido construidos a partir de 1981 se denominaron Shin-Taishin (nuevos) (Real Estate Japón, 2017).

La confirmación de que se había mejorado el reglamento llegó en 1995 tras el sismo de 6.9° en Kobe, en el cual colapsaron 104,906 edificios, la mayoría Kyu-Taishin. Esto originó que en ese mismo año se creara la Ley de Rehabilitación Sísmica de Edificios, en donde se promovían técnicas como prolongar las paredes de concreto armado y de acero para dotar de rigidez la estructura así como utilizar un dispositivo de control sísmico o revestir las columnas con materiales como: acero, concreto y polímeros reforzados con fibra (Hasegawa, 2013, pp. 178-192).

Lo anterior contrasta con la regulación en la Ciudad de México ya que en Japón la norma que fue creada en 1995, no se creó en la capital hasta el sismo del 2017 (NTRCSEE) cuando se evidenció que el 90 por ciento de los edificios colapsados habían sido construidos antes de 1985 (ver subtema 1.3.1.3).

Esto demuestra un rezago a nivel constructivo que no ha sido capaz de categorizar los inmuebles que cuentan con diseño sísmico y los que no, pues éstos siguen estando vulnerables a experimentar un comportamiento inadecuado ante futuros eventos.

Sin embargo, a diferencia de Chile, así como México, Japón aún no establece como obligatoria la construcción de edificios con dispositivos de amortiguación, aunque en su reglamentación si asigna una graduación que señala el tipo de control sísmico que deberán de incluir los inmuebles de acuerdo a su altura. Esta clasificación, de acuerdo al Japón Property Central (2011), es la siguiente:

- Taishin: Es el sistema que se basa en el reglamento de construcción japonés y que ofrece una resistencia básica por sismos, suele utilizarse en edificios de poca altura y no considera la utilización de algún método de amortiguación sísmica.

- Seishin: En este sistema si se ofrece un control de vibración, no es obligatorio por ley, pero suele recomendarse en edificios altos, utiliza contraventeos y disipadores los cuales absorben una parte de la energía sísmica reduciendo el movimiento.

- Menshin: Este sistema se considera el más seguro de los tres, al igual que el anterior, no es obligatorio. Suele utilizarse en torres y rascacielos al incorporarse aisladores sísmicos.

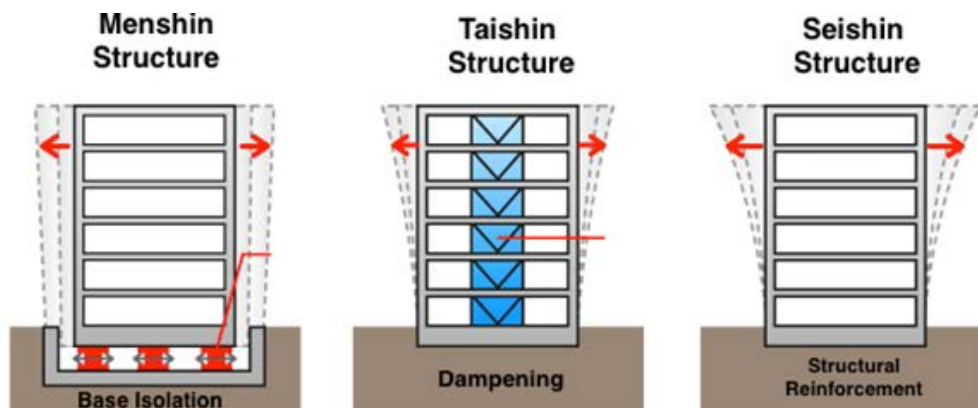


Figura 4.11 Graduación de asignación sísmica en Japón.

Recuperado 2019 de Japón Property Central, 2011

Varios ejemplos pueden citarse de la clasificación Menshin como: la Tokyo Skytree Tower, Ark Hills Sengokuyama Tower y Mori Tower que son rascacielos con aislamiento de base, no obstante, existen también construcciones pequeñas que utilizan estos dispositivos como Fa-Bo que es un laboratorio con oficinas de tres pisos y Television House que es una casa de dos pisos.

4.2.3 Técnicas utilizadas en la Ciudad de México.

Como se vio en el capítulo uno, al igual que en Chile y Japón, los sismos dentro de la República Mexicana son eventos muy recurrentes, por ejemplo, tan solo en el año 2018 se desarrollaron 3033 sismos mayores a 4.0° , lo que evidencia la cotidianidad del fenómeno. Por eso, tras los efectos destructivos suscitados por los sismos de 1957, 1985 y 2017, el diseño y cálculo sísmico ha ido perfeccionándose, sobre todo aquel referente a reglamentación.

No obstante, en relación a los métodos de control sísmico como los aisladores que se utilizan en Japón y Chile, son muy pocos los edificios dentro de la Ciudad de México que cuentan con sistemas de control.

De hecho, fue a partir de los años 70s cuando se inició la aplicación en la capital de este tipo de técnicas las cuales se instalaron en una iglesia, en la prensa de un periódico, en dos estructuras industriales, en dos puentes, para rehabilitar un hotel y en una escuela secundaria de cuatro niveles (Wagner, op. cit., p.12) .

Referente a esta última, la Escuela Secundaria Diurna N. 168 se encuentra en la zona III de la Ciudad de México, reposa sobre un cajón de cimentación de 2.50 metros de profundidad que a su vez está apoyado sobre pilotes de concreto. Su estructura es de marcos rígidos de concreto reforzados con contraventeos de acero, tiene losa de acero y muros de mampostería (Máximo, 2007, pp. 91-100).



Figura 4.12 Escuela Secundaria Diurna N. 168 con contraventeos. Fuente: Máximo, 2007, pp. 92

Su sistema de control es un aislador deslizante de superficie curva que se encuentra empotrado entre el dado de la cimentación y la estructura, y como se vio en el inciso 4.1.1.2, es por el balín de acero que reduce el movimiento sísmico.



Figura 4.13 Tipo de aislador de superficie curva con el que cuenta la Escuela Secundaria Diurna N. 168. Fuente: Máximo, op.cit., p. 92

Ésta escuela fue de las primeras aplicaciones de control en México, sin embargo, desde entonces el uso de aisladores no ha incrementado. Esto lo respalda el estudio realizado por Tena (2016, pp. 3 y 4) que, hasta mediados del 2016, en el país solo se contaban con 23 proyectos de aislamiento sísmico construidos de los cuales 17 eran edificios, 5 puentes y uno de maquinaria. De estos 23, solo 9 edificios se encuentran en la Ciudad de México (tomando en cuenta los mencionados anteriormente).

Por el contrario, una técnica que si se utiliza con más frecuencia dentro de la capital son los amortiguadores o disipadores que, como se vio en el subtema 4.1.2, se encargan de disipar la energía sísmica, reducir las demandas de desplazamiento y las fuerzas internas de respuesta del edificio (IMCYC, op. cit., p. 20)

Es así que este sistema se ha incorporado en las Torres: Mayor, Panorama, Impulso, Libertad, Altus, Bosques Residencial 1 y 2, Mural, Milán, Ámsterdam y Barcelona. También se incorporaron en las reestructuraciones del Hospital de Cardiología del Centro Médico Siglo XXI, en las Oficinas Centrales del IMSS, en el edificio Torre Monterrey y en el edificio SAGAR (Arce, 2013, p.49-51, p.68-69)



Figura 4.14 Edificios en México con disipadores en su estructura.

Fuente: Arce, 2013, p. 51

Otro método de control sísmico de nueva aplicación en la capital y el país es la de muros de concreto aparente con aperturas en forma de “Tetris” ubicadas en distintas partes de su altitud, que modifica la resistencia de los mismos y que funcionan como ventanas y grietas diseñadas.

El propósito de estas “grietas” es que ayuden a disipar las ondas telúricas, reducir la rigidez de la estructura y liberar la energía sísmica introducida a la edificación al tiempo que le dan distinción estética a la fachada (CEMEX, 2015).




Figura 4.15 Muros aparentes con grietas tipo Tetris en Torre Reforma.

Fuente: <https://www.torrereforma.com/>

Su utilización fue incorporada en la Torre Reforma, uno de los proyectos sismorresistentes icónicos de la Ciudad de México que en el 2018 ganó el International Highrise Award, distinción que solo se otorga a los rascacielos más innovadores del mundo debido a su trascendencia para la arquitectura e ingeniería mundial.

Es así que de lo anterior puede inferirse que sí existen técnicas de control sísmico para edificios en la Ciudad de México, no obstante, estos se han limitado de manera general a edificios gubernamentales, torres y rascacielos, no solo porque su colapso representa un mayor riesgo para la población sino también porque manejan mayor inversión que los edificios medianos.

Lo que demuestra un área de oportunidad por mejorar ya que los edificios de mediana altura, sobre todo aquellos dirigidos a vivienda suelen ser más vulnerables a los efectos sísmicos como se vio en el capítulo 1, debido a que en ocasiones no cumplen los criterios de regularidad estructural y también porque no suelen incluirse en ellos técnicas de control para mejorar su comportamiento sísmico.



**Capítulo 5:
Aplicación de criterios
y técnicas en la
elaboración de un proyecto
sismorresistente**

5 Aplicación de criterios y técnicas en la elaboración de un proyecto sismorresistente

En los capítulos anteriores se habló del origen de los sismos, los efectos que causa en las construcciones, los criterios de diseño que establece la NTCDS-2020 de la Ciudad de México y algunas técnicas dirigidas a reducir su impacto para mejorar el rendimiento de las edificaciones ante eventos de magnitud considerable. No obstante, hasta el momento no se han abordado las repercusiones que tiene cada uno de los apartados en el proyecto arquitectónico.

Es por ello que, en este capítulo, se abordarán algunas sugerencias que debe tomar en cuenta el proyectista al momento de proponer la utilización de técnicas de control sísmico ya que éstas pueden influir tanto en el programa arquitectónico como en su diseño final.

Finalmente, en base a los criterios mencionados y retomando datos abordados en el documento, se elaborará un caso práctico en el cual se realizará una comparativa entre una estructura aporticada, dual e irregular para verificar cual presenta mayores ventajas tanto en el desempeño sísmico como en el proyecto arquitectónico.

5.1 Criterios a considerar en el proyecto arquitectónico al proponer técnicas de control sísmico

En el capítulo 4 se abordó el material, funcionamiento, ventajas y desventajas de algunas técnicas de control pasivo que tienen como objetivo reducir los efectos del sismo en la edificación, no obstante, un punto que no se abordó fueron los criterios que el arquitecto deberá considerar en su diseño al incluir estas técnicas.

Por ello, a continuación, se realizarán algunas consideraciones que propone la autora y que vale la pena señalar en cuanto a la inclusión de los aisladores de base y disipadores dentro de un proyecto.

5.1.1 Inclusión de los aisladores de base en el proyecto arquitectónico

Los aisladores de base, como se mencionó en el capítulo tres, son dispositivos que cambian el periodo fundamental de vibración del suelo, reduciendo las aceleraciones y desplazamientos de la edificación ante movimientos telúricos. De hecho, ha sido por su efectividad en estos casos que su aplicación ha ido en aumento en países sísmicos como Chile y Japón.

No obstante, su incorporación en México se ha visto muy limitada debido a las pocas empresas que distribuyen estos dispositivos¹ en el país y por el desconocimiento de su utilidad y funcionamiento fuera de la comunidad estructural.

Sin embargo, su aplicación debería de impulsarse pues, como se vio en el capítulo uno, en la República Mexicana existen: 4 fallas geológicas distribuidas a lo largo de la costa del pacífico; además de la trinchera mesoamericana y la brecha de Guerrero, lo que la convierte en un país altamente sísmico (ver subtema 1.3 para más información).

¹ En una búsqueda preliminar, solo se encontraron 5 empresas extranjeras que fabrican y venden algún tipo de aislador de base en México.

De manera que para promover su uso y retomando lo analizado en el capítulo 3, la autora del presente documento señala los siguientes criterios técnicos que deben considerarse previo a su incorporación:

- De acuerdo a las NTCDS, cualquier aislador de base requiere ser analizado en un laboratorio antes de ser utilizado en un edificio

- En la Ciudad de México, su incorporación en edificios mayores a 5 niveles tiene que ser revisada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM para aprobar su construcción y obtener un dictamen

- Todo proyecto que lleve aisladores de base requiere ser revisado por un método de análisis dinámico

- Los aisladores deben colocarse en suelos cuyos periodos de vibración sean menor o iguales a un segundo para reducir efectivamente las aceleraciones. Para conocer estos periodos en una ubicación determinada, se pueden utilizar los valores del SASID¹.

- Los aisladores de base funcionan mejor en edificaciones desplantadas en suelo firme que en suelo blando, por lo que funcionaria de manera óptima en la zona I de la Ciudad de México.

- En estructuras flexibles, los aisladores de base no funcionan correctamente. Por el contrario, su función se potencializa en estructuras rígidas.

- Los edificios que utilicen estos dispositivos requieren espacios entre colindancias mayores a lo que establece el reglamento² debido al deslizamiento horizontal inicial.

- Se desaconseja el uso de los deslizadores de placa lisa no solo porque requieren fusibles para funcionar sino porque, ante un sismo fuerte, las placas no regresarán a su posición de equilibrio original, perjudicando elementos como tuberías, elevadores y escaleras.

1 Ver subtema 2.11

2 Ver capítulo 2 para más información

- La efectividad de los sistemas de deslizamiento de superficie curva se basa en el radio de la curva ya que está reduce la torsión cuando coincide su centro con el centroide del elemento estructural de soporte, por lo cual se recomienda tener especial atención en este aspecto.

Ahora bien, de acuerdo a la autora, las consideraciones que deben de tomarse en cuenta, y que influyen directamente en el diseño del proyecto arquitectónico son las siguientes:

- Independientemente del tipo de aislador que se vaya a poner, es importante que se ponga a nivel de la superficie del terreno, entre la cimentación y la estructura, como se ilustra en la figura.

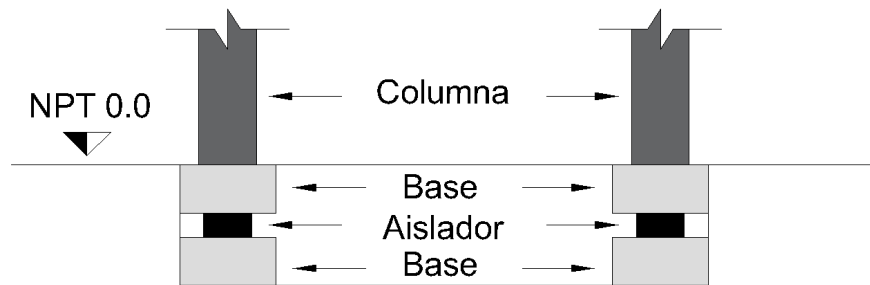


Gráfico 5.1 Diagrama de la ubicación de los aisladores. Fuente: Creación de la autora.

- Los aisladores elastoméricos requieren una base en la que se apoyarán, tipo dado, que deberá ponerse también en la base de la columna, es decir, en la unión de los dos elementos (ver figura anterior).

- Los aisladores de superficie curva necesitan también una base en donde se colocarán, pero no precisan la base superior ya que estos van unidos a la columna.

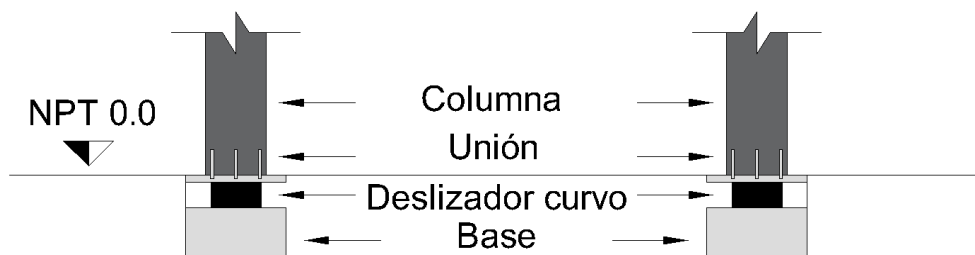


Gráfico 5.2 Diagrama de la unión de los deslizadores curvos con la columna.

Fuente: Creación de la autora.

• Todos los dispositivos requieren mantenimiento y monitoreo tras un sismo fuerte, por lo cual no pueden ponerse embebidos en concreto. De allí que se requiera incluir un espacio para que el técnico ingrese a revisarlo y una escalera para acceder a él. Es decir que, si no se estaba considerando un sótano, esté tendrá que añadirse el proyecto arquitectónico y el arreglo podría quedar como se ve en el siguiente diagrama:

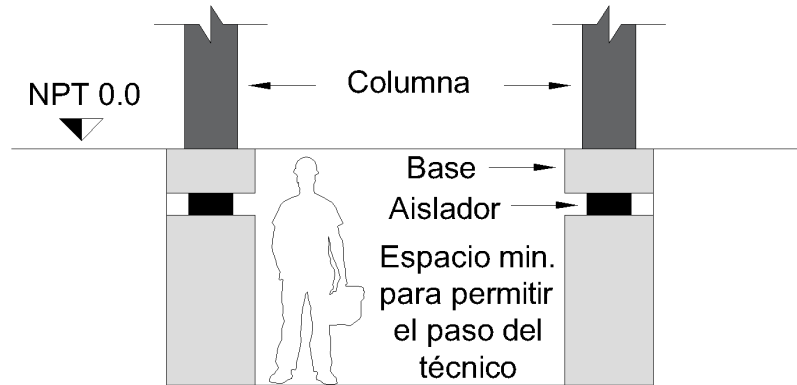


Gráfico 5.3 Diagrama del aislador con sótano para revisión.
Fuente: Creación de la autora.

• En el caso de los edificios con estacionamiento subterráneo, el sótano podrá omitirse ya que el espacio de revisión estará considerado en la altura del sótano y se pondrán como se ilustra a continuación:

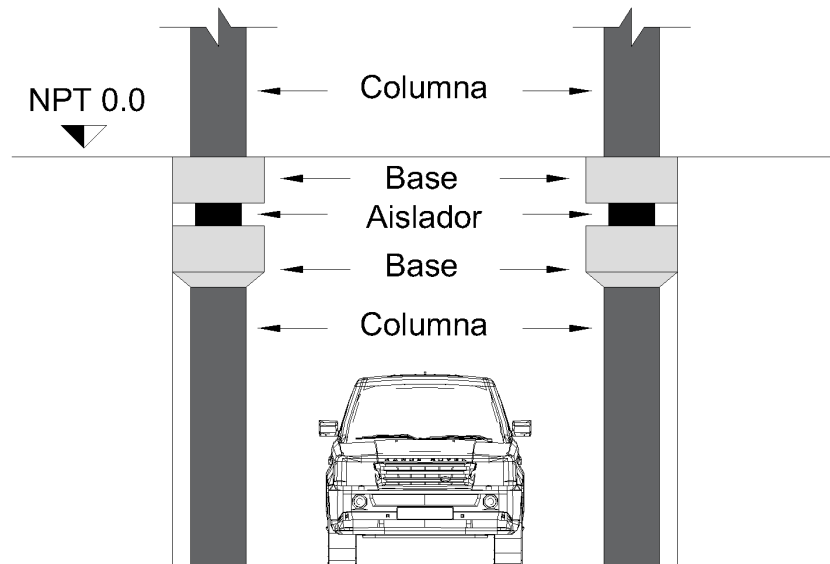


Gráfico 5.4 Diagrama del aislador ubicado en un estacionamiento subterráneo.
Fuente: Creación de la autora.

5.1.2 Inclusión de los disipadores en el proyecto arquitectónico

Los disipadores o amortiguadores, a diferencia de los aisladores sísmicos, tienen el objetivo de disminuir la energía sísmica que ya ingresó en la edificación, y por ello son elementos que suelen instalarse en la parte visible de la estructura, es decir, en la envolvente del edificio.

Suelen usarse más en México que los aisladores de base y, de acuerdo a la autora del documento, para su incorporación deben considerarse los siguientes criterios generales:

- Tiene alta efectividad en las estructuras al evitar que ingresen las fuerzas sísmicas, amortiguando las que ingresan y deteniendo el movimiento de manera casi inmediata

- Son dispositivos fáciles de sustituir, por lo que requieren que se coloquen en espacios accesibles para mantenimiento y monitoreo.

- Dependiendo del tipo de disipador y los requerimientos, se pueden incorporar tanto en edificios nuevos como viejos ya que también sirven para reforzar la estructura.

- Por lo general, los disipadores deberán ser instalados en grupo para evitar que se produzca el efecto de resonancia.

- Los disipadores TADAS y ADAS son dispositivos que deben enlazarse por medio de perfiles de acero.

- Los disipadores viscoelásticos al tener fluidos en su interior suelen ser sensibles a los cambios de temperatura, frecuencia y deformación, lo que debe controlarse previa colocación para que tengan un comportamiento predecible.

- Los disipadores viscoelásticos no requieren mantenimiento después un temblor. Se coloca de manera externa de la estructura y dependiendo su arreglo pueden verse como un grupo de X o V en las fachadas.

En cuanto a los criterios que deben de tomarse en cuenta, y que influyen en el diseño del proyecto arquitectónico, la autora señala lo siguiente:

- Su ubicación puede ser en la fachada principal, en la lateral o en ambas, la disposición la establecerá el calculo estructural
- Al contrario de los aisladores, estos suelen colocarse en la parte superior de la estructura como arreglos diagonales o en forma de cruz como en los siguientes esquemas:

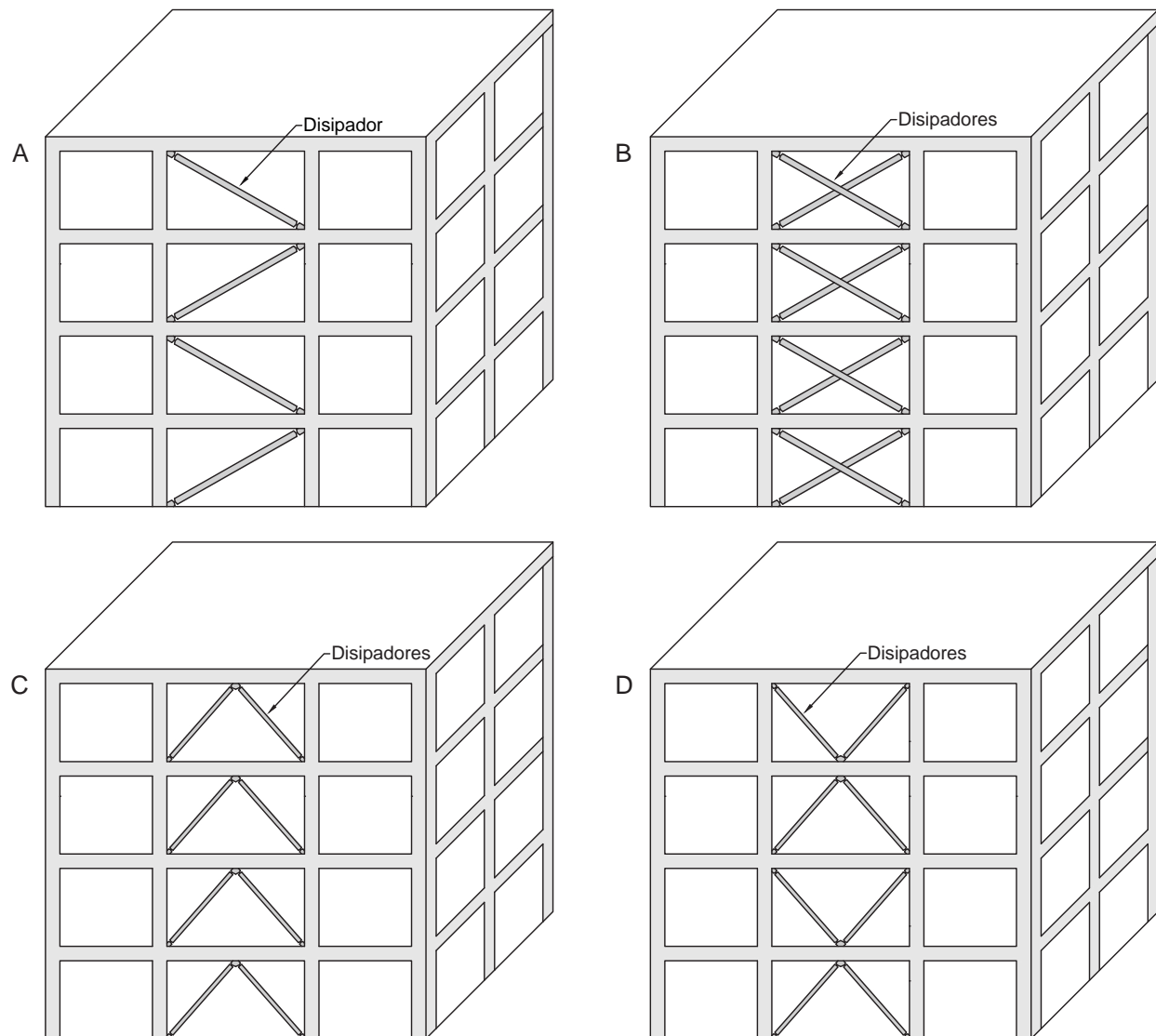


Gráfico 5.5 Arreglos más comunes de disipadores que suelen verse en las fachadas, la ubicación de los mismos es ilustrativa, podrían estar adosados en todos los marcos de la estructura, en 1 o 2; y en las laterales también. Su disposición será establecida por el cálculo estructural.

Fuente: Creación de la autora.

• Los disipadores histeréticos por lo general se cubren del exterior tras una capa de muro cortina, ventanas o muros, no obstante, por dentro quedan a la vista del usuario, como en el diagrama siguiente:

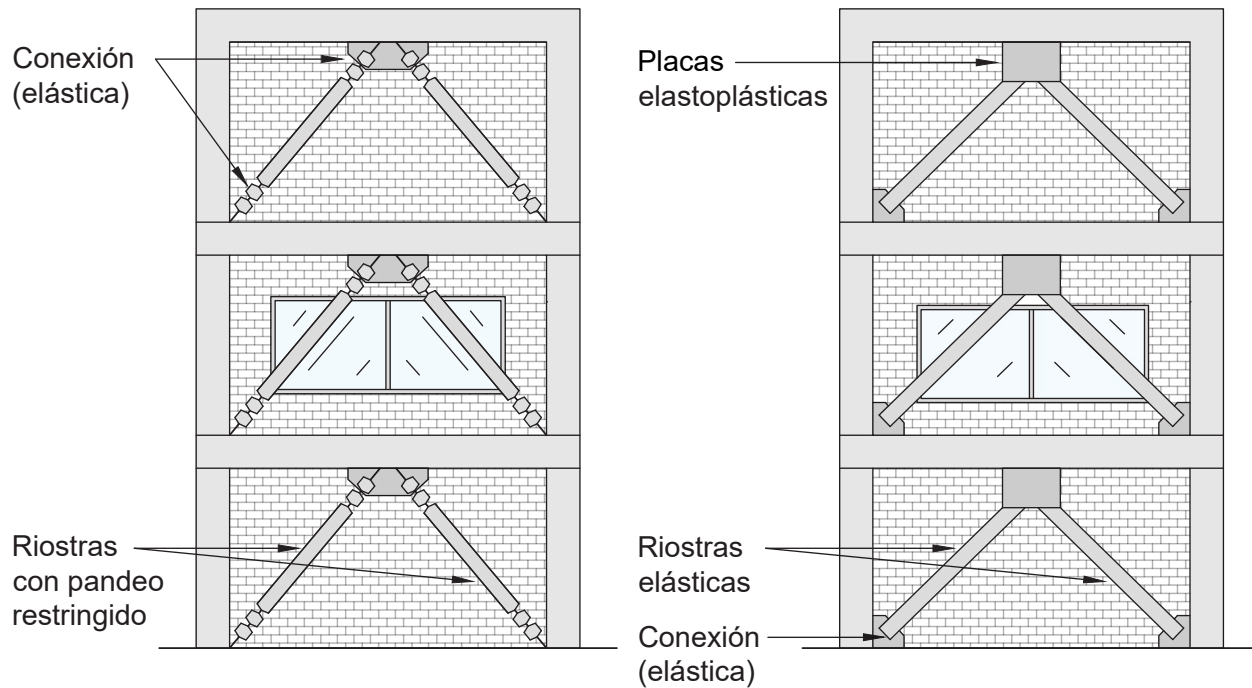


Gráfico 5.6 Vista de los arreglos de disipadores histeréticos al interior del edificio. El arreglo de los mismos es ilustrativa, su ubicación será establecida por el cálculo estructural. Fuente: Creación de la autora con información de <https://www.efepripace.co>

Es así que el arquitecto debe considerar la relevancia que tendrán los aisladores en su diseño tanto en el exterior como en el interior, pues no son elementos pequeños que pueden ocultarse y éstos influirán en la vista del inmueble, así como en la perspectiva del usuario.

5.2 Integración de criterios y técnicas aplicadas en un caso práctico

Con el propósito de alcanzar el objetivo de la presente investigación de contribuir a la difusión de criterios y técnicas que el arquitecto deberá de considerar desde la elaboración del proyecto para crear un diseño integral y sismorresistente, se elaborará en el presente subtema un caso práctico que partirá desde la fase inicial hasta la estructuración y posterior evaluación.

5.2.1 Características del proyecto arquitectónico

Para la dimensión del caso práctico, se seleccionó un terreno en esquina de 19.05 m x 29.1 m ubicado en la zona III de la Ciudad de México.

Con estas medidas y antes de empezar a diseñar la planta, se revisaron las NTCDS-2020 (apartado 1.9) para considerar la distancia de separación entre colindancias, que contempla 5 centímetros como distancia mínima pero que establece no debe ser menor al desplazamiento lateral determinado tras un análisis estructural de seguridad contra colapso. Como este valor en esta etapa se desconoce, las normas señalan que puede hacerse una aproximación multiplicando 0.006 veces la altura sobre el terreno para los predios en zona III. De manera que:

$$29.7 \text{ m} \times 0.006 = 0.1782$$

Quedando mínimo 20 cms de separación entre colindancias, sin embargo, debido a que todas se deformaran de manera diferente, se optó por dejar 50 cms de separación entre colindancias para que más adelante esta corrección no altere de manera drástica los espacios. Logrando así una dimensión de:

$$18.55 \text{ m} \times 28.6 \text{ m}.$$

A su vez, se consideró la altura de los edificios que más afectaciones tuvieron en el pasado, los cuales rondan entre 3 a 15 niveles. Escogiendo la media, se estableció que el caso práctico tendría 9 niveles con un estacionamiento subterráneo para cubrir ese requerimiento.

En cuanto a su tipo de uso, debido a que la mayoría de las pérdidas humanas se encontraron en edificaciones residenciales y de oficina, se seleccionó un tipo mixto, es decir, ocho niveles dirigidos a uso residencial y uno a comercios.

Sobre las características de diseño con las que contará el proyecto, se retoman algunas características que presentaron los edificios colapsados tras los sismos de 1957, 1985 y 2017 (revisar capítulo 1, subtema 1.3.1.4) como:

- Inmueble en esquina
- Planta baja con uso comercial
- Balcones y ventanales en fachadas principales
- Voladizos en esquina
- Amplios claros

Simultáneamente, se establece que estas particularidades serán incluidas en un solo diseño en planta el cual será estructurado de 3 maneras, las cuales son:

- **Estructura porticada:** Considerada la tipología más utilizada por el diseñador al tener la ventaja de usar claros amplios y omitir la existencia de muros de carga que limiten la iluminación, ventilación y fachadas; fue también el recurso más utilizado en los edificios colapsados. Tomará en cuenta los criterios de diseño sísmico.

- **Estructura dual:** Sistema que combina columnas y muros de cortante, ofrece algunas limitaciones en fachadas por lo cual no es la opción primaria del arquitecto, retomará los criterios de diseño sísmico.

- **Estructura irregular:** Estructurada similar a la porticada pero NO considerará los requerimientos de las NTCDS-2020, incluirá algunas características que experimentaron las construcciones colapsadas tras los sismos de 1957, 1985 y 2017, como la irregularidad en alzado y planta.

Cabe destacar que si bien es importante analizar la inclusión de técnicas de control sísmico en los inmuebles, debido a los alcances de la investigación, no será simulado en este estudio.

5.2.1.1 Condiciones de regularidad estructural que influyen en el proyecto arquitectónico

Una vez definido el tamaño del predio, se procedió a revisar las condiciones de regularidad que establecen las NTCDS-2020 y que vienen en el presente documento en el apartado 3.1, de manera que, para el caso práctico, estas condiciones y su aplicación en el proyecto se señalan en la siguiente tabla:

Tabla 5.1 Valores para el proyecto retomados de criterios señalados por las NTCDS-2020

CRITERIOS DE REGULARIDAD	
CONDICIONES QUE SEÑALAN LAS NTCDS-2020	VALORES PERMITIDOS PARA EL PROYECTO
La relación de la altura a la dimensión menor de su base no es mayor que cuatro.	Como la dimensión menor es de 18.55 m, su altura no deberá exceder los 74.00 m. Aunque se recomienda que la relación no sea mayor a 2.5 veces para no tener problemas de esbeltez, que para este caso no sobrepase los 46.00 m.
La relación de largo a ancho de la base no es mayor que cuatro.	El tamaño contemplado es de 28.6 m x 18.55 m, por lo tanto, este criterio se cumple ya que su relación es de 1.54.
En planta no debe haber entrantes ni salientes de dimensiones mayores que 20% de la dimensión medida paralelamente a la dirección en que se considera este entrante o saliente.	El tamaño máximo permitido de entrantes o salientes del lado ancho es de 3.71 m mientras que del lado largo es 5.72 m.
Los huecos en la losa por nivel no pueden sobrepasar el 20% del área de ese nivel y los huecos no tienen que cambiar de posición de un piso al otro.	Al ser el área de cada nivel 530.53 m ² , el área total de los huecos no deberá pasar los 106.10 m ²
Ningún piso tiene una dimensión en planta mayor que 110% del área de la del piso inmediato inferior, ni 125% mayor que la menor de las dimensiones de los pisos inferiores.	Como se esta considerando usar todo el espacio util de la planta, el área máxima para un nivel no deberá sobrepasar los 583.58 m ²

Fuente: Creación de la autora con datos tomados de las NTCDS-2020, apartado 5

En base a los valores de la tabla, se estableció lo siguiente:

- La altura del edificio para 3 casos será de 29.70 m con entrepisos en todos los niveles de 3.30 m, excepto en la estructura irregular que tendrá planta baja de 5.0 m con una altura de 31.40 m en total
- Se considerará para 2 estructuras un volado en esquina de 1.00 m x menos de 5.00 m de largo. y para la irregular 6.00 m x 6.25m
- Sus aberturas en cada nivel corresponderán a 31.30 m² que servirán para ventilar e iluminar espacios interiores.

Cabe mencionar que existen otros requerimientos que dictan si la estructura es regular o no. Éstos se determinan en la tabla siguiente:

Tabla 5.2 Criterios de regularidad señalados por las NTCDS-2020

CRITERIOS DE REGULARIDAD QUE INFLUYEN EN LA ESTRUCTURA			
CONDICIONES QUE SEÑALA LAS NTCDS-2020	ESTRUCTURA APORTICADA	ESTRUCTURA DUAL	ESTRUCTURA IRREGULAR
Los sistemas resistentes verticales son paralelos a los ejes ortogonales principales del edificio. Esto es cuando el ángulo que forma en planta no excede los 15°.	SI	SI	SI
El peso de cada nivel, incluyendo la carga viva, no es mayor que 120% del correspondiente al piso inmediato superior.	NO	NO	NO
Todas las columnas están restringidas en todos los pisos en las dos direcciones de análisis por diafragmas horizontales o por vigas.	SI	SI	SI
La rigidez lateral de ningún entrepiso difiere en más de 20% de las del entrepiso inmediatamente inferior. El ultimo entrepiso queda excluido de este requisito.	NO	NO	SI
Todas las columnas de cada entrepiso tienen la misma altura. Se exime de este requisito al último entrepiso de la construcción.	SI	SI	SI
En planta las entrantes y salientes no son mayores al 20% de la dimensión medida en la dirección en que se considera.	NO	NO	SI
Ningún piso tiene una dimensión en planta mayor que 110% del área de la del piso inmediato inferior, ni 125% mayor que la menor de las dimensiones de los pisos inferiores.	NO	NO	SI

Fuente: Creación de la autora con datos tomados de NTCDS-2020, apartado 5

5.2.2 Planos y fachadas arquitectónicas

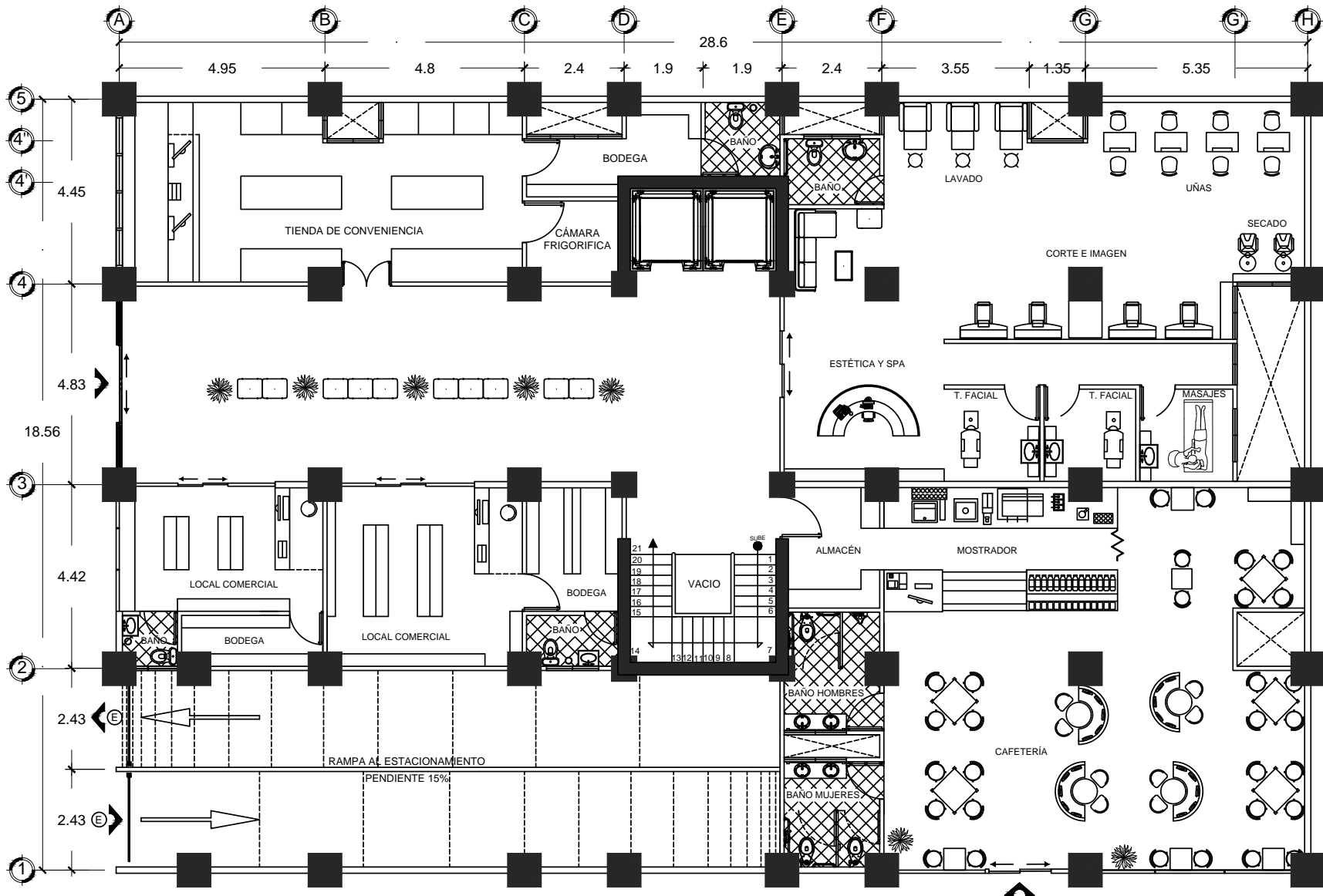
Una vez establecidas las características de diseño, los criterios de regularidad y sus parámetros máximos, se procedió a realizar un anteproyecto el cual consideró programa de necesidades, organigramas espaciales, ideas rectoras y zonificación. Proceso que solo se verá reflejado en el presente documento a través de los planos.

De manera general, la planta baja se consideró con una entrada a un estacionamiento subterráneo además de servicios como cafetería, locales comerciales, tienda de conveniencia, estética y spa, cuyo público está dirigido a los residentes como a consumidores externos. En cuanto a los niveles superiores se determinaron 4 departamentos por nivel, en los cuales, si se considera 4 residentes por departamento, el edificio albergará un total de 128 personas y 32 departamentos, lo que refleja la importancia de encontrar un sistema que resista el sismo para preservar la seguridad e integridad de los usuarios.

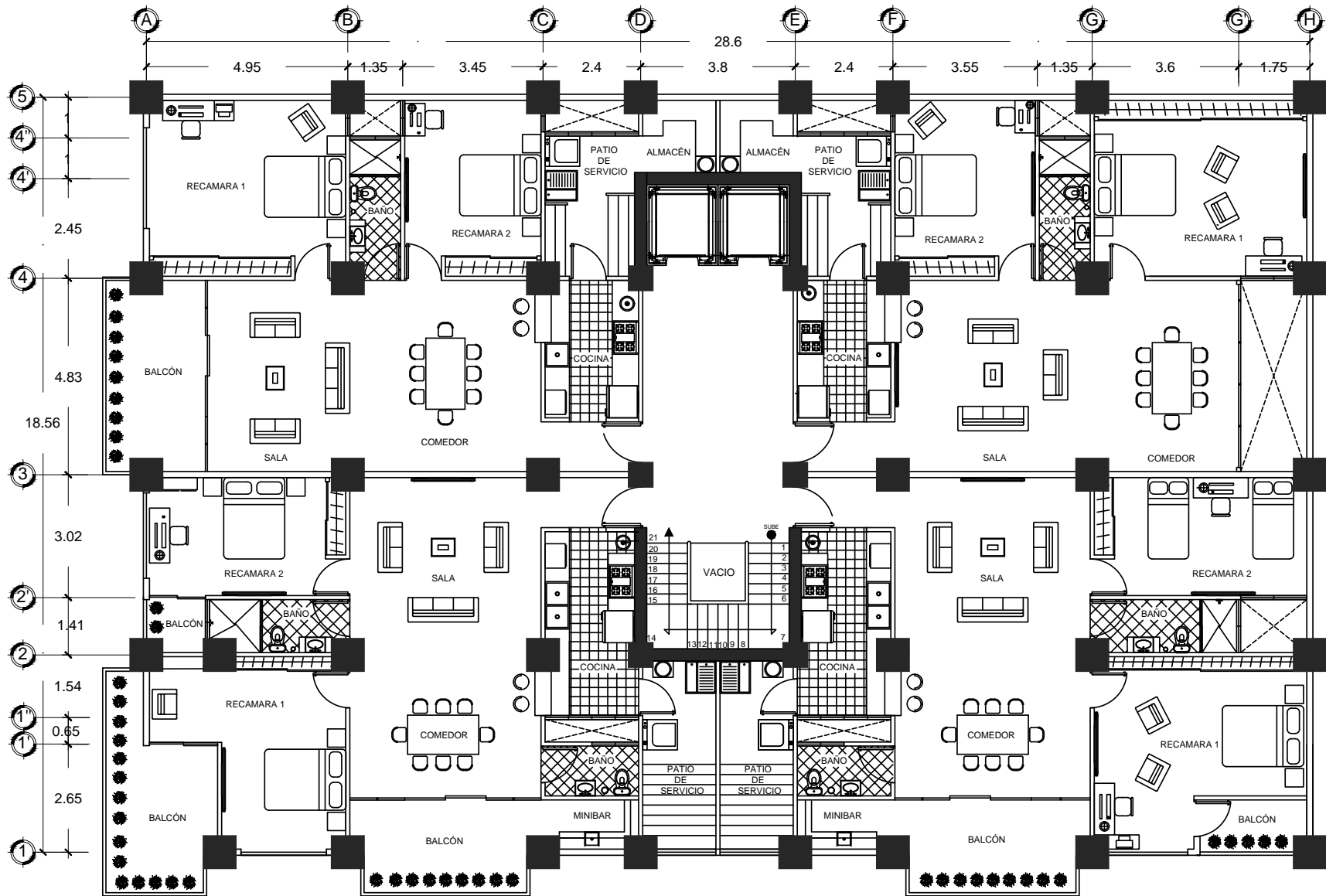
Definido lo anterior, se procede a realizar las plantas arquitectónicas para que los tres sistemas partan de la misma organización. Para ello, se ubicarán 8 ejes principales en el lado largo (lado X) y 5 al lado corto (lado Y) formando ángulos rectos en sus intersecciones. Posteriormente, se realizará una pre-estructuración donde se ubicarán las columnas en los cruces de los ejes, cuyos lugares serán los mismos en los 3 sistemas y desde el desplante hasta la azotea.

Cabe aclarar que las características de cada sistema se establecerán en su propio apartado, por lo cual, la propuesta tentativa de las columnas es de 80x80 y, a excepción de los muros de escaleras y elevadores, el resto de los muros tanto interiores como exteriores se consideran como elementos divisorios por lo cual no influyen en la resistencia de la estructura y su organización solo infiere a nivel arquitectónico.

Finalmente, el diseño de las plantas del sistema Porticado y Dual quedó como se aprecia en las siguientes páginas, mientras que la variación de la planta Irregular se puede ver en el Anexo 1.

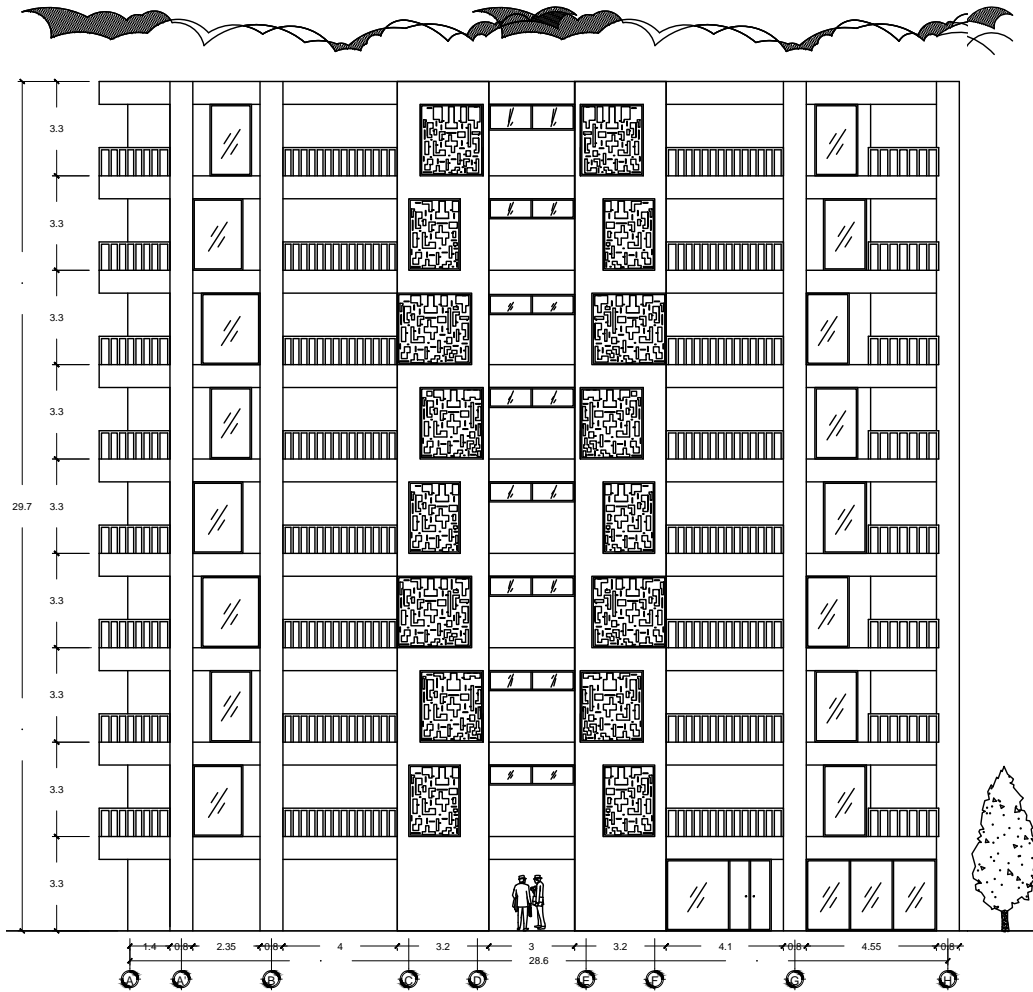


Plano 1. Planta Arquitectónica Comercial (sin escala)

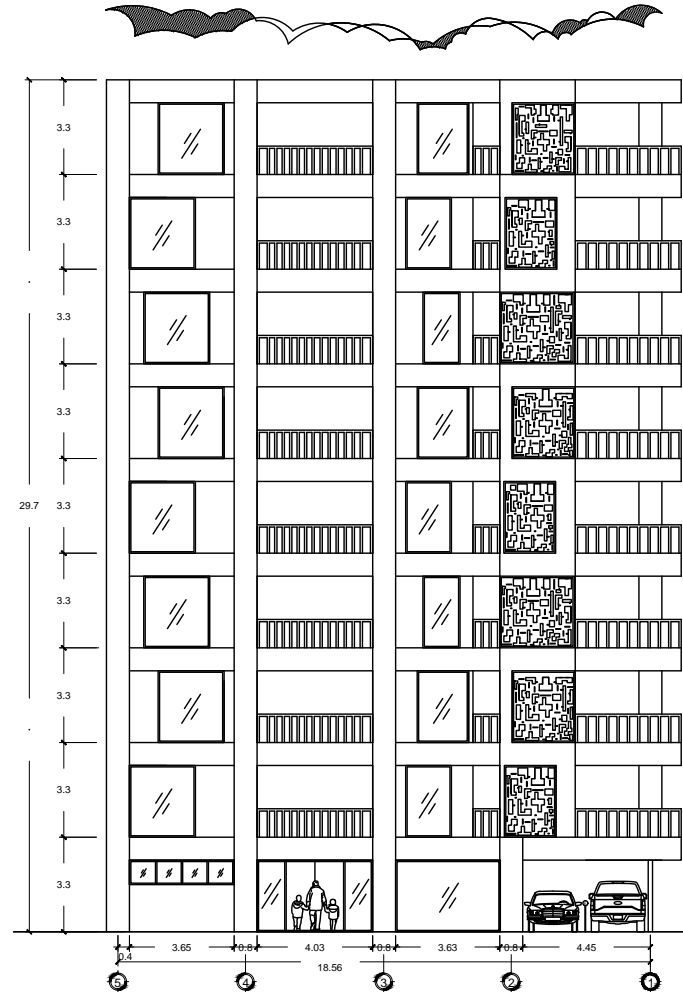


Plano 2. Planta Arquitectónica Residencial Tipo N. 2 - 9 (sin escala)

En cuanto al diseño en alzado, se jugó con la forma de los ventanales, balcones, aperturas, muros exteriores y envolventes para que en conjunto se creará la sensación de que los elementos verticales eran discontinuos y generar con ello una forma en fachada mucho más atractiva.



Plano 3. Fachada Principal X - X (sin escala)



Plano 4. Fachada Principal Y - Y (sin escala)

5.2.3 Análisis de cargas

Una vez establecidas las plantas arquitectónicas, se procederá a realizar un análisis de cargas para estimar las solicitaciones a las que estará sometida la estructura, las cuales de acuerdo a las NTC-CADEE¹ se clasifican de la manera siguiente:

Tabla 5.3 Tipos de acciones

ACCIONES VARIABLES	ACCIONES PERMANENTES	ACCIONES ACCIDENTALES
Carga viva, hundimientos diferenciales, acciones producidas por maquinaria y equipo.	Carga muerta, empuje de suelos y movimientos diferenciales.	Efectos del viento, explosiones, incendios, granizo y movimientos sísmicos.

Fuente: Creación de la autora con información de las NTC-CADEE

Para el presente caso práctico, solo se considerarán los valores de las cargas vivas, las cuales se definen de acuerdo al uso de la construcción y las NTC-CADEE las divide en dos tipos de cargas vivas: la instantánea y la máxima. En donde la máxima es relevante para las combinaciones de cargas del análisis sísmico y la instantánea para calcular el peso por nivel.

Tabla 5.4 Cargas vivas dependiendo del uso del nivel

CARGAS VIVAS	INSTANTANEAS	MÁXIMAS
Comercios	100 Kg/m ²	350 Kg/m ²
Departamentos	100 Kg/m ²	190 Kg/m ²
Azotea	100 Kg/m ²	100 Kg/m ²

Fuente: Recuperado de tabla 6.1 de NTC-CADEE

Sobre las cargas muertas, lo que se tiene que hacer es considerar el material de los elementos estructurales, el cual será de concreto armado con una compresión $f'c$ de 280 kg/cm² y un modulo de elasticidad de 234, 264.80 kg/cm².

Para el acero de refuerzo propuesto su grado será de 42 con diámetros que van de 1/2" hasta 1" 1/2, con un esfuerzo de fluencia de 4200 kg/cm² y un modulo de elasticidad de 2, 000, 000 kg/cm².

Ahora bien, a partir de estos valores y con las dimensiones de cada elemento, es posible calcular el peso de cada uno para posteriormente sacar la suma de todas las secciones y obtener el peso total de la estructura.

¹ NTC sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones, apartado 2.

Retomando los valores de las cargas permanentes y vivas instantáneas, se calculará el peso sometido para cada entrepiso a partir de su altura de desplante, omitiendo la losa del nivel 0.00 porque para este caso en particular al estar empotrada al suelo su masa no influye en la fuerza cortante lateral.

De manera que las cargas que se muestran a continuación son los pesos totales por área, por lo cual si se quiere revizar a detalle el análisis de carga revizar el Anexo 2.

Tabla 5.5 Análisis de cargas para cada estructura

	ESTRUCTURA PORTICADA	ESTRUCTURA DUAL	ESTRUCTURA IRREGULAR
Losa 1-8	472,101.03 Kg/m ² x área	559,350.00 Kg/m ² x área	472,101.03 Kg/m ² x área
Losa 9	465,764.18 Kg/m ² x área	553,013.15 Kg/m ² x área	465,764.18 Kg/m ² x área

Fuente: Creación de la autora con información del Anexo 2

. En cuanto a las acciones accidentales como las de sismos, su cálculo se obtiene a partir del método de análisis elegido, y se verá de manera particular cada caso en los subtemas siguientes: 5.2.5; 5.2.6; y 5.2.7 .

Por el momento, cabe establecer que, con el fin de garantizar la seguridad de una edificación, la NTC-CADEE señala que al analizar una estructura se debe considerar la posibilidad de que todas las acciones variables, permanentes y accidentales actúen de manera combinada al mismo tiempo, esto para definir y prever las cargas totales a las que estará sometida y asegurar su resistencia.

A lo anterior se les llama combinaciones o combos y las propuestas para el caso práctico se pueden ver a detalle en el Anexo 3, de las cuales se buscará la más desfavorable para basar el diseño en esa posibilidad y utilizarla más adelante, en la fase de simulación para encontrar sus demandas máximas.

5.2.4 Espectro de diseño para el proyecto

Como se abordó previamente, el espectro de diseño¹ es aquella que determinará la respuesta del terreno y, a su vez, el efecto del sismo en edificación. Para calcularla, se requiere conocer ciertos valores, los cuales se enlistaran a continuación:

- Factor de importancia: se basa en el tipo de uso del proyecto, el cual en este caso al ser destinado a vivienda y comercio se considera dentro del grupo B².
- Factor de irregularidad: Como se estableció en la tabla 5.2 tanto la estructura porticada como la dual son totalmente regulares, por lo cual el apartado 5.5 de las NTCDS-2020 la señala con una constante de 1, mientras que la irregular al tener algunos parametros fuera de los permitidos, se le considerará de 0.7.
- Factor de comportamiento sísmico (**Q**): Este punto se basa en las tablas 4.2.1, 4.2.2, y 4.2.3 de las NTCDS-2020, las cuales clasifican las construcciones en función del sistema, material y ductilidad elegido. Para este caso, se considerarán todas las estructuras de concreto y tanto las porticadas (regular e irregular) como la dual con una ductilidad media, por lo cual su factor será de 3.0.
- Factor de hiperestaticidad: Este se retoma del apartado 3.5 de las NTCDS-2020 que establece que para sistemas estructurales de concreto en las dos direcciones de análisis corresponde un **k_z** de 1.0, a menos que sea un sistema dual, en donde **k_z** será 1.25 y en las que haya menos crujiás de 0.8, el cual será para la Irregular.

Para los siguientes factores, se requiere conocer los valores que corresponden a la ubicación elegida. Por ello, se seleccionó un terreno dentro de la zona III ubicado en Av. Paseo de la Reforma con coordenadas 19.424554; -99.171363.

1 Ver el subtema 2.1.3 para más información

2 Ver tabla 2.1 del capítulo 2

Una vez definidos los parametros anteriores y las coordenadas del predio, éstos se ingresaron al programa SASID¹ para descubrir los valores de los periodos, ordenadas, desplazamientos y aceleración del terreno. Quedando el espectro de diseño como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5.6 Valores para el proyecto retomados de criterios señalados por las NTCDS-2020

Espectro de diseño	Estructura		
	Porticada	Dual	Irregular
Factor de importancia	B	B	B
Factor de irregularidad	1.0	1.0	0.7
Q (F. comportamiento sísmico)	3.0	3.0	3.0
K₁ (F. corrección por hiperestaticidad)	1.0	1.25	0.8
T_s (Período de vibrar dominante)	1.277	1.277	1.277
a_o (Período natural de vibrar)	0.318	0.318	0.318
c (Ordenada espectral máxima)	0.838	0.838	0.838
T_a (Período característico del espectro)	0.941	0.941	0.941
T_b (Período característico del espectro)	1.760	1.760	1.760
k (Desplazamiento máx. del suelo y la estructura)	0.560	0.560	0.560
amax (Aceleración máxima)	0.127	0.106	0.216

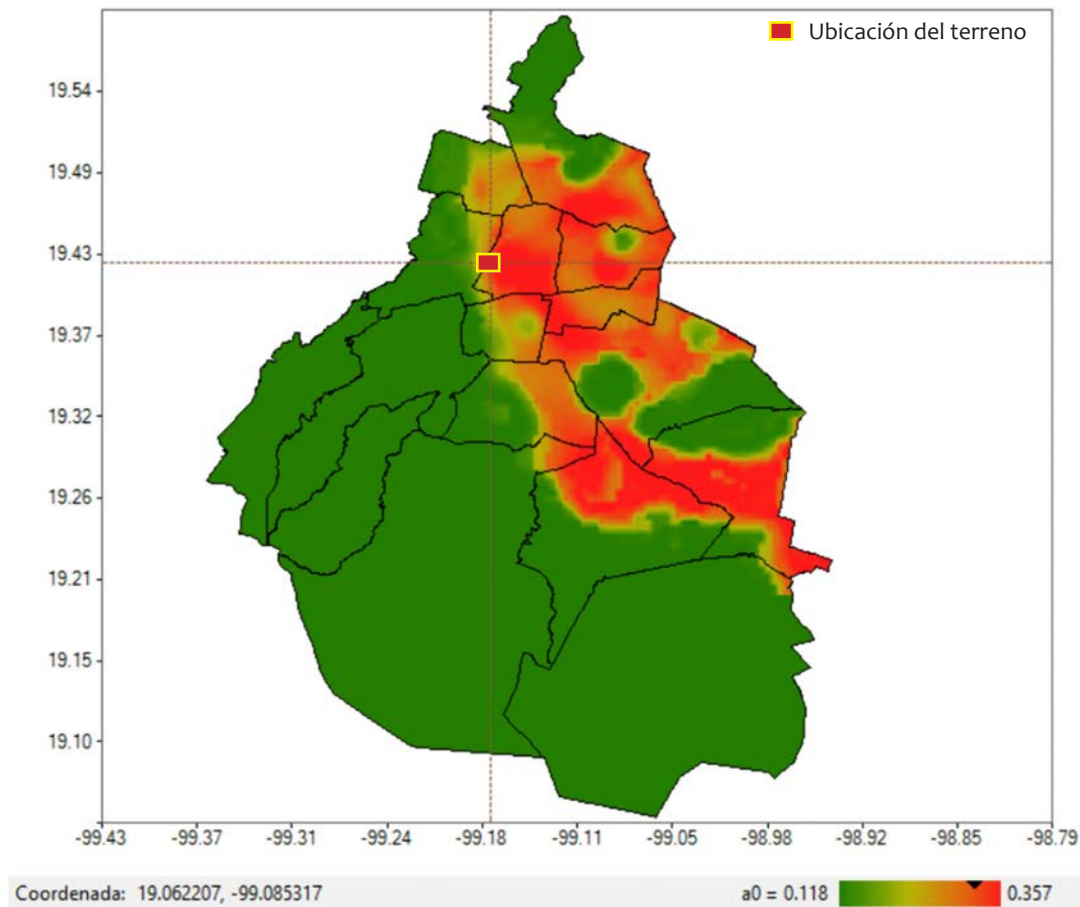
Fuente: Creación de la autora con datos recuperados del programa SASID y las NTCDS-2020

De la tabla anterior puede apreciarse que a pesar de que existen valores iguales, en la aceleración máxima difirieron, señalando que, en teoría, el sistema Dual sufre menos aceleraciones que la Porticada y está a su vez menos que la Irregular, siendo esta última la que sufrirá mayores sollicitaciones.

Aunado a ello, para visualizar de manera ilustrativa los efectos del suelo, el SASID adjunto con los valores anteriores un mapa con las zonas de riesgo de la Ciudad de México, la ubicación exacta del terreno propuesto y el periodo natural de vibrar del mismo, lo que ayuda a mostrar las aceleraciones de acuerdo a su ubicación y si este se encuentra en un lugar critico o no.

¹ Ver el subtema 2.1.3 para más información

En el caso del presente estudio, el terreno si se está en una zona que requiere especial atención ante eventos sísmicos.



Mapa 5.1 Mapa de aceleraciones del suelo en el sitio propuesto.

Fuente: Datos recuperados del programa SASID

Dado que ya se describieron las características del proyecto con sus condiciones de regularidad, se diseñaron las plantas arquitectónicas, se hizo una pre-estructuración, se calcularon las cargas, se realizaron las combinaciones de acciones y el espectro de diseño de cada estructura, ya es posible realizar los planos estructurales finales de cada propuesta y su correspondiente análisis sísmico, que para los 3 casos será estático, y se verá a detalle en las subsiguientes páginas con el siguiente orden:

- Estructura porticada
- Estructura dual
- Estructura Irregular

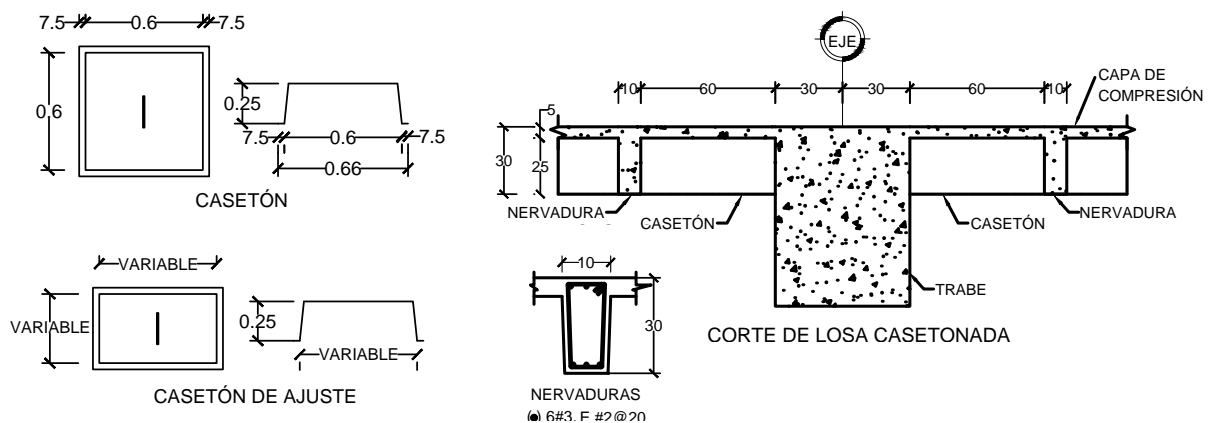
5.2.5 Análisis sísmico de la Estructura Porticada

La estructura porticada es un sistema estructural que está formado por columnas y vigas, las cuales forman marcos rígidos. Este armado suele ser el más utilizado en las propuestas realizadas por el arquitecto debido a las ventajas que representa: espacios libres permitiendo flexibilidad en el interior, omisión de muros de carga que limiten el diseño, claros amplios, posibilidad de ventanales y balcones en fachadas, entre otros.

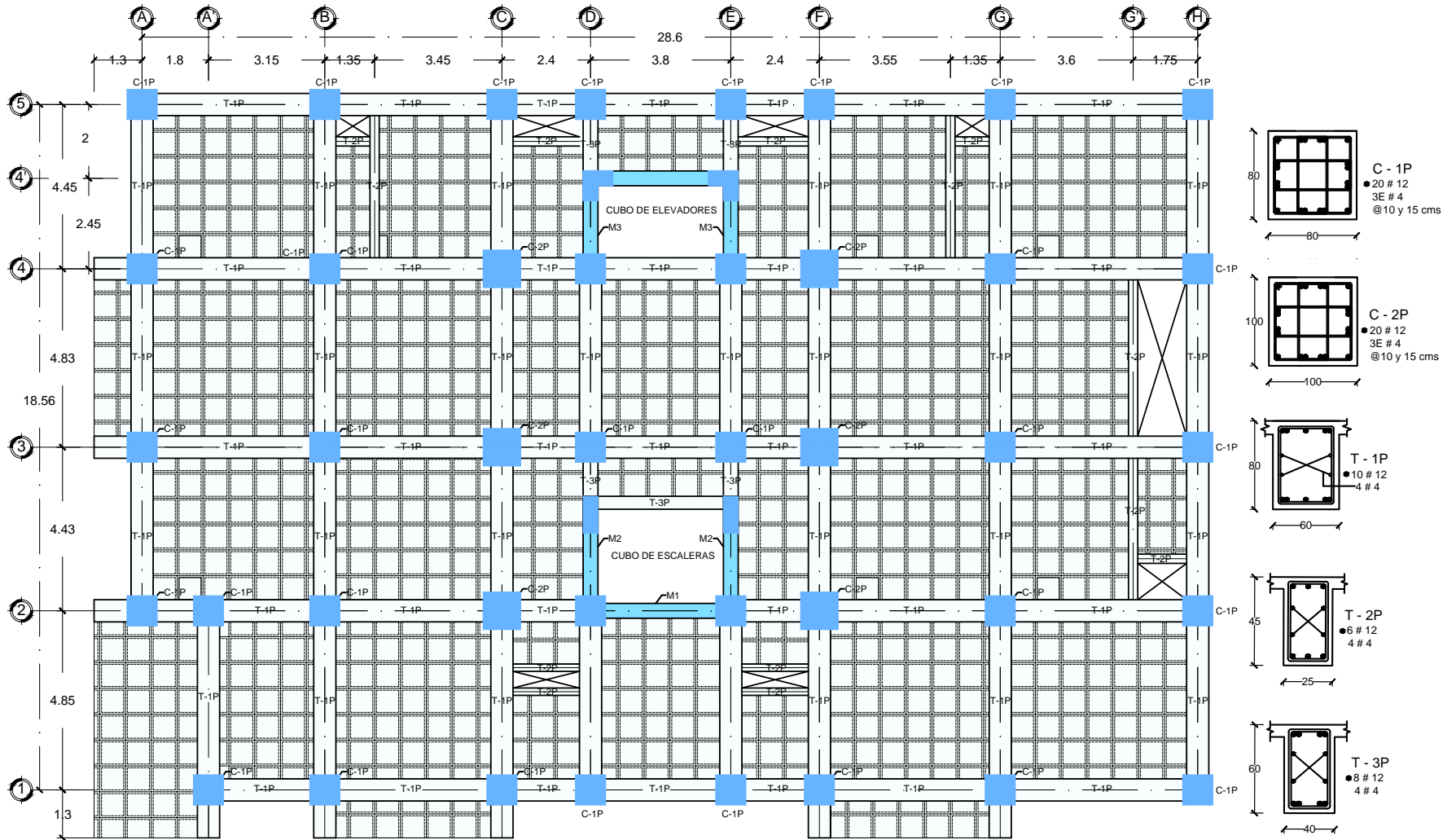
Es así que debido a sus virtudes está será una de las primeras opciones a analizar, contará con las condiciones de regularidad establecidas previamente y su estructura tendrá los siguientes parámetros:

- Losas de entrepiso aligerada con casetones de poliestireno (0.60 m x 0.60 m) y nervaduras en las dos direcciones
- **C-1P:** Columnas esquineras y excéntricas de 0.80 m x 0.80 m
- **C-2P:** Columnas centrales que recibirán mayor carga de 1.0 m x 1.0 m
- **T-1P:** Trabes principales de 0.80 m x 0.60 m
- **T-2P:** Trabe secundarias de 0.45 m x 0.25 m
- **T-3P:** Trabe en cubo de escalera de 0.45 m x 0.40 m
- **M1, M2:** Muros armados para cubo de escaleras, **M3** para elevadores
- Conectores rígidos entre columnas y vigas

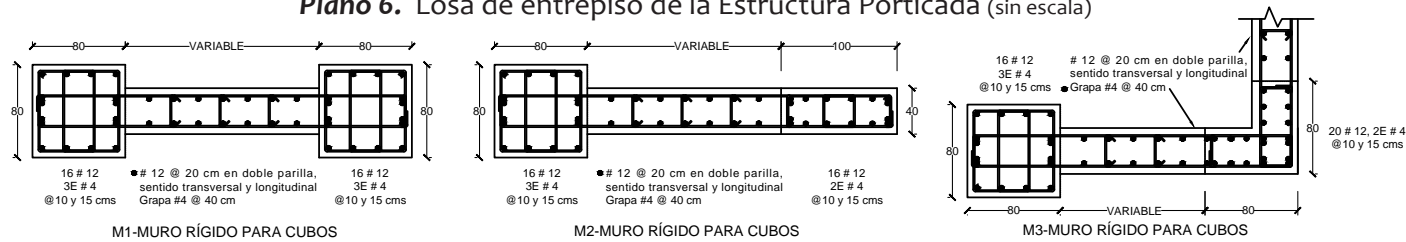
El plano y los detalles se verán a continuación:



Plano 5. Detalle de losa aligerada (sin escala)

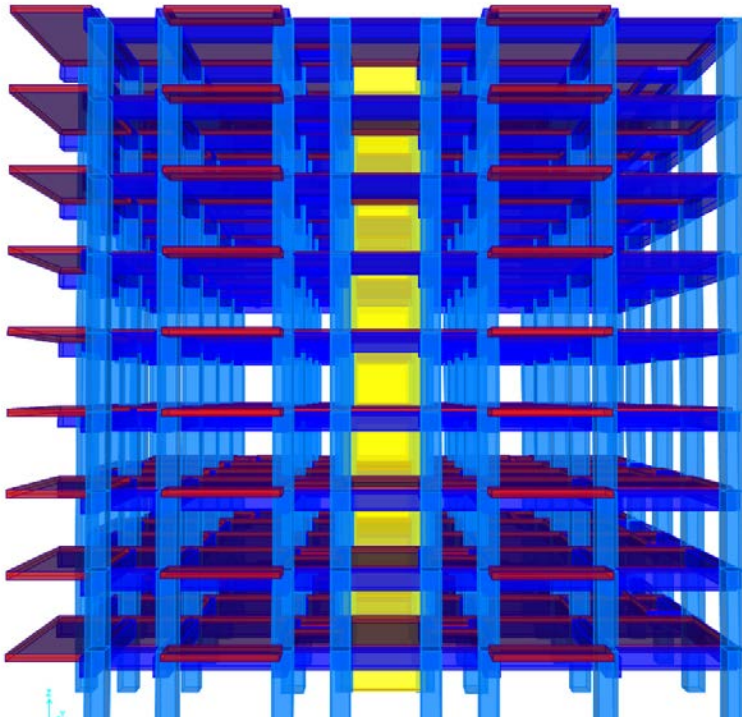


Plano 6. Losa de entrepiso de la Estructura Porticada (sin escala)

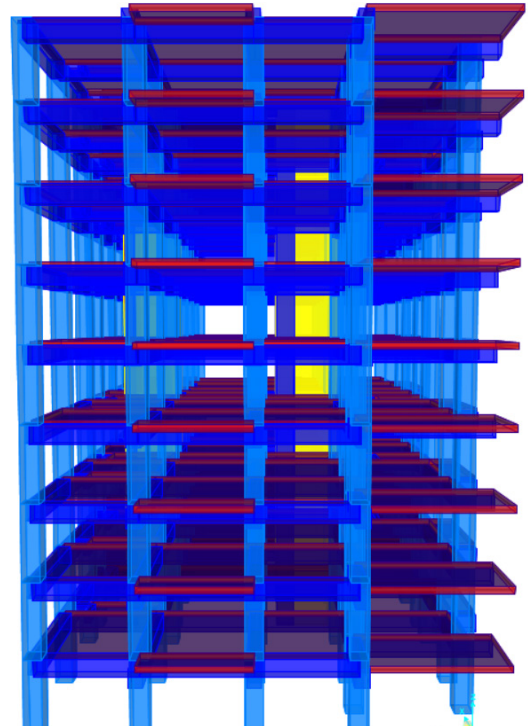


Plano 7. Detalles de elementos estructurales (sin escala)

Con todos los datos previamente establecidos, pudo simularse la estructura en el programa SAP2000 y su alzado puede verse en los siguientes modelos:



Plano 8. Vista de la estructura en X, simulada con SAP2000



Plano 9. Vista de la estructura en Y, simulada con SAP2000

Ahora bien, como la altura del sistema es menor a 30.0 m, éste puede ser analizado por medio del método estático (ver tema 2.9 para más información), que establece que para determinar las fuerzas laterales de diseño que experimentará la estructura, deberá de utilizarse la siguiente formula:

$$F_i = \frac{C}{Q'R} W_i h_i \frac{\sum W_i}{\sum W_i h_i} \quad (1)$$

Donde: F_i = Fuerza lateral en el i-ésimo nivel

c = coeficiente sísmico del lugar retomado del SASID

W_i = Peso del i-ésimo nivel incluyendo carga viva

h_i = Altura sobre el desplante de la masa en el i-ésimo nivel

R = Factor de reducción por sobre resistencia

Para resolver la ecuación **1**, primero hay que conocer el valor de las incógnitas. Como **C** ya se conoce por los datos recuperados del SASID (tabla 4.10), se tiene que encontrar **Q'** y **R**.

Para el caso de **Q'** (factor de reducción por comportamiento sísmico), este debe de responder a una de tres ecuaciones, la cual, para este caso, corresponde a la siguiente:

$$Q' = 1 + (Q - 1) \sqrt{\frac{\beta}{k}} \quad \text{Si } T_a < T_b \leq T_b \quad (2)$$

Debido a que, en base a la tabla 4.10, se tiene que:

$$0.941 < 1.760 \leq 1.760$$

Es decir:

$$T_a < T_b \leq T_b$$

No obstante, para resolver la ecuación **2**, se desconoce β (factor de reducción por amortiguamiento), por lo tanto:

$$\beta = \left(\frac{0.05}{\zeta}\right)^\lambda \quad \text{Si } T_a < T < \tau T_b \quad (3)$$

Sin embargo, al no conocerse el valor de τ , es preciso revisar la tabla 3.1.1 de las NTCDS-2020, que señala que en relación al periodo dominante pueden sacarse tres tipos de parámetros, en tanto cumplan una de las condiciones existentes.

$$1.0 < T_s \leq 1.5 \quad (4)$$

Es decir:

$$1.0 < 1.277 \leq 1.5$$

Por tanto, los valores que corresponden para resolver β son:

Periodo del sitio (s)	λ	ε	τ
$1.0 < T_s \leq 1.5$	0.45	0.30	1.00

De manera que la condición de la ecuación **3** se cumple al quedar:

$$1.0 < 1.277 < (1)(1.760)$$

Sustituyendo los valores de la ecuación 3 y considerando que ζ es la fracción de amortiguamiento crítico para la que se establece el espectro de diseño, se toma un valor mayor a la constante 0.05, quedando:

$$\beta = \left(\frac{0.05}{0.06}\right)^{0.45}$$

$$\beta = 0.921$$

Obtenido el valor de β , se puede continuar con la ecuación 2, resolviéndola de la siguiente manera:

$$Q' = 1 + (3 - 1) \sqrt{\frac{0.921}{0.560}} \tag{2-A}$$

$$Q' = 1 + (3 - 1) \sqrt{1.644}$$

$$Q' = 3.56$$

Ahora, para determinar el factor de sobre resistencia (R) se aplica la ecuación:

$$R = K_1 R_0 + K_2 \tag{5}$$

Para resolver la ecuación 5 hay que remontarse al apartado 3.5 de las NTCDS-2020 que determina que el R_0 (factor básico de sobre-resistencia) es igual a 2.0 debido a que el sistema estructural tiene un Q mayor o igual a 3.

En tanto, el valor k_2 que se determinó previamente (tabla 5.6) equivale a 1. No obstante, al desconocerse el factor de incremento para estructuras bajas y rígidas (k_2), se aplica la siguiente ecuación:

$$k_2 = 0.5 \left[1 - \left(\frac{T}{T_a}\right)^{1/2} \right] > 0$$

$$k_2 = 0.5 \left[1 - \left(\frac{1}{0.941}\right)^{1/2} \right] > 0 \tag{6}$$

$$k_2 = -0.0145 > 0 \text{ NO}$$

Resueltas las incógnitas, se puede encontrar R , quedando:

$$R = K_1 R_0 + K_2$$

$$R = 1(2.0) + (-0.0145)$$

$$R = 1.985$$

Ahora bien, para resolver la ecuación **1**, se requiere considerar el peso por niveles (retomado de la tabla 5.5) y multiplicarlos por su altura desplantada, obteniendo los siguientes valores:

Tabla 5.7 Peso y altura de cada nivel de la estructura porticada en Ton

Losa	W_i (Ton)	h_i	$W_i h_i$ (Ton)
9	465.76	29.70	13,833.07
8	472.10	26.40	12,463.44
7	472.10	23.10	10,905.51
6	472.10	19.80	9,347.58
5	472.10	16.50	7,789.65
4	472.10	13.20	6,231.72
3	472.10	9.90	4,673.79
2	472.10	6.60	3,115.86
1	472.10	3.30	1,557.93
Σ	4,242.56	Σ	69,918.55

Fuente: Creación propia

Definidos todos los valores, se sustituyen las incógnitas y se aplica la ecuación **1** en cada nivel para determinar las fuerzas que cada piso experimentará, quedando de la siguiente manera:

$$F_i = \frac{C}{Q'R} W_i h_i \frac{\Sigma W_i}{\Sigma W_i h_i} \tag{1-A}$$

$$F_i = \frac{0.838}{3.56 \times 1.985} W_i h_i \frac{4,242.56}{66,740.44}$$

$$F_i = (0.118)W_i h_i(0.0636)$$

$$F_9 = (0.118) 13,833.07 (0.0607) = 99.08 \text{ tonf}$$

$$F_8 = (0.118) 12,463.44 (0.0607) = 89.27 \text{ tonf}$$

$$F_7 = (0.118) 10,905.51 (0.0607) = 78.11 \text{ tonf}$$

$$F_6 = (0.118) 9,347.58 (0.0607) = 66.95 \text{ tonf}$$

$$F_5 = (0.118) 7,789.65 (0.0607) = 55.79 \text{ tonf}$$

$$F_4 = (0.118) 6,231.72 (0.0607) = 44.63 \text{ tonf}$$

$$F_3 = (0.118) 4,673.79 (0.0607) = 33.47 \text{ tonf}$$

$$F_2 = (0.118) 3,115.86 (0.0607) = 22.31 \text{ tonf}$$

$$F_1 = (0.118) 1,557.93 (0.0607) = 11.15 \text{ tonf}$$

5.2.5.1: Efectos de torsión de la estructura porticada

Como se vio en el apartado 2.7 del presente documento, los esfuerzos de torsión se desarrollan cuando ante un sismo el terreno gira en su plano horizontal y la estructura se opone a dejar su estado de reposo por lo cual se crean fuerzas de inercia que hacen girar la edificación sobre su centro de rigidez.

En el caso de que las cargas no estén uniformemente distribuidas y las rigideces de los elementos verticales no sean iguales, la estructura producirá efectos de torsión, los cuales pueden llegar a ser críticos para la estructura. Para conocer este efecto, es necesario primero calcular la excentricidad accidental (e_{ai}) con la ecuación:

$$e_{ai} = [0.05 + 0.05 (i-1) / (n-1)] b_i \quad (7)$$

Donde b_i es la dimensión del i -ésimo nivel en la dirección de análisis; n el numero de pisos del sistema estructural e i el nivel evaluado. La normativa señala que podría aplicarse solo en el lado que la fuerza produzca más efecto, sin embargo, en este estudio se utilizará para ambas direcciones, quedando:

$$e_{aix} = [0.05 + 0.05(i - 1)/(n - 1)]b_i \quad (7-A)$$

Nivel 1	e_{ai}	=	$[0.05 + 0.05(1 - 1)/(9 - 1)]29.40$ m	=	1.47 m
Nivel 2	e_{ai}	=	$[0.05 + 0.05(2 - 1)/(9 - 1)]29.40$ m	=	1.65 m
Nivel 3	e_{ai}	=	$[0.05 + 0.05(3 - 1)/(9 - 1)]29.40$ m	=	1.83 m
Nivel 4	e_{ai}	=	$[0.05 + 0.05(4 - 1)/(9 - 1)]29.40$ m	=	2.02 m
Nivel 5	e_{ai}	=	$[0.05 + 0.05(4 - 1)/(9 - 1)]29.40$ m	=	2.20 m
Nivel 6	e_{ai}	=	$[0.05 + 0.05(1 - 1)/(9 - 1)]29.40$ m	=	2.38 m
Nivel 7	e_{ai}	=	$[0.05 + 0.05(3 - 1)/(9 - 1)]29.40$ m	=	2.57 m
Nivel 8	e_{ai}	=	$[0.05 + 0.05(2 - 1)/(9 - 1)]29.40$ m	=	2.75 m
Nivel 9	e_{ai}	=	$[0.05 + 0.05(4 - 1)/(9 - 1)]29.40$ m	=	2.94 m

$$e_{aiy} = [0.05 + 0.05(i - 1)/(n - 1)]b_i$$

Nivel 1	e_{ai}	=	$[0.05 + 0.05(1 - 1)/(9 - 1)]19.36$ m	=	0.97 m
Nivel 2	e_{ai}	=	$[0.05 + 0.05(2 - 1)/(9 - 1)]19.36$ m	=	1.09 m
Nivel 3	e_{ai}	=	$[0.05 + 0.05(3 - 1)/(9 - 1)]19.36$ m	=	1.21 m
Nivel 4	e_{ai}	=	$[0.05 + 0.05(4 - 1)/(9 - 1)]19.36$ m	=	1.33 m
Nivel 5	e_{ai}	=	$[0.05 + 0.05(4 - 1)/(9 - 1)]19.36$ m	=	1.45 m
Nivel 6	e_{ai}	=	$[0.05 + 0.05(1 - 1)/(9 - 1)]19.36$ m	=	1.57 m
Nivel 7	e_{ai}	=	$[0.05 + 0.05(3 - 1)/(9 - 1)]19.36$ m	=	1.69 m
Nivel 8	e_{ai}	=	$[0.05 + 0.05(2 - 1)/(9 - 1)]19.36$ m	=	1.81 m
Nivel 9	e_{ai}	=	$[0.05 + 0.05(4 - 1)/(9 - 1)]19.36$ m	=	1.93 m

Además de e_{aj} , es importante determinar la excentricidad torsional (e_s) de cada nivel, que se calcula cuando a la distancia del centro de masa (CM) se le resta el centro de rigidez (CR) que es la línea donde actuará la fuerza lateral, es decir:

$$e_{sx} = XCM - XCR \qquad e_{sy} = YCM - YCR \qquad (8)$$

Para encontrar las coordenadas del CM y del CR, fue necesario retomar los valores de la estructura simulada por el programa SAP2000 (que ya consideraba las acciones, cargas y fuerzas sísmicas determinadas previamente) y aplicar la fórmula 8. Los resultados pueden verse en la tabla A3 del Anexo 4.

Posteriormente, se debe buscar una fuerza igual a la lateral multiplicada por la excentricidad que resulte más desfavorable para los elementos verticales usando las cifras anteriores y las siguientes ecuaciones:

$$1.5 e_s + e_a \qquad (9)$$

$$e_s - e_a \qquad (10)$$

Con el propósito de presentar la información de manera clara, la resolución de las ecuaciones 9 y 10 se encuentra en el Anexo 4. Mostrándose aquí solo la excentricidad desfavorable, que para esta estructura se encontró con la ecuación 9.

Tabla 5.8 Excentricidades en x, y

$1.5e_s + e_a$				$1.5e_s + e_a$			
Nivel	e_{sx}	e_a	e_{x1}	Nivel	e_{sy}	e_a	e_{y1}
1	-0.28	1.47	1.05	1	0.91	0.97	2.34
2	-0.31	1.65	1.19	2	0.90	1.09	2.44
3	-0.31	1.83	1.37	3	0.90	1.21	2.56
4	-0.31	2.02	1.56	4	0.90	1.33	2.68
5	-0.31	2.20	1.74	5	0.90	1.45	2.80
6	-0.31	2.38	1.92	6	0.90	1.57	2.92
7	-0.31	2.57	2.11	7	0.90	1.69	3.04
8	-0.31	2.75	2.29	8	0.90	1.81	3.16
9	0.16	2.94	3.18	9	0.92	1.93	3.31

Fuente: Creación propia con datos recuperados de la ecuación 9

De lo anterior puede observarse que el modelo experimentó efectos de volteo importantes, corriéndose hasta 2.13 m más en el nivel 9 con respecto al 1.

5.2.5.2 Estado límite de servicio

Con el objetivo de conocer el grado de deformación que podría presentar la estructura ante un sismo y verificar que cumpla con los requerimientos reglamentarios, es necesario calcular los desplazamientos que experimentará. Para ello, en el presente caso práctico, se simuló el modelo con las fuerzas resultantes de la ecuación **1**, lo que generó un modelo desplazado bajo la combinación de servicio más crítica en ambas direcciones, cuya deformación lateral puede verse en los siguientes gráficos:

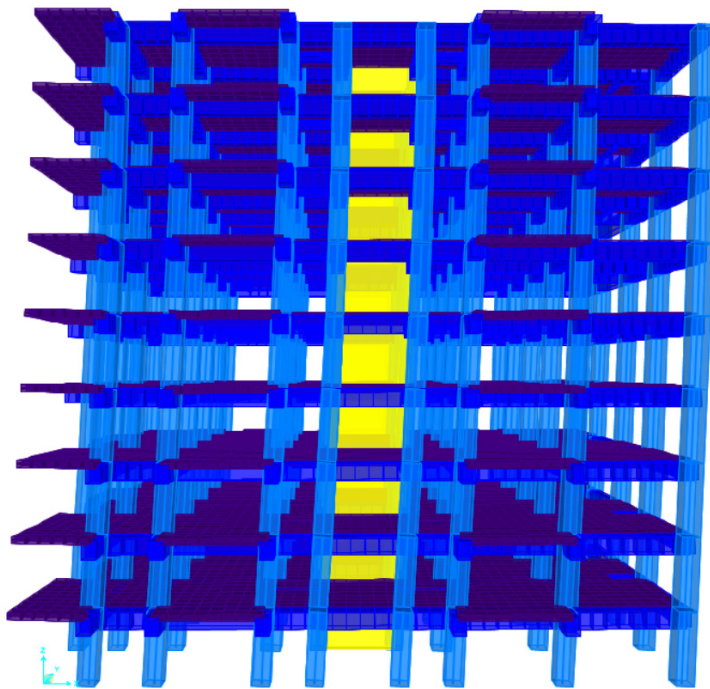


Gráfico 5.7 Desplazamiento en X, simulada con SAP2000.

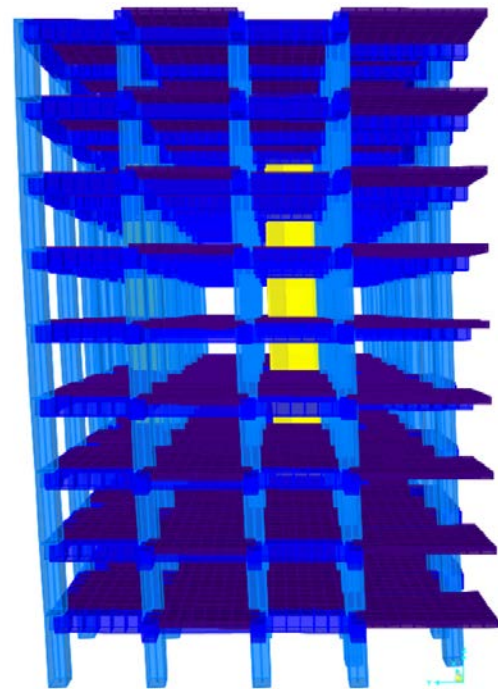


Gráfico 5.8 Desplazamiento en Y, simulada con SAP2000.

Posteriormente, los valores generados de la simulación se multiplicaron por QR^1 para obtener los desplazamientos reales, que no deberán exceder 0.020 que es la distorsión máxima (y_{max}) establecida por las NTCDS-2020 para este tipo de sistemas. Esto con el propósito de verificar que el modelo cumpla con el estado límite de seguridad contra colapso.

¹ Como se vio previamente, Q vale 3 y R 1.985, quedando $3*1.985$.

Los resultados pueden verse a continuación:

Tabla 5.9 Desplazamiento estado límite de seguridad en X

ESTADO LÍMITE DE SEGURIDAD CONTRA COLAPSO EN X			
	Desplazamiento	Desplazamiento real	Mayor a
Nivel	X en cms	Desp * QR	$\gamma_{max} = 0.020$
9	0.000268	0.00159	NO
8	0.000224	0.00133	NO
7	0.000243	0.00145	NO
6	0.000220	0.00131	NO
5	0.000191	0.00114	NO
4	0.000157	0.00094	NO
3	0.000119	0.00071	NO
2	0.000077	0.00046	NO
1	0.000034	0.00020	NO

Fuente: Los datos en la columna de *Desplazamiento* son los recuperados de la simulación, los de la columna de *Desplazamiento Real* son los primeros multiplicados por QR.

De la tabla 5.9 puede verse que los valores no sobrepasan la deriva máxima, por lo cual los desplazamientos están dentro del rango y no implican un riesgo de colapso. Ahora, se procede a revisar que la estructura cumpla el requisito de limitación de daños frecuentes, el cual no podrá sobrepasar 0.004, parametro establecido por las NTCDS para las construcciones que tengan elementos no estructurales separados de la estructura.

Tabla 5.10 Desplazamiento limitación de daños en X

LIMITACIÓN DE DAÑOS ANTE SISMOS FRECUENTES EN X			
	Desplazamiento	Desplazamiento real	Mayor a
Nivel	real contra colapso	Desp * Q'R * k_s	0.004
9	0.00159	0.00282	NO
8	0.00133	0.00236	NO
7	0.00145	0.00256	NO
6	0.00131	0.00232	NO
5	0.00114	0.00201	NO
4	0.00094	0.00165	NO
3	0.00071	0.00125	NO
2	0.00046	0.00082	NO
1	0.00020	0.00035	NO

Fuente: Los datos en la columna de *Desplazamiento contra colapso* son los resultantes de la tabla 5.9, los de la tercera columna son los resultantes de multiplicar los primeros por Q' R* K_s .

De la tabla anterior puede apreciarse que se cumple el requisito de derivas menores a 0.004.

En cuanto a la dirección en Y, se repite el procedimiento de X. De manera que los valores en esta dirección pueden verse en las siguientes tablas.

Tabla 5.11 Desplazamiento estado límite de seguridad en Y

ESTADO LÍMITE DE SEGURIDAD CONTRA COLAPSO EN Y			
	Desplazamiento	Desplazamiento real	Mayor a $\gamma_{max} = 0.020$
Nivel	Y en cms	Desp * QR	
9	0.000221	0.00132	NO
8	0.000212	0.00126	NO
7	0.000198	0.00118	NO
6	0.000178	0.00106	NO
5	0.000154	0.00092	NO
4	0.000126	0.00075	NO
3	0.000096	0.00057	NO
2	0.000063	0.00037	NO
1	0.000028	0.00017	NO

Fuente: Los datos en la columna de *Desplazamiento* son los recuperados de la simulación, los de la columna de *Desplazamiento Real* son los primeros multiplicados por QR.

Tabla 5.12 Desplazamiento limitación de daños en Y

LIMITACIÓN DE DAÑOS ANTE SISMOS FRECUENTES EN Y			
	Desplazamiento	Desplazamiento real	Mayor a 0.004
Nivel	real contra colapso	Desp * Q'R * k_s	
9	0.00132	0.00233	NO
8	0.00126	0.00223	NO
7	0.00118	0.00208	NO
6	0.00106	0.00187	NO
5	0.00092	0.00162	NO
4	0.00075	0.00133	NO
3	0.00057	0.00101	NO
2	0.00037	0.00066	NO
1	0.00017	0.00029	NO

Fuente: Los datos en la columna de *Desplazamiento contra colapso* son los resultantes de la tabla 5.11, los de la tercera columna son los resultantes de multiplicar los primeros por Q' R* K_s .

De lo anterior puede apreciarse que al igual que los valores en X, las derivas obtenidas en Y están dentro de los parámetros reglamentarios. Por lo cual, en teoría, la estructura soportaría de manera adecuada los desplazamientos laterales en base a las fuerzas calculadas y al no tener ligados los elementos no estructurales a la estructura principal se reducirían los daños ante sismos frecuentes.

5.2.5.3 Resistencia de elementos

Una vez simulada la estructura es importante comprobar que los elementos puedan resistir los esfuerzos y deformaciones a los que un sismo los somete, por lo cual, para el presente caso práctico, solo se tomara en cuenta una columna que esté bajo grandes esfuerzos.

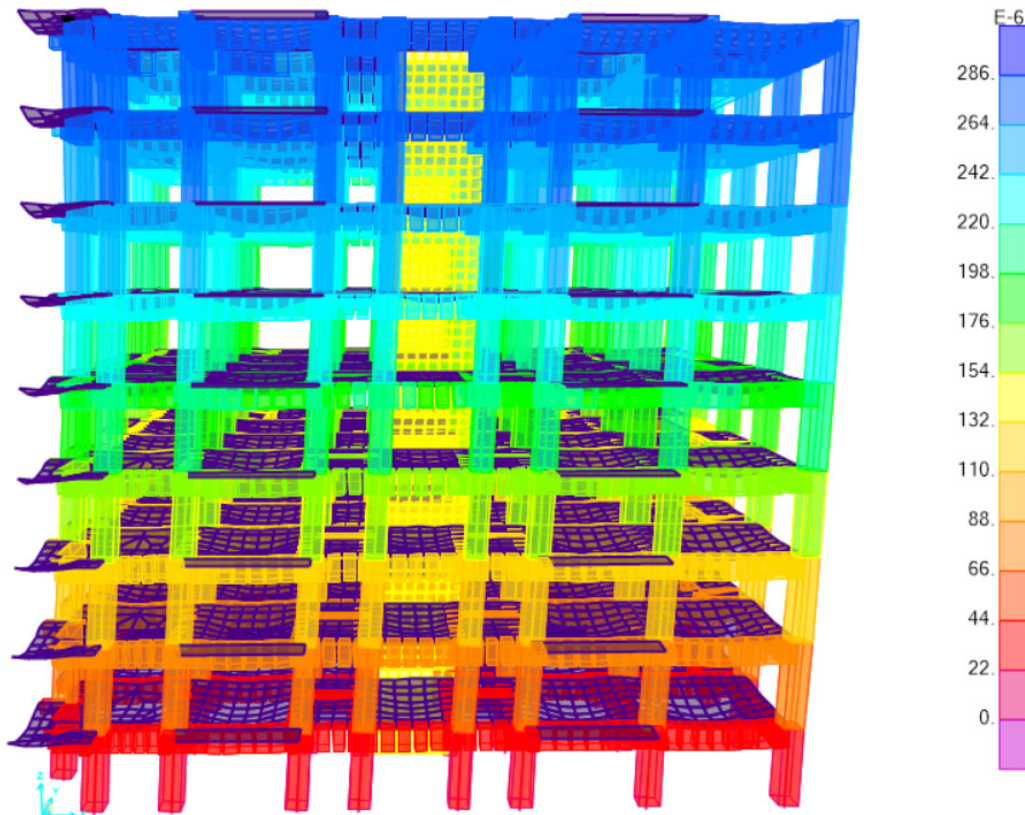


Gráfico 5.9 Estructura deformada donde el color morado es crítico y azul estable.

Como puede verse en la imagen anterior, el modelo sufre un mayor esfuerzo en todos los elementos de la planta baja que va disminuyendo conforme crece en altura, esto se debe a las fuerzas sísmicas que están ingresando y cambiando su estado de reposo, lo que a su vez genera solicitaciones y deformaciones que tendrá que resistir.

De manera que, en este caso, se seleccionará un elemento de ese nivel. Para elegir la columna que será analizada, se tomó en cuenta el diagrama de momentos de la estructura en dirección X (gráfico 5.10) que indica la capacidad máxima negativa de la fuerza sometida en los elementos.

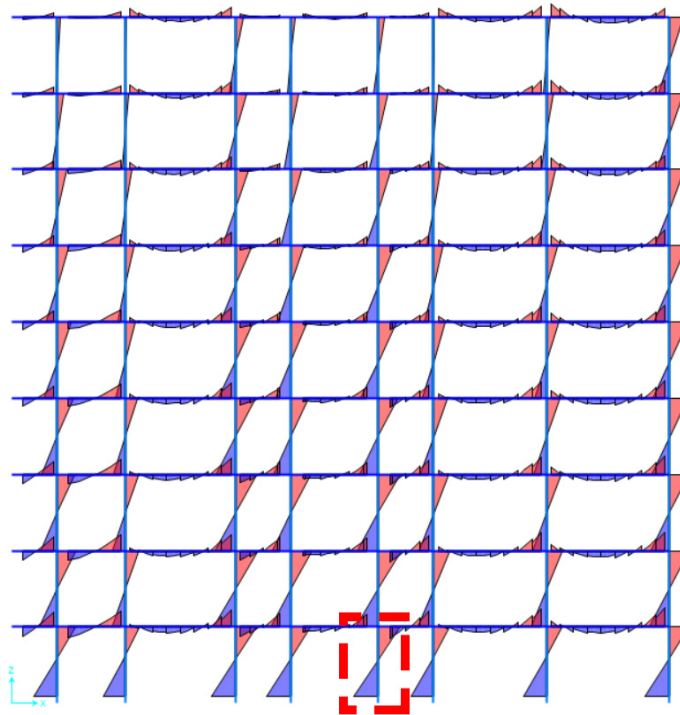


Gráfico 5.10 Diagrama de momentos en X, donde el recuadro señala el elemento con mayor esfuerzo.

De este diagrama, se retomó la columna central C-1P por ser la que, de todas las columnas excéntricas y esquineras con la misma sección, presenta mayores esfuerzos desfavorables, sus detalles pueden verse a continuación:

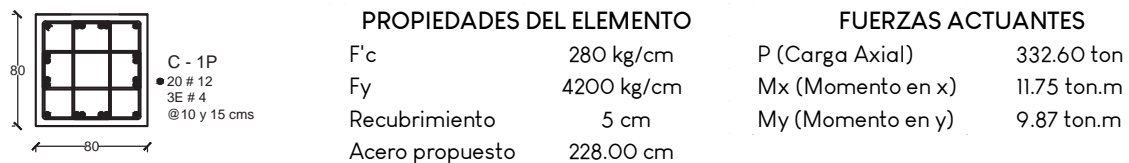


Gráfico 5.11 Características de la sección central C-1P. Fuente: Creación propia.

Para revisar los estados límites de falla de la columna, es necesario considerar la sección 5.2.3 de las NTC para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTCDCEC), las cuales señalan la utilización de la siguiente ecuación:

$$P_R = \frac{1}{\frac{1}{P_{Rx}} + \frac{1}{P_{Ry}} - \frac{1}{P_{R0}}} \quad (11)$$

Donde:

P_R = Carga normal resistente de diseño, aplicada con las excentricidades e_x , e_y

P_{R0} = Carga axial resistente de diseño, suponiendo $e_x = e_y = 0$.

P_{Rx} , P_{Ry} = Carga normal resistente de diseño, aplicada con una excentricidad en e_x , e_y respectivamente.

De esta manera, para resolver la ecuación 11 se requiere conocer los valores de P_{R0} , P_{Rx} y P_{Ry} los cuales consideran que el esfuerzo uniforme de compresión ($f''c$) del concreto equivale a:

$$f''c = (0.8 \times 280 \text{ kg/cm}^2) \times 0.85, \text{ es decir, } f''c = 190.40 \text{ kg/cm}^2$$

Resuelto esto, las incógnitas anteriores se resolverán de la manera siguiente:

$$P_{R0} = Fr * (f''c(Ac) + As * Fy) \quad (12)$$

Siendo Fr una constante de 0.75 (NTCC, 3.7), Ac el área de la sección (0.80cm x 80.0 cm = 6400/cm²), quedando:

$$P_{R0} = 0.75 * [190.4(6400 - 228) + 228(4200)]$$

$$P_{R0} = 1838961.60 \text{ kg}$$

En tanto que P_{Rx} se obtiene a través de

$$P_{Rx} = K_x * F_R * b * h * f'c \quad (13)$$

En donde k_x se toma del diagrama de interacción entre el índice de refuerzo a compresión y la excentricidad sobre su largo (e / h) de los ábacos para el diseño de columnas cuyo valor es 0.9; quedando:

$$P_{Rx} = 0.9 * 0.75 * 80 * 80 * 280$$

$$P_{Rx} = 1209600.00 \text{ kg}$$

En cambio para P_{Ry} se aplica la siguiente ecuación:

$$P_{Ry} = K_y * F_R * b * h * f'c \quad (14)$$

En donde k_y también se retoma de los ábacos para el diseño de columnas cuyo valor es 0.9; quedando:

$$P_{Ry} = 1 * 0.75 * 80 * 80 * 280$$

$$P_{Ry} = 1344000.00 \text{ kg}$$

Resueltos los valores de P_{R0} , P_{Rx} y P_{Ry} , se puede resolver la ecuación 11, sustituyendo los datos queda:

$$P_R = \frac{1}{\frac{1}{1,344,000} + \frac{1}{1,344,000} + \frac{1}{1,838,961.6}} \quad P_R = 1058.97 \text{ Ton}$$

Es de esta forma que se obtiene que la columna central C-1P soporta hasta una carga de 1058.97 Toneladas, así como esfuerzos de compresión y flexión en la dirección X y en Y.

5.2.6 Análisis sísmico de la Estructura Dual:

La estructura dual es un sistema conformado por la combinación de marcos (columnas- trabes) con muros de concreto armado, donde la existencia de estos últimos permitirá mejorar al desempeño de la estructura, pero a la vez aprovechará las ventajas arquitectónicas de los marcos como la flexibilidad del espacio interior.

De manera que los muros de concreto armado o también llamados muros rígidos, tienen la ventaja de que proveen gran resistencia, rigidez y ductilidad al sistema, debido a sus cualidades de resistir las fuerzas laterales a través del largo de su dimensión.

No obstante, para que los muros se comporten de manera satisfactoria, es necesario que tengan una adecuada distribución de acero de refuerzo a lo largo y alto del elemento, además de contar con miembros de borde que deberán tener un mayor refuerzo vertical y transversal, confinándolo.

Adicionalmente, es elemental su ubicación en la planta, ya que una organización errónea podría ocasionar efectos de torsión y solicitudes negativas. Para ello, Lin y Stotesbury señalan que 2 o más muros tienen que alinearse de manera ortogonal, es decir, simétricamente (1991, pp. 225-227), algunas opciones pueden verse a continuación:

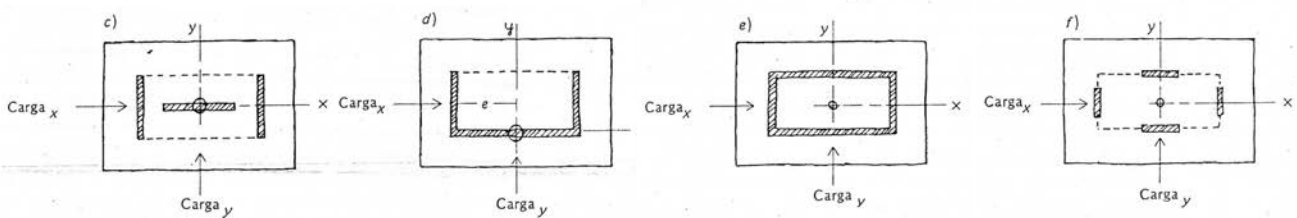
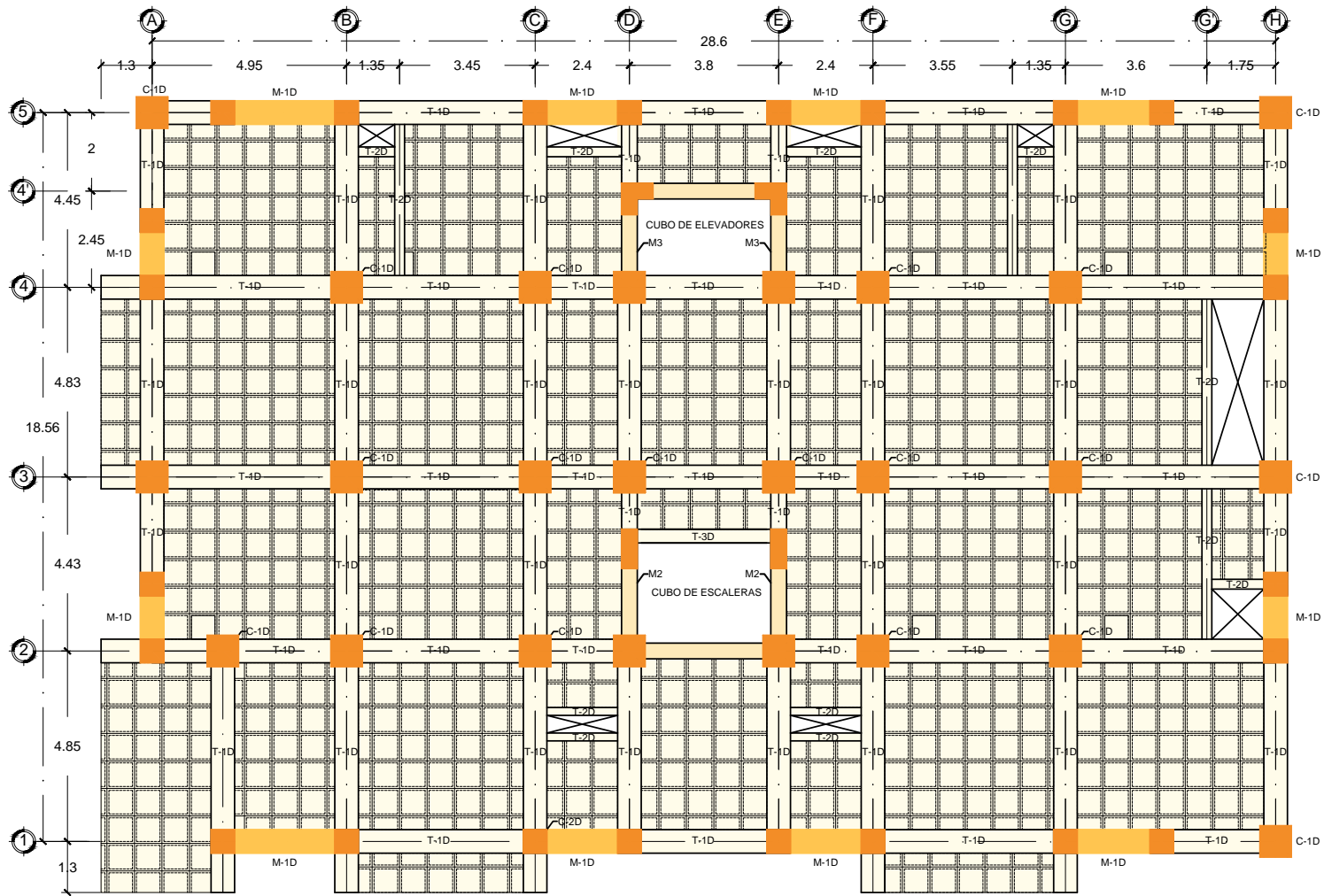
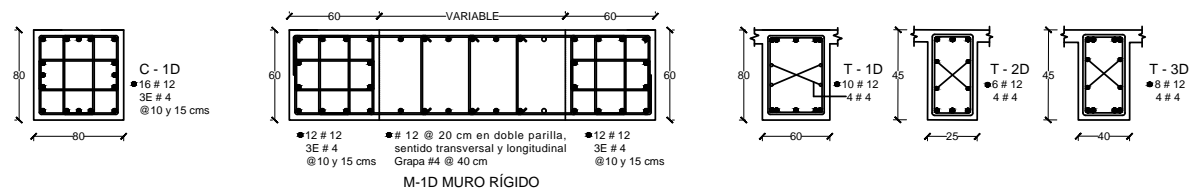


Gráfico 5.12 Algunas distribuciones de muros en planta. Fuente: Lin y Stotesbury, 1991, p.227.

Ahora bien, para este caso práctico, la colocación que coincidía con los requerimientos de la planta fue la **f**, por lo cual opto por distribuirse de esa manera los muros rígidos. En cuanto al resto de los elementos, se utilizó una base empotrada, el sistema de losa aligerada del plano 5 y los mismos elementos de trabes, cubos de escalera y elevadores del plano 7 (M1, M2, M3). El resto de los detalles y su plano pueden verse la página siguiente.

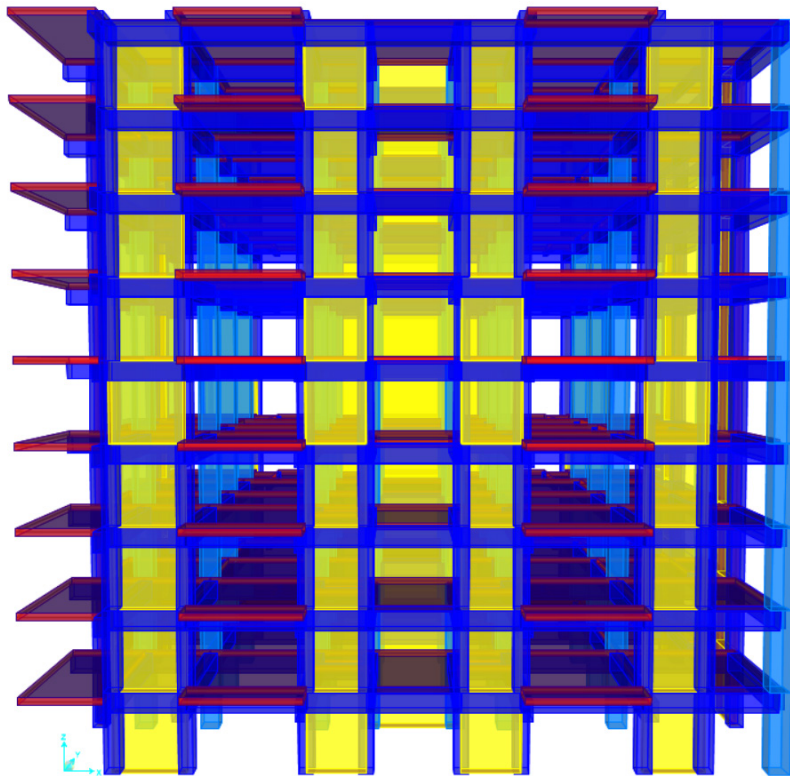


Plano 10. Losa de entepiso de la Estructura Dual (sin escala)

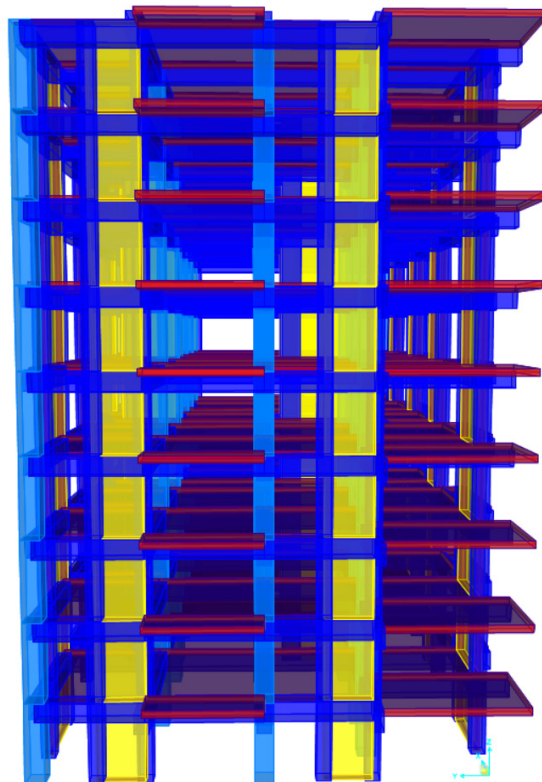


Plano 11. Detalle de elementos estructurales (sin escala)

El alzado de la estructura puede verse en los siguientes modelos:



Plano 12. Vista de la estructura en X, simulada con SAP2000



Plano 13. Vista de la estructura en Y, simulada con SAP2000

Ahora bien, la altura del sistema es la misma que la estructura porticada, por lo cual se puede analizar por el método estático que se describió en el subtema 5.2.5 y cuyas fuerzas se calcularán por medio de la fórmula **1**.

$$F_i = \frac{C}{Q'R} W_i h_i \frac{\Sigma W_i}{\Sigma W_i h_i} \tag{1}$$

Por cuestiones de evitar repetir información, se tiene que las incógnitas para las ecuaciones **2**, **3** y **4** tienen los mismos valores que los presentados anteriormente. Excepto en la **5** en donde el factor de sobre-resistencia (**R**) varía al tener un factor de hiperestaticidad (**k₁**) de **1.25** en lugar de 1 (ver tabla 5.6). Sustituyendo el valor, quedaría de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} R &= K_I R_0 + K_2 \\ R &= 1.25(2.0) + (-0.0145) \\ R &= 2.486 \end{aligned}$$

Otro factor que se requiere para resolver la formula **1** son los pesos por niveles, que cambia en la dual al ser más pesada que la porticada. Es así que retomando los datos establecidos en la tabla 5.5 se multiplicaron por su altura y se obtuvo lo siguiente:

Tabla 5.13 Peso y altura de cada nivel de la estructura dual en Ton

Losa	W_i (Ton)	h_i	$W_i h_i$ (Ton)
9	553.01	29.70	16,424.40
8	559.35	26.40	14,766.84
7	559.35	23.10	12,920.99
6	559.35	19.80	11,075.13
5	559.35	16.50	9,229.28
4	559.35	13.20	7,383.42
3	559.35	9.90	5,537.57
2	559.35	6.60	3,691.71
1	559.35	3.30	1,845.86
Σ	5,027.81	Σ	82,875.18

Fuente: Datos recuperados de la tabla 5.5 y de la altura del caso practico.

Al sustituir las incógnitas, se tiene que las fuerzas de diseño sísmico que afectaran a esta estructura son las siguientes:

$$F_i = \frac{0.838}{3.56 \times 2.486} W_i h_i \frac{5,027.81}{82,875.18} \quad (1-B)$$

$$F_i = (0.0946)W_i h_i(0.0607)$$

$$F_9 = (0.0946) 16,424.40 (0.0607) = 94.26 \text{ tonf}$$

$$F_8 = (0.0946) 14,766.84 (0.0607) = 84.75 \text{ tonf}$$

$$F_7 = (0.0946) 12,920.99 (0.0607) = 74.16 \text{ tonf}$$

$$F_6 = (0.0946) 11,075.13 (0.0607) = 63.56 \text{ tonf}$$

$$F_5 = (0.0946) 9,229.28 (0.0607) = 52.97 \text{ tonf}$$

$$F_4 = (0.0946) 7,383.42 (0.0607) = 42.37 \text{ tonf}$$

$$F_3 = (0.0946) 5,537.57 (0.0607) = 31.78 \text{ tonf}$$

$$F_2 = (0.0946) 3,691.71 (0.0607) = 21.19 \text{ tonf}$$

$$F_1 = (0.0946) 1,845.86 (0.0607) = 10.59 \text{ tonf}$$

5.2.6.1 Efectos de torsión estructura dual

Los efectos de torsión para este modelo usan el mismo procedimiento del tema 5.2.5.1 cuyas respuestas se pueden ver en el anexo 5, por lo anterior, aquí solo se presentan las excentricidades desfavorables:

Tabla 5.14 Excentricidades en x, y

Nivel	$1.5e_s + e_a$			$e_s - e_a$			
	e_{sx}	e_a	e_{x1}	Nivel	e_{sy}	e_a	e_{y2}
1	0.06	1.47	1.56	1	-0.47	0.97	-1.44
2	0.07	1.65	1.76	2	-0.47	1.09	-1.56
3	0.07	1.83	1.94	3	-0.47	1.21	-1.68
4	0.07	2.02	2.13	4	-0.47	1.33	-1.80
5	0.07	2.20	2.31	5	-0.47	1.45	-1.92
6	0.07	2.38	2.49	6	-0.47	1.57	-2.04
7	0.07	2.57	2.68	7	-0.47	1.69	-2.16
8	0.07	2.75	2.86	8	-0.47	1.81	-2.28
9	0.03	2.94	2.99	9	-0.64	1.93	-2.57

Fuente: Creación propia con datos recuperados de la ecuación 9 y 10

De lo anterior se puede inferir que la excentricidad más perjudicial es la que proviene de la dirección en X, a pesar de que en Y el centro se mueve hacia la izquierda, señalando que podría requerir más muros en Y para disminuir su volteo.

5.2.6.2 Estado límite de servicio

Para verificar que la estructura dual este dentro de los rangos límites, es necesario calcular las deformaciones laterales. Para ello, este caso se simuló con las fuerzas resultantes de la ecuación 1 (1-B), obteniendo el desplazamiento en X:

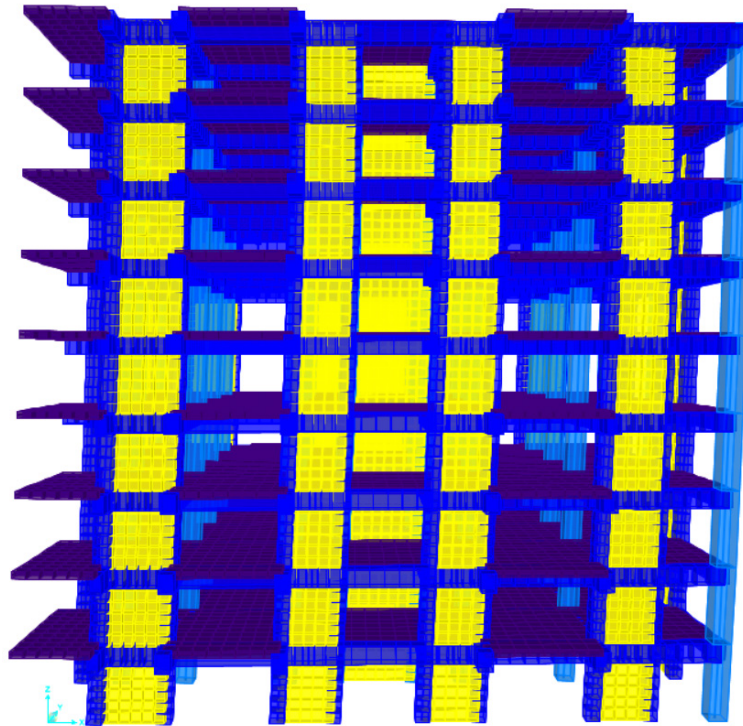


Gráfico 5.13 Desplazamiento en X de la estructura dual, simulada en Sap2000.

Los valores obtenidos del modelo se multiplicaron por QR^1 para obtener los desplazamientos reales, cuidando que no excedieran de 0.015, el cual es el límite marcado por las NTCDS-2020 para este tipo de sistemas.

Tabla 5.15 Desplazamiento estado límite de seguridad en X

ESTADO LÍMITE DE SEGURIDAD CONTRA COLAPSO EN X			
	Desplazamiento	Desplazamiento real	Mayor a
Nivel	X en cms	Desp * QR	$\gamma_{max} = 0.015$
9	0.00012	0.00088	NO
8	0.00012	0.00086	NO
7	0.00011	0.00081	NO
6	0.00010	0.00074	NO
5	0.00009	0.00065	NO
4	0.00007	0.00054	NO
3	0.00006	0.00041	NO
2	0.00004	0.00028	NO
1	0.00002	0.00014	NO

Fuente: Datos recuperados del programa SAP2000 multiplicados por QR.

1 Donde Q vale 3 y R 2.486, quedando $3 \cdot 2.486$

En tanto, los valores obtenidos para la limitación de daños ante sismos frecuentes en X se presentan en la tabla siguiente:

Tabla 5.16 Desplazamiento limitación de daños en X

LIMITACIÓN DE DAÑOS ANTE SISMOS FRECUENTES EN X			
	Desplazamiento	Desplazamiento real	Mayor a 0.004
Nivel	X en cms	Desp * Q'R *k _s	
9	0.00088	0.00195	NO
8	0.00086	0.00190	NO
7	0.00081	0.00180	NO
6	0.00074	0.00164	NO
5	0.00065	0.00144	NO
4	0.00054	0.00119	NO
3	0.00041	0.00092	NO
2	0.00028	0.00062	NO
1	0.00014	0.00032	NO

Fuente: Datos recuperados del programa SAP2000 multiplicados por Q'R y Ks.

De la tablas anteriores puede observarse que a pesar de que la deriva establecida para el sistema dual es menor que la marcada para marcos, los desplazamientos lograron ubicarse dentro del rango permitido.

Ahora bien, sobre las deformaciones laterales en la dirección Y el modelo es el siguiente:

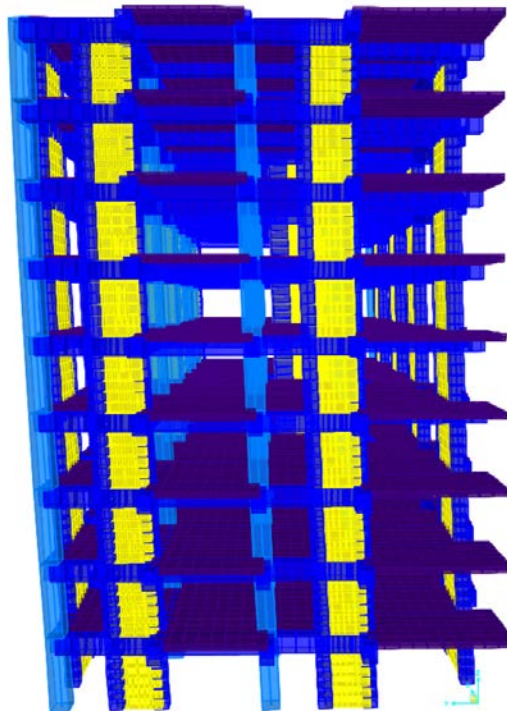


Gráfico 5.14 Desplazamiento en Y de la estructura dual, simulada en Sap2000.

Los datos para comprobar la seguridad contra colapso y limitación de daños en la dirección Y pueden verse en las tablas 5.17 y 5.18, respectivamente.

Tabla 5.17 Desplazamiento estado límite de seguridad en Y

ESTADO LÍMITE DE SEGURIDAD CONTRA COLAPSO EN Y			
	Desplazamiento	Desplazamiento real	Mayor a
Nivel	Y en cms	Desp * QR	$\gamma_{max} = 0.015$
9	0.000205	0.00153	NO
8	0.000195	0.00146	NO
7	0.000181	0.00135	NO
6	0.000163	0.00121	NO
5	0.000140	0.00105	NO
4	0.000117	0.00087	NO
3	0.000090	0.00067	NO
2	0.000060	0.00045	NO
1	0.000028	0.00021	NO

Fuente: Datos recuperados del programa SAP2000 multiplicados por QR.

Tabla 5.18 Desplazamiento limitación de daños en Y

LIMITACIÓN DE DAÑOS ANTE SISMOS FRECUENTES EN Y			
	Desplazamiento	Desplazamiento real	Mayor a 0.004
Nivel	Y en cms	Desp * Q'R * k_s	
9	0.00153	0.00339	NO
8	0.00146	0.00322	NO
7	0.00135	0.00299	NO
6	0.00121	0.00268	NO
5	0.00105	0.00232	NO
4	0.00087	0.00192	NO
3	0.00067	0.00149	NO
2	0.00045	0.00099	NO
1	0.00021	0.00047	NO

Fuente: Datos recuperados del programa SAP2000 multiplicados por Q'R y k_s .

De lo anterior puede apreciarse que los desplazamientos en Y son mayores a X. Esto puede deberse a que sobre el eje Y solo se tienen 2 muros de carga, contrario a los 4 muros ubicados sobre el eje X. A su vez, se aprecia que aunque los datos de Y se encuentran dentro de los valores, los valores de limitación de daño se acercan a 0.004. Esta situación quizá podría solucionarse con incorporar más muros en Y.

5.2.6.2 Resistencia de elementos

Para evaluar la efectividad del sistema y poder compararla, se debe verificar que los elementos resistan los esfuerzos y deformaciones que genera el sismo, de manera que para entender la deformación del sistema se presenta el siguiente gráfico:

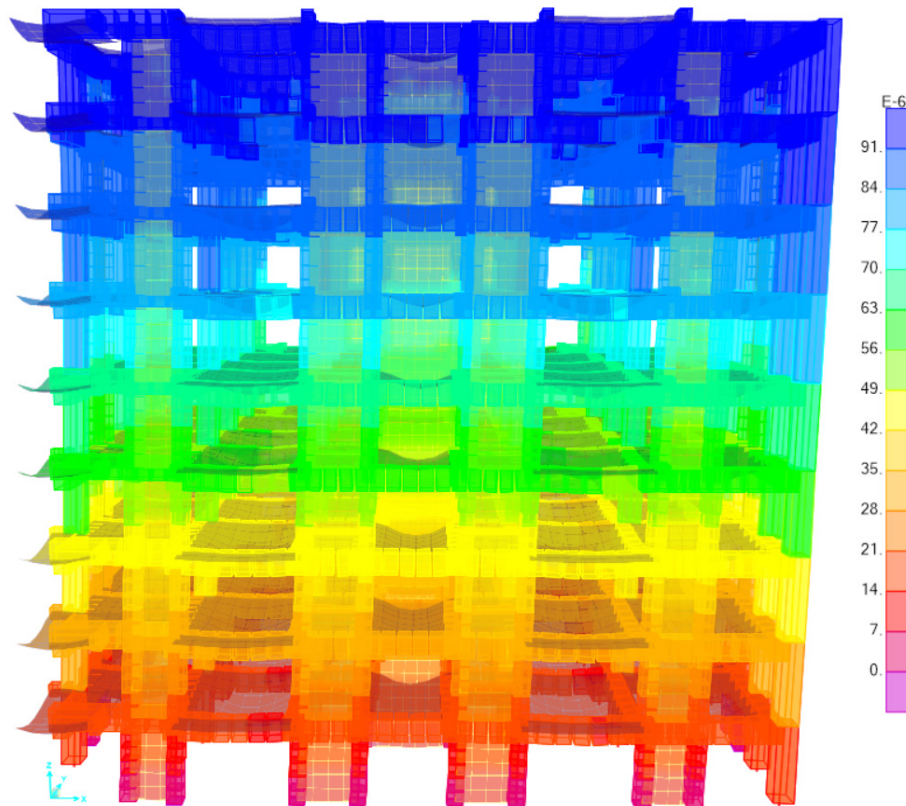


Gráfico 5.15 Estructura deformada donde el color morado es crítico y azul estable.

Fuente: Datos recuperados del programa SAP2000.

De la imagen anterior puede verse que, al igual que con el sistema Porticado, los esfuerzos se concentran en la base del mismo que conforme crece en altura va disminuyendo, efecto probablemente causado por las fuerzas de inercia y porque el primer modo de vibrar es el más crítico.

Es por lo anterior que para la elección del elemento a analizar, se llevó a cabo el mismo proceso del tema 5.2.5.3, es decir, analizar el diagrama de momento que arrojó el programa (gráfico 5.16) y encontrar aquel cuyo esfuerzo negativo y valor de giro fuera mayor al de los demás.

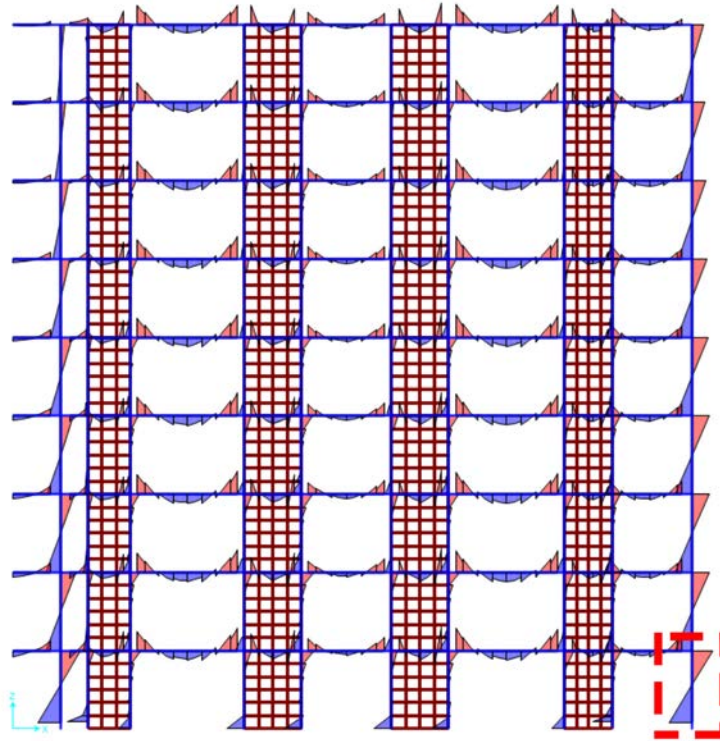


Gráfico 5.16 Diagrama de momentos en X, donde el recuadro señala el elemento con mayor esfuerzo.

De este diagrama, se retomó la columna esquinera C-1D de la planta baja por ser la que, de todas las columnas excéntricas y esquineras, presenta mayores esfuerzos desfavorables.

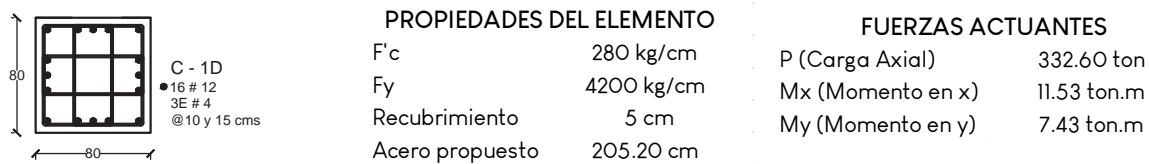


Gráfico 5.17 Características de la sección central C-1D. Fuente: Creación propia.

Al igual que para la estructura Porticada, los estados límites de falla de la columna se calcularán con la formula **11**, la cual es establecida por las NTCDCEC.

$$P_R = \frac{1}{\frac{1}{P_{Rx}} + \frac{1}{P_{Ry}} - \frac{1}{P_{R0}}} \tag{11}$$

El significado de estas variables se mencionó previamente así como el del esfuerzo uniforme de compresión ($f''c$) del concreto y el de F_r (ver tema 5.2.5.3), de modo que para evitar repetir información, a continuación se resolverán las incógnitas de P_{R0} , P_{Rx} y P_{Ry} .

$$P_{R0} = Fr * (f''c(Ac) + As * Fy) \quad (12)$$

$$P_{R0} = 0.75*[190.4(6400 - 205.2) + 205.2(4200)]$$

$$P_{R0} = 1746457.44 \text{ kg}$$

$$P_{RX} = K_x * F_R * b * h * f'c \quad (13)$$

$$P_{Rx} = 1.1*0.75*80*80*280$$

$$P_{Rx} = 1276800.00 \text{ kg}$$

$$P_{RY} = K_y * F_R * b * h * f'c \quad (14)$$

$$P_{RY} = 1.05*0.75*80*80*280$$

$$P_{RY} = 1276800.00 \text{ kg}$$

En donde k_x y k_y se retomaron de los ábacos para el diseño de columnas, cuyos datos fueron 0.95 para ambos.

Resueltas las incógnitas de P_{R0} , P_{Rx} y P_{Ry} , se puede resolver la ecuación 11, sustituyendo los datos queda:

$$P_R = \frac{1}{\frac{1}{1,746,457.44} + \frac{1}{1,276,800.00} + \frac{1}{1,276,800.00}}$$

$$P_R = 1,006.21 \text{ Ton}$$

De esta forma, se obtiene que la columna C-1D seleccionada soporta hasta una carga de 1,006.20 Toneladas, así como esfuerzos de compresión y flexión en la dirección X y en Y.

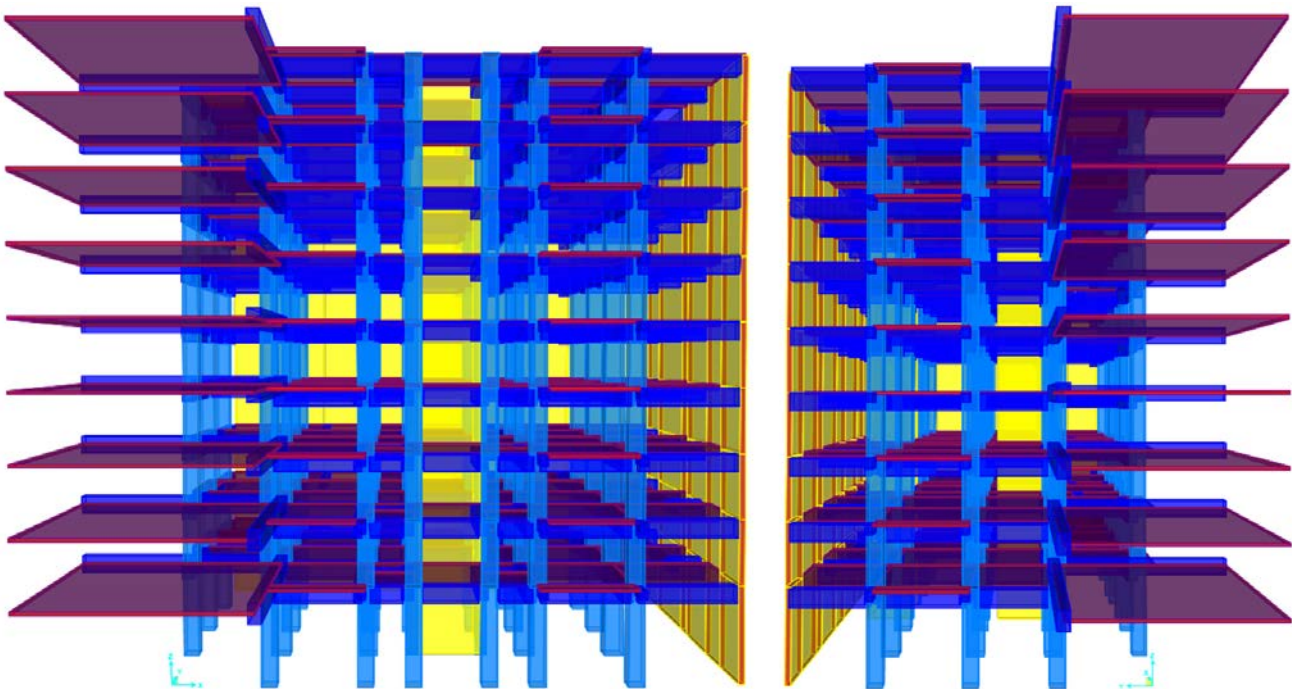
5.2.7 Análisis sísmico de la Estructura Irregular

Una vez analizada la estructura porticada y dual, se realiza la simulación de un modelo que tome en cuenta tres, de varios aspectos existentes, que crean una estructura irregular, éstos son:

- Una saliente mayor al 20% de la dimensión paralela en la que se considera la saliente, al salir 6.10 m en X, 5.0 en Y
- Diferencia de rigideces al mezclar muros y marcos sin una distribución optima
- Niveles del 2-9 con una dimensión mayor al 110% que el nivel 1, es decir, 165.16 m² más que la planta baja

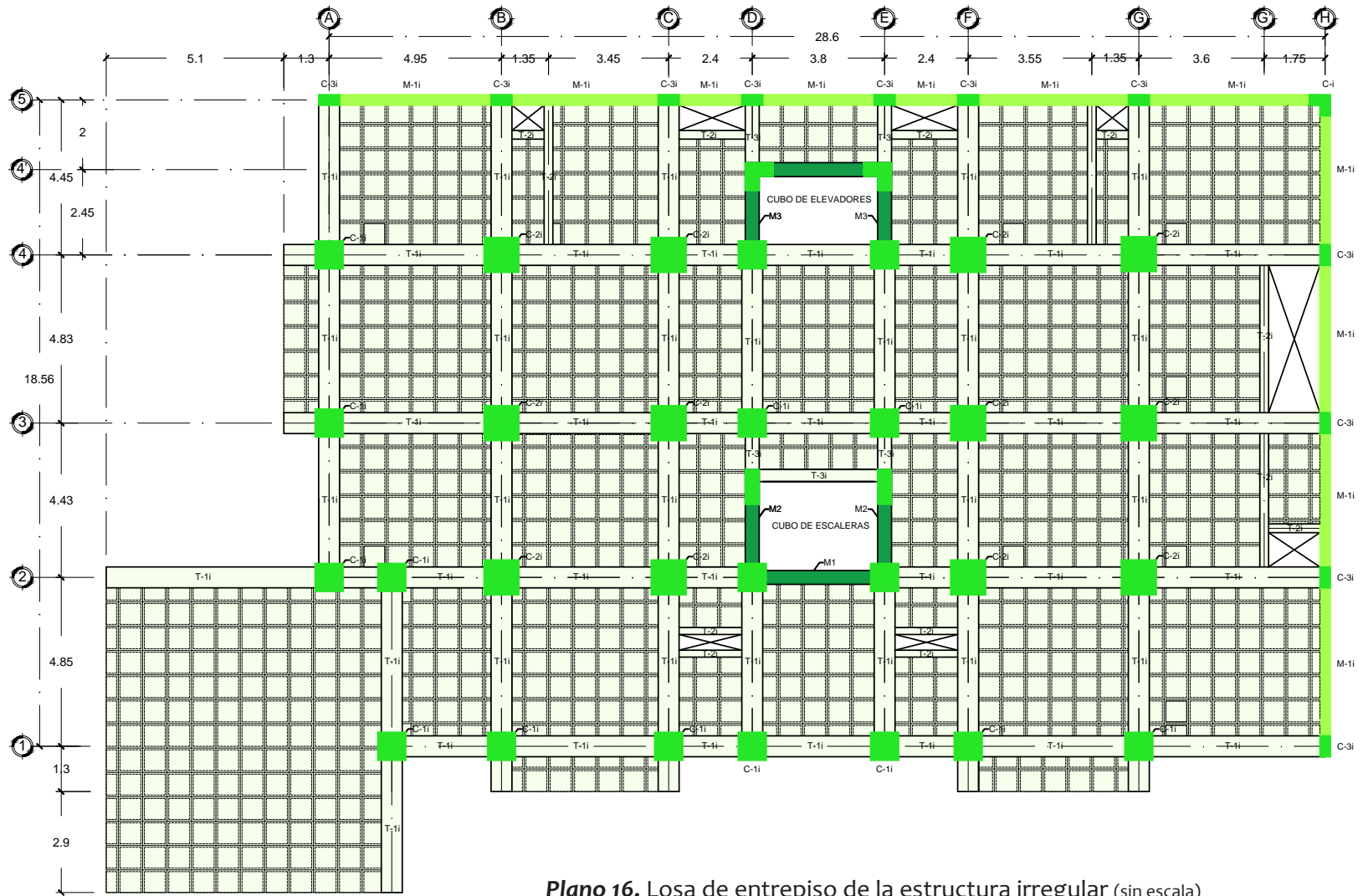
Aunado a ello, se considero que la planta comercial tuviera una altura de 5.0 m mientras que el resto 3.30 m. Los detalles de sus condiciones de regularidad se encuentran en la tabla 5.2 y su plano arquitectónico en el anexo 1.

En cuanto a los elementos estructurales propuestos, se utilizaron las mismas dimensiones y armados de la estructura porticada (ver plano **5, 7**), con la diferencia de que en los lados de la colindancia se propusieron muros, su detalle puede verse en la página siguiente. Y su alzado en los gráficos sucesivos:

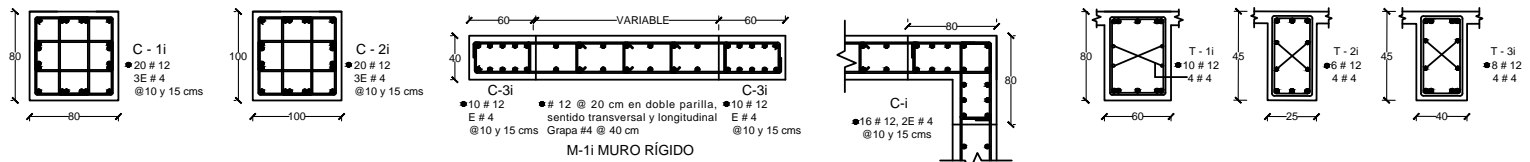


Plano 14. Vista en dirección X

Plano 15. Vista en dirección Y



Plano 16. Losa de entrepiso de la estructura irregular (sin escala)



Plano 17. Detalle de elementos estructurales (sin escala)

Ahora bien, como la altura del sistema es mayor a 30.00 m e irregular, correspondería analizarla por el método dinámico, no obstante, con el fin de unificar los resultados entre las diferentes propuestas, también se utilizará el método estático con el proceso que ha descrito previamente.

Por cuestiones de evitar repetir información, el método y los valores son iguales a la Porticada, excepto en el valor de Q' ya que en este caso se retoma el valor de la formula **2-A** (establecida en el análisis porticado) y se le aplica una corrección por irregularidad¹ que para este caso equivale a una constante de 0.8, quedando de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 & (2-A) \quad Q' = 1 + (3 - 1) \sqrt{\frac{0.921}{0.560}} \quad \longrightarrow \quad \begin{aligned} & \text{Corrección de } Q' = Q' \times 0.8 \\ & \text{Corrección de } Q' = 3.56 \times 0.8 \\ & \text{Corrección de } Q' = 2.848 \end{aligned} \\
 & Q' = 1 + (3 - 1) \sqrt{1.644} \\
 & Q' = 3.56
 \end{aligned}$$

Considerado lo anterior, también tienen que corregirse las cargas a las que estara sometida la estructura ya que aunque los pesos son los mismos, la altura fue la que se modificó, cambiando los valores del peso por nivel, como puede verse a continuación:

Tabla 5.19 Peso y altura de cada nivel de la estructura irregular en Ton

Losa	W_i (Ton)	h_i	$W_i h_i$ (Ton)
9	465.76	31.40	14,624.86
8	472.10	28.10	13,266.01
7	472.10	24.80	11,708.08
6	472.10	21.50	10,150.15
5	472.10	18.20	8,592.22
4	472.10	14.90	7,034.29
3	472.10	11.60	5,476.36
2	472.10	8.30	3,918.43
1	472.10	5.00	2,360.50
Σ	4,242.56	Σ	77,130.90

Fuente: Datos recuperados de la tabla 5.5 y de la altura del caso practico.

1 Penalidad que establecen las NTCDS-2020, para ver más información revizar el tema 3.2

De manera que al sustituirse los valores de la ecuación 1, se tiene que las fuerzas de diseño sísmico que afectan esta estructura serán las siguientes:

$$F_i = \frac{C}{Q'R} W_i h_i \frac{\Sigma W_i}{\Sigma W_i h_i}$$

$$F_i = \frac{0.838}{2.844 \times 1.985} W_i h_i \frac{4,242.56}{77,130.90}$$

$$F_i = (0.118)W_i h_i(0.0636)$$

$$F_9 = (0.148) 14,624.86 (0.0550) = 119.06 \text{ tonf}$$

$$F_8 = (0.148) 13,266.01 (0.0550) = 107.99 \text{ tonf}$$

$$F_7 = (0.148) 11,708.08 (0.0550) = 95.31 \text{ tonf}$$

$$F_6 = (0.148) 10,150.15 (0.0550) = 82.63 \text{ tonf}$$

$$F_5 = (0.148) 8,592.22 (0.0550) = 69.95 \text{ tonf}$$

$$F_4 = (0.148) 7,034.29 (0.0550) = 57.26 \text{ tonf}$$

$$F_3 = (0.185) 5,476.36 (0.0550) = 44.58 \text{ tonf}$$

$$F_2 = (0.185) 3,918.43 (0.0550) = 31.90 \text{ tonf}$$

$$F_1 = (0.185) 2,360.50 (0.0550) = 19.22 \text{ tonf}$$

5.2.7.1 Efectos de torsión estructura irregular

Los efectos de torsión para esta estructura se retoman del 5.2.5.1 y se pueden ver sus resultados en el anexo 6, presentandose aquí solo las excentricidades perjudiciales que se obtuvieron de la formula 9.

Tabla 5.20 Excentricidades en x, y

1.5e _s + e _a			1.5e _s + e _a				
Nivel	e _{sx}	e _a	e _{x1}	Nivel	e _{sy}	e _a	e _{y1}
1	0.73	1.47	2.57	1	0.48	0.97	1.69
2	0.72	1.65	2.73	2	0.42	1.09	1.72
3	0.72	1.83	2.91	3	0.42	1.21	1.84
4	0.72	2.02	3.10	4	0.42	1.33	1.96
5	0.72	2.20	3.28	5	0.42	1.45	2.08
6	0.72	2.38	3.46	6	0.42	1.57	2.20
7	0.72	2.57	3.65	7	0.42	1.69	2.32
8	0.71	2.75	3.82	8	0.41	1.81	2.43
9	0.65	2.94	3.92	9	0.14	1.93	2.14

Fuente: Creación propia con datos recuperados de la ecuación 9

5.2.7.2 Estado límite de servicio

Ahora bien, el proceso para obtener el estado límite de seguridad contra colapso y limitación de daños, fue el mismo que se describió anteriormente, obteniendo para los desplazamientos en X el gráfico y los resultados siguientes:

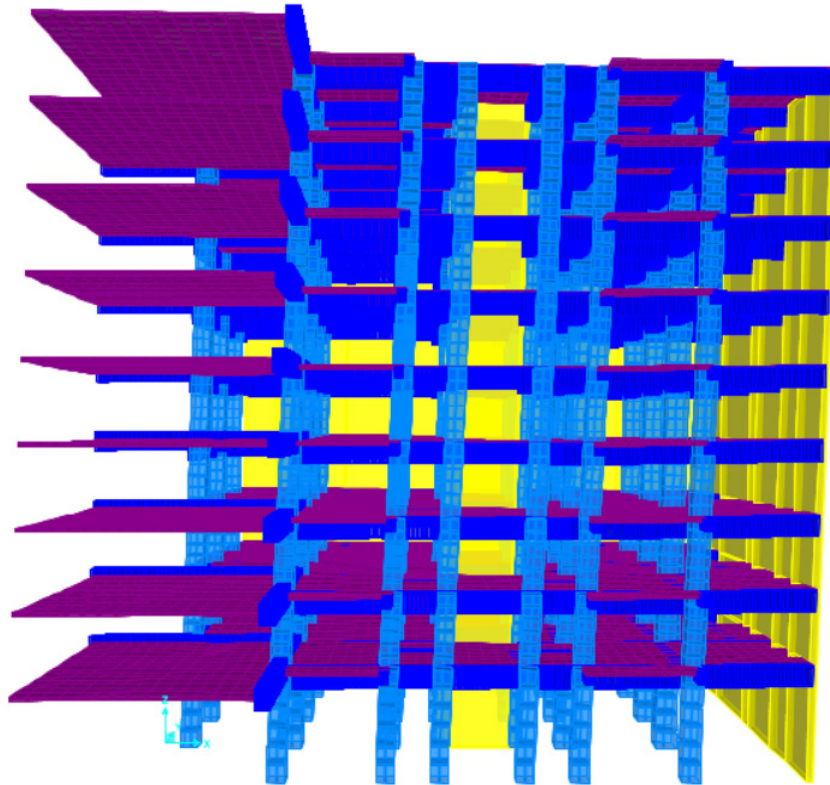


Gráfico 5.18 Desplazamiento en X de la estructura irregular, simulada con SAP2000.

Tabla 5.21 Desplazamiento estado límite de seguridad en X

ESTADO LÍMITE DE SEGURIDAD CONTRA COLAPSO EN X			
	Desplazamiento	Desplazamiento real	Mayor a
Nivel	X en cms	Desp * QR	$\gamma_{max} = 0.020$
9	0.00064	0.00384	NO
8	0.00060	0.00357	NO
7	0.00054	0.00324	NO
6	0.00048	0.00286	NO
5	0.00041	0.00243	NO
4	0.00033	0.00196	NO
3	0.00025	0.00148	NO
2	0.00017	0.00100	NO
1	0.00009	0.00054	NO

Fuente: Datos recuperados del programa SAP2000 multiplicados por QR.

Tabla 5.22 Desplazamiento limitación de daños en X

LIMITACIÓN DE DAÑOS ANTE SISMOS FRECUENTES EN X			
	Desplazamiento	Desplazamiento real	Mayor a 0.004
Nivel	X en cms	Desp * Q'R *k _s	
9	0.00384	0.00543	SI
8	0.00357	0.00505	SI
7	0.00324	0.00458	SI
6	0.00286	0.00404	SI
5	0.00243	0.00343	NO
4	0.00196	0.00278	NO
3	0.00148	0.00210	NO
2	0.00100	0.00142	NO
1	0.00054	0.00077	NO

Fuente: Datos recuperados del programa SAP2000 multiplicados por Q'R y K_s.

De la tabla 5.21 puede verse que los valores no sobrepasan la deriva máxima, por lo cual los desplazamientos están dentro del rango, sin embargo, la tabla 5.22 muestra que los resultados en la limitación de daños no son positivos, por lo cual del nivel 6 a 9 se puede observar que éstos si presentarían daño tras la repetición de eventos sísmicos.

Ahora bien, en cuanto a los desplazamientos en Y, su deformación lateral puede verse en el modelo inferior y sus desplazamientos en la siguiente página:

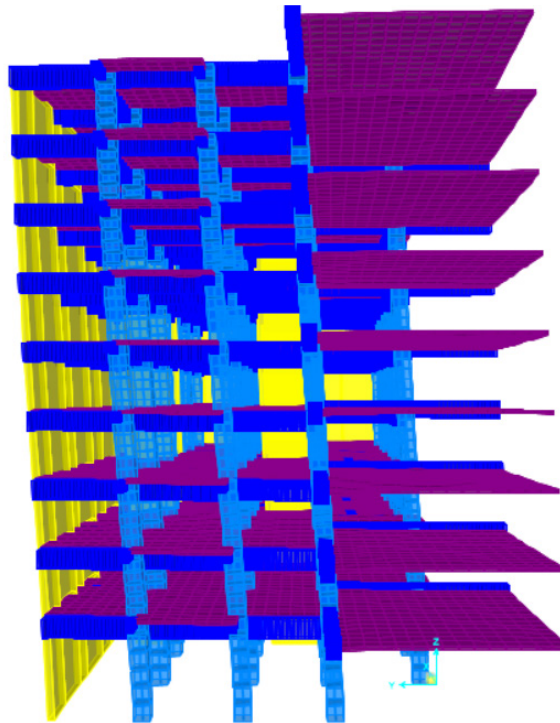


Gráfico 5.19 Desplazamiento en Y de la estructura irregular, simulada con SAP2000.

Tabla 5.23 Desplazamiento estado límite de seguridad en Y

ESTADO LÍMITE DE SEGURIDAD CONTRA COLAPSO EN Y			
	Desplazamiento	Desplazamiento real	Mayor a $\gamma_{max} = 0.020$
Nivel	Y en cms	Desp * QR	
9	0.000920	0.00548	NO
8	0.000865	0.00515	NO
7	0.000793	0.00472	NO
6	0.000703	0.00418	NO
5	0.000605	0.00360	NO
4	0.000493	0.00293	NO
3	0.000374	0.00223	NO
2	0.000254	0.00151	NO
1	0.000136	0.00081	NO

Fuente: Datos recuperados del programa SAP2000 multiplicados por QR.

Tabla 5.24 Desplazamiento limitación de daños en X

LIMITACIÓN DE DAÑOS ANTE SISMOS FRECUENTES EN Y			
	Desplazamiento	Desplazamiento real	Mayor a 0.004
Nivel	Y en cms	Desp * Q'R * k_s	
9	0.00548	0.00774	SI
8	0.00515	0.00728	SI
7	0.00472	0.00668	SI
6	0.00418	0.00591	SI
5	0.00360	0.00509	SI
4	0.00293	0.00415	SI
3	0.00223	0.00315	NO
2	0.00151	0.00213	NO
1	0.00081	0.00114	NO

Fuente: Datos recuperados del programa SAP2000 multiplicados por QR.

De lo anterior puede apreciarse que al igual que los valores en X, los estados límites de seguridad están dentro de los parámetros, no obstante, los valores en limitación de daños en Y sobrepasan los límites reglamentarios del nivel 4 al 9. Por lo cual, en teoría, podría implicar que esta estructura no soportará la repetición de daños como las que produce una replica sísmica, lo cual hace a la estructura insegura para su uso.

5.2.7.3 Resistencia de elementos

De los anterior, se conoce que la estructura irregular presentaría algunos inconvenientes ante la frecuencia de sismos, por lo cual es importante comprobar que los elementos puedan resistir los esfuerzos y deformaciones a los que el primer sismo los somete, los cuales se demuestran en el gráfico siguiente:

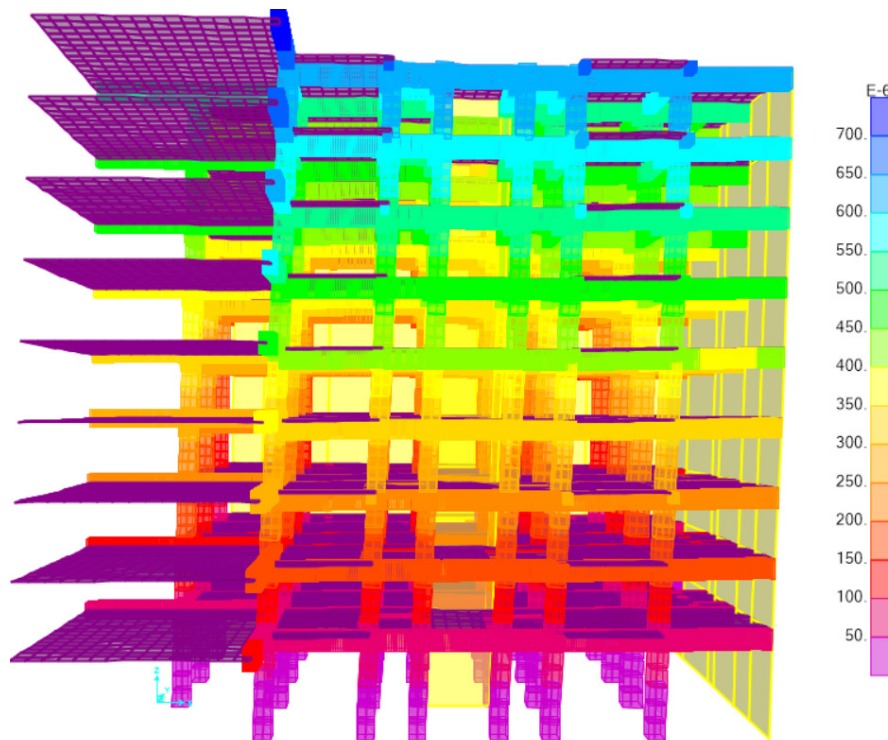


Gráfico 5.20 Estructura deformada donde el color morado es crítico y azul estable.

Fuente: Datos recuperados del programa SAP2000.

Como puede verse en la imagen anterior, los elementos verticales de la planta baja (que tienen mayor altura) sufren una concentración de esfuerzos crítica que se prolonga hasta el piso 3, que de hecho aunque disminuye muestra que los niveles 4 y 5 también son inestables.

De esta manera, se comprueba que la combinación inadecuada de marcos en fachadas y muros en colindancias así como una saliente mayor al 20% y exceso de dimensiones de una con respecto a otra, producen deformaciones que la estructura no podrá resistir, fallando los elementos de planta baja e incluso produciendo su colapso.

Aunque en las tablas de límite de servicio y en el gráfico anterior se encontró que la estructura no soportaría la repetición de sismos, se llevó a cabo el mismo proceso del tema 5.2.5.3, es decir, encontrar aquel cuyo esfuerzo negativo y valor de giro fuera mayor al de los demás.

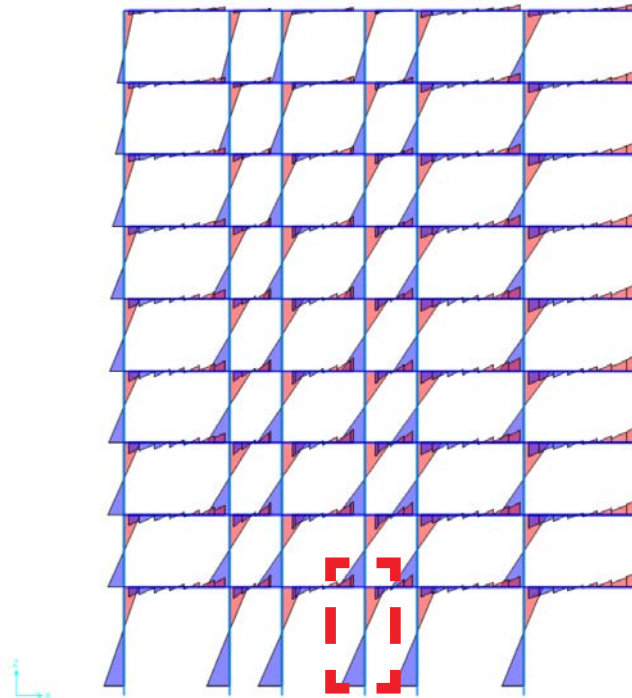


Gráfico 5.21 Diagrama de momentos en X, donde el recuadro señala el elemento con mayor esfuerzo.

De este diagrama, se retomó la columna C-1i cuyas cualidades son:

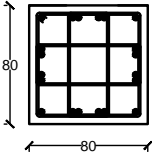
	PROPIEDADES DEL ELEMENTO		FUERZAS ACTUANTES	
	C - 1i • 20 # 12 3E # 4 @ 10 y 15 cms	F'c	280 kg/cm	P (Carga Axial)
	Fy	4200 kg/cm	Mx (Momento en x)	15.93 ton.m
	Recubrimiento	5 cm	My (Momento en y)	11.37 ton.m
	Acero propuesto	228.00 cm		

Gráfico 5.22 Características de la sección central C-1i. Fuente: Creación propia.

Al igual que para los otros dos sistemas, para establecer su resistencia se resolverá la ecuación **11**, donde para evitar repetir información, se resolverán las incógnitas de P_{R0} , P_{RX} y P_{RY} quedando:

$$P_{R0} = Fr * (f''c(Ac) + As * Fy) \tag{12}$$

$$P_{R0} = 0.7 * [190.4 * (6400 - 228) + 228 * 4200]$$

$$P_{R0} = 1,780,204.16 \text{ kg}$$

$$P_{RX} = K_x * F_R * b * h * f'c \tag{13}$$

$$P_{RX} = 0.95 * 0.7 * 80 * 80 * 280$$

$$P_{RX} = 1,191,680.00 \text{ kg}$$

$$P_{RY} = K_y * F_R * b * h * f'c \quad (14)$$

$$P_{RY} = 1.0 * 0.7 * 80 * 80 * 280$$

$$P_{RY} = 1,254,400.00 \text{ kg}$$

En donde k_x y k_y se retomaron de los ábacos para el diseño de columnas, cuyos datos son 0.7 y 1.0, respectivamente.

Resueltos los valores de P_{R0} , P_{Rx} y P_{Ry} , se puede resolver la ecuación 11, sustituyendo los datos queda:

$$P_R = \frac{1}{\frac{1}{1,780,204} + \frac{1}{1,191,680} + \frac{1}{1,254,400}}$$

$$P_R = 930.56 \text{ Ton}$$

De esta forma, se obtiene que la columna C-1i soporta hasta una carga de 930.56 Toneladas, menor que las demás estudiadas.

5.3 Comparativas de propuestas

Previamente, se modelaron y evaluaron de manera individual las estructuras Porticada, Dual e Irregular. En cada una de ellas se obtuvieron resultados diferentes por lo cual es necesario realizar un análisis comparativo que ayudé a identificar su comportamiento general, así como sus diferencias y similitudes.

Para lograrlo se tomaron en consideración 6 factores principales los cuales son:

- Fuerzas de diseño
- Excentricidades torsionales
- Resistencia de elementos
- Comparativa de resistencia de las columnas
- Estado límite de seguridad contra colapso
- Estado de limitación de daños ante sismos frecuentes

Esto para encontrar la propuesta más efectiva y ver si se cumplió o no el objetivo del presente estudio.

5.3.1 Fuerzas de diseño

Como se vio previamente, cuando se desarrolla un sismo de magnitud considerable, se produce en el edificio fuerzas de inercia, así como de acción y reacción, que generarán esfuerzos y deformaciones que alterarán su estabilidad. De ahí que lo ideal para poder constituir la estructura acorde a las demandas que experimentará es necesario calcular las fuerzas laterales de diseño. Por ello, para el presente trabajo, se calcularon las tres estructuras (subtema 5.2.5, 5.2.6 y 5.2.7) con la formula del método estático establecida en las NTCDS-2020, obteniendo los siguientes resultados:

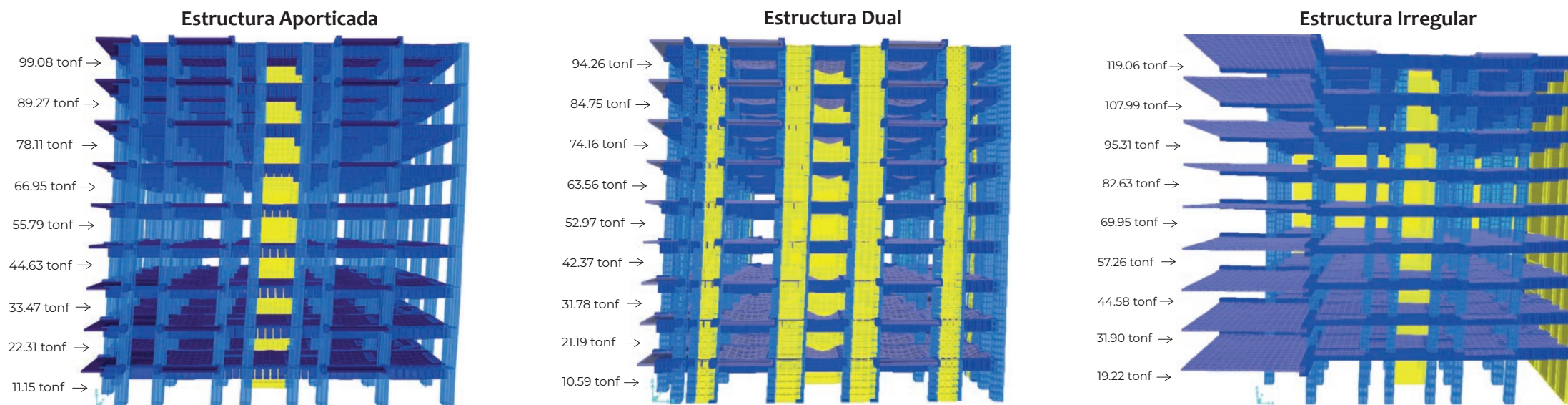


Gráfico 5.23 Se ilustra la fuerza lateral que presentan las estructuras en cada nivel. Fuente: Creación propia con modelos recuperados del programa SAP2000.

De manera general, se puede apreciar que las fuerzas experimentadas en la estructura irregular son mayores que en las otras estructuras, esto se debe a las características de la edificación ya que al tener un volado mayor al establecido en las normas y diferencia de rigideces por tener muros en las colindancias y columnas en las fachadas; hace necesario aplicar en el calculo una corrección por irregularidad, lo que incrementa las fuerzas de diseño y establece que su comportamiento podría ser más errático que las demás.

Otra cosa notable es que a pesar de que la estructura porticada y dual cumplen con todos los aspectos normativos, aquella que experimenta menores fuerzas es la dual, lo que significa que no solo se producirán menos fuerzas laterales, sino que podría ser más estable ante eventos sísmicos.

5.3.2 Excentricidades torsionales

Para este punto, habrá que recordar que la distancia entre el centro de rigidez (CR) y la línea donde actúa la fuerza lateral forma una excentricidad torsional (e_s) que es la que produce que un edificio gire sobre su centro, causando diferentes esfuerzos de torsión.

De hecho, como puede apreciarse en los diagramas de las tres estructuras, aquella que presenta mayor excentricidad torsional en la dirección de X (e_{x1}) es la estructura Irregular con un valor de 2.57 en el 1er nivel que se incrementa hasta 3.92 en el 9no nivel. La razón de que su rotación sea mayor a las demás se debe a la diferencia de rigideces causado por la combinación de muros de carga en colindancia que son elementos rígidos y columnas en fachadas que son más flexibles, lo cual causa incrementos de momentos de torsión y diferentes modos de vibrar, lo que finalmente podría hacerla entrar en resonancia y crear un desequilibrio importante.

En cuanto a la dirección en Y (e_{y1}), a pesar de que en la estructura dual su e_{y1} se corrió a la izquierda, la estructura porticada es la que denota mayor excentricidad torsional, al tener un corrimiento de 2.34 en el 1er nivel y 3.31 en el 9no. Esto podría deberse a que las otras estructuras cuentan con muros que las hacen más rígidas, por lo cual enfrentan mejor los movimientos torsionales en esa dirección.

Por lo anterior, puede apreciarse que a pesar de que las coordenadas de los centros excéntricos de todas las estructuras no coincidan con el centro de rigidez inicial, la edificación Irregular fue la más inestable al recorrerse entre los niveles un total de 47.82 m, seguido por la Porticada con 41.66 m y la Dual con 38.17 m.

Tabla 5.25 Excentricidad en x

Nivel	E. Porticada	E. Dual	E. Irregular
	e_{x1}		
1	1.05	1.56	2.57
2	1.19	1.76	2.73
3	1.37	1.94	2.91
4	1.56	2.13	3.1
5	1.74	2.31	3.28
6	1.92	2.49	3.46
7	2.11	2.68	3.65
8	2.29	2.86	3.82
9	3.18	2.99	3.92

Tabla 5.26 Excentricidad en y

Nivel	E. Porticada	E. Dual	E. Irregular
	e_{y1}		
1	2.34	-1.44	1.69
2	2.44	-1.56	1.72
3	2.56	-1.68	1.84
4	2.68	-1.80	1.96
5	2.8	-1.92	2.08
6	2.92	-2.04	2.2
7	3.04	-2.16	2.32
8	3.16	-2.28	2.43
9	3.31	-2.57	2.14

Fuente: Creación propia

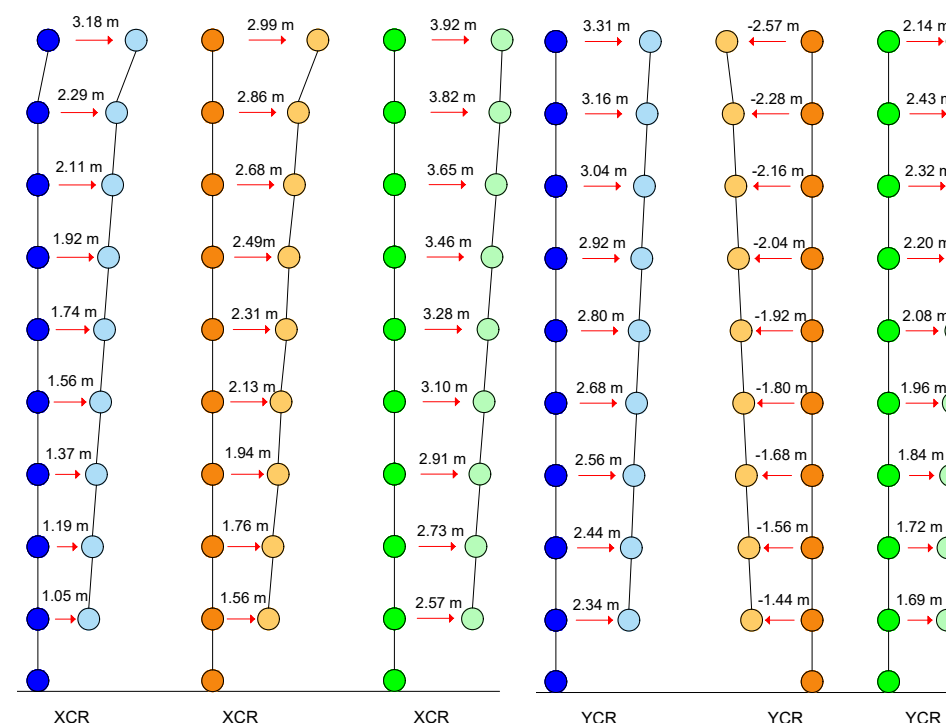


Gráfico 5.24 Muestra la distancia de los centros rotados en cada estructura por la excentricidad torsional. Fuente: Creación propia.

5.3.3 Resistencia de elementos

Una vez que se conocen las fuerzas, cargas y excentricidades torsionales a las que estará sometida cada estructura, se procede a revisar la resistencia de las propuestas para conocer los esfuerzos que experimentarán sus elementos en donde el color morado es esfuerzo crítico y azul estable.

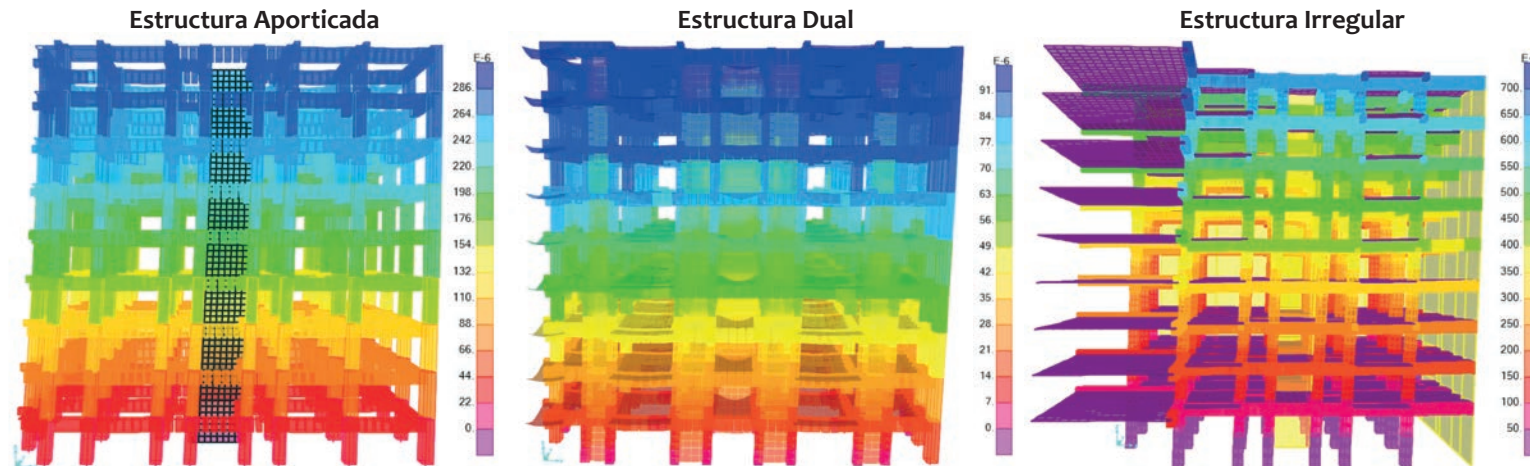


Gráfico 5.25 Esfuerzos de las estructuras en dirección X. Fuente: Creación propia con los modelos del programa SAP2000.

De manera que como puede apreciarse en los gráficos, a pesar de que en los tres casos los valores de las deformaciones varían significativamente, en todos ellos el esfuerzo se concentra en la planta baja siendo crítica en el caso de la irregular y de riesgo en las dos restantes. Esto se debe a que previo a un sismo los inmuebles suelen encontrarse en estado de reposo por lo cual cuando las fuerzas sísmicas llegan, se experimenta un 1er movimiento fuerte que lo hará vibrar en toda su altura, desatando fuerzas de inercia que incrementarán el esfuerzo y deformaciones de sus elementos.

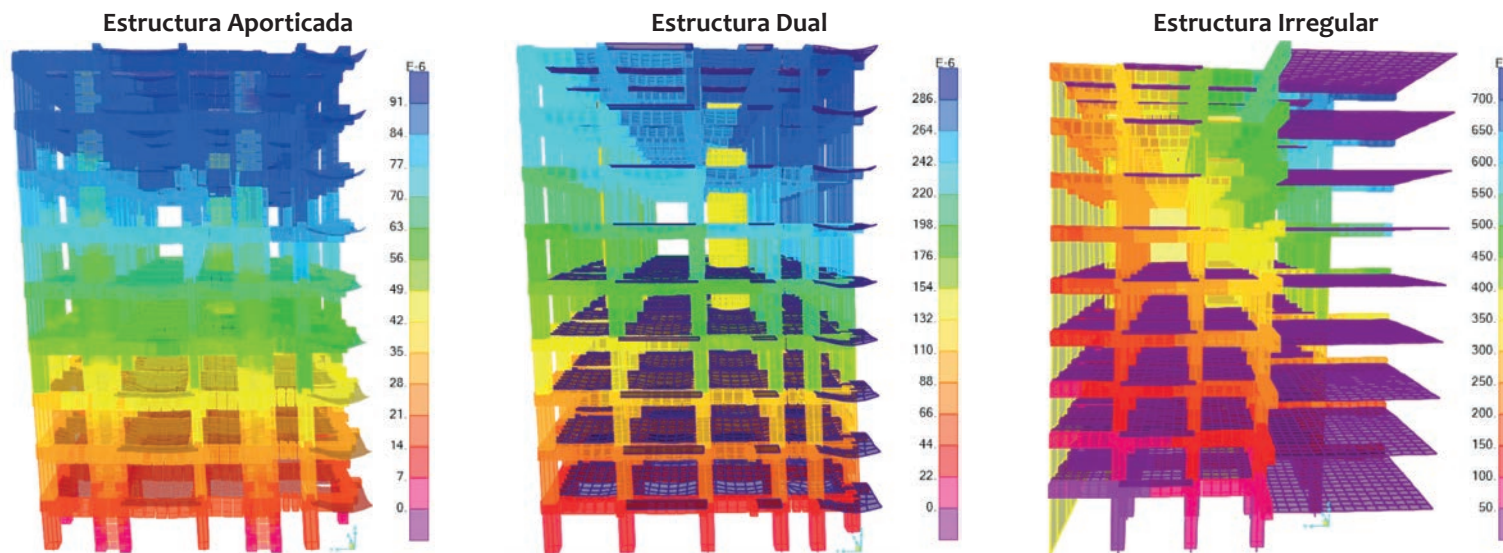


Gráfico 5.26 Esfuerzos de las estructuras en dirección Y. Fuente: Creación propia con los modelos del programa SAP2000.

Adicionalmente, puede observarse que en ambas direcciones, la estructura dual y porticada logran estabilizarse a partir del 4to nivel, mientras que la irregular en X lo logra hasta el sexto nivel, y en Y se mantiene estresada en toda su altura, sobre todo en los elementos cercanos al muro.

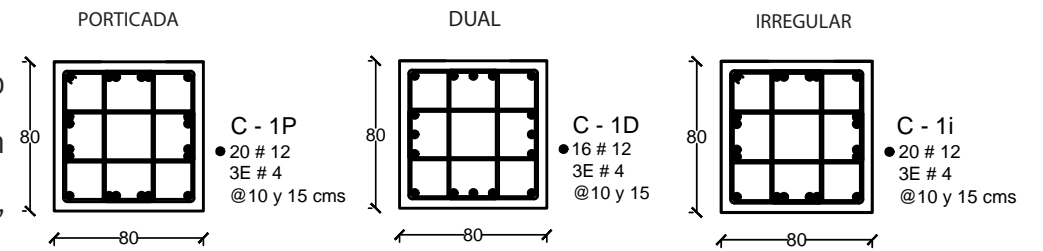
5.3.4 Comparativa de resistencia de las columnas

Anteriormente, se estableció que cuando las estructuras experimentan un sismo se generan en ellas una serie de modos de vibrar que harán que sus elementos sufran esfuerzos y deformaciones cuya resistencia evitará la falla o el colapso de las mismas, motivo por el cual es importante ubicar los miembros más fatigados para conocer si estos podrán preservar su integridad ante diferentes eventos sísmicos.

Por ello, para el presente estudio y como se vio en los gráficos 5.25 y 5.26, los esfuerzos más fuertes de las diferentes propuestas se ubicaron en la planta baja, razón por la que se retomó una columna por modelo para conocer sus cargas resistentes, que se establecieron en función de sus dimensiones, armados y fuerzas actuantes.

Como puede apreciarse en el gráfico 5.27, a pesar de que la columna C-1i tiene el mismo armado que la C-1P e incluso es mayor a la C-1D, está que pertenece a la estructura irregular fue la columna que presentó mayores fuerzas actuantes con M_x , M_y y P mayores a las del resto, causado por los esfuerzos que produce en ella la irregularidad de su estructura.

En cuanto a las cargas resistentes puede observarse que la columna C-1P que es de la estructura porticada, soporta mayores cargas en PRO, PRX y PRY, siendo en general la que soportaría una mayor carga resistente de diseño, seguida de la dual y al ultimo la irregular. No obstante, cabe señalar que aunque la C-1D que pertenece a la dual tiene una menor carga resistente de diseño, esto se debe a que sus armados y dimensiones son menores, por lo cual sí es estable para cumplir las exigencias de su estructura.



Plano 11. Detalle de los elementos estructurales

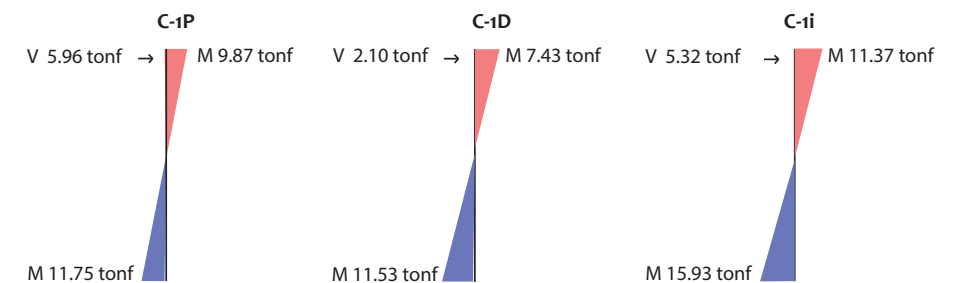


Gráfico 5.27 Diagramas de momentos por estructura. Fuente: Creación propia con datos del programa SAP2000.

Tabla 5.27 Resistencia de columnas en las diferentes propuestas

COLUMNA	E.PORTICADA	E.DUAL	E. IRREGULAR
F'c	280 kg/cm ²		
Fy	4200 kg/cm ²		
Recubrimiento	8.18 cm		
Acero propuesto	228.00 cm ²	205.2 cm ²	228.00 cm ²
FUERZAS ACTUANTES			
P (Carga Axial)	332.60 ton	332.60 ton	383.55 ton
Mx (Momento en x)	11.75 ton.m	11.53 ton.m	15.93 ton.m
My (Momento en y)	9.87 ton.m	7.43 ton.m	11.37 ton.m
CARGAS RESISTENTES			
Pro (Carga axial)	1,838.96 tonf	1,746.45 tonf	1,780.20 tonf
Prx (Carga en x)	1,344.00 tonf	1276.80 tonf	1,191.68 tonf
Pry (Carga en y)	1,344.00 tonf	1276.80 tonf	1251.40 tonf
Pr (Carga resistente de diseño)	1058.97 Tonf	1006.20 tonf	930.56 tonf

Fuente: Creación propia

5.3.5 Estado límite de seguridad contra colapso

Una vez modeladas las diferentes propuestas estructurales a través del programa SAP2000, y de ingresar la aplicación de sus fuerzas laterales, se procedió a obtener el grado de deformación. Esto con el propósito de lograr un modelo desplazado que señalara los desplazamientos que experimentaría cada nivel en cada una de las estructuras tanto en la dirección X como en la de Y.

Los datos recabados fueron de gran utilidad ya que multiplicados por el Comportamiento Sísmico (Q) y el Factor de Reducción por Sobre-Resistencia (R) establecieron el Desplazamiento Real, cuya distorsión límite (y_{max}) no puede ser mayor a 0.20 en la estructura porticada e irregular; y mayor a 0.15 en la dual, esto para verificar que los valores se mantengan dentro del cumplimiento del estado límite de seguridad contra colapso que marcan las NTCDS-2020. A continuación, se anexan los resultados:

Gráfico 5.28 Estado límite de seguridad contra colapso en X. Fuente: Creación propia.

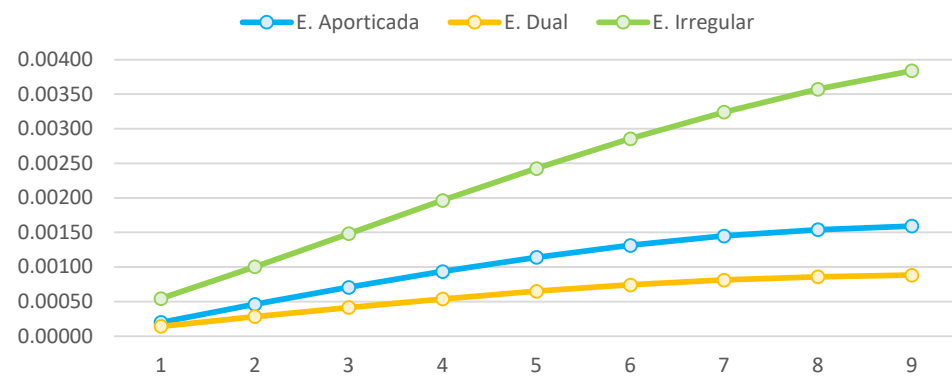


Tabla 5.28 Desplazamiento estado limite de seguridad contra colapso en X (Mayor a y_{max})

Nivel	1	2	3	4	5	6	7	8	9
E. Aporticada	0.00020	0.00046	0.00071	0.00094	0.00114	0.00131	0.00145	0.00154	0.00159
E. Dual	0.00014	0.00028	0.00041	0.00054	0.00065	0.00074	0.00081	0.00086	0.00088
E. Irregular	0.00054	0.00100	0.00148	0.00196	0.00243	0.00286	0.00324	0.00357	0.00384

Fuente: Creación propia

Gráfico 5.29 Estado límite de seguridad contra colapso en Y. Fuente: Creación propia.

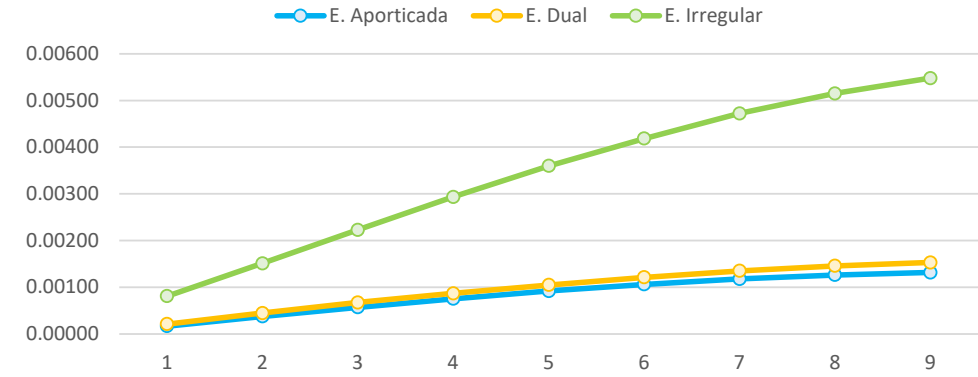


Tabla 5.29 Desplazamiento estado limite de seguridad contra colapso en Y (Mayor a y_{max})

Nivel	1	2	3	4	5	6	7	8	9
E. Aporticada	0.00017	0.00037	0.00057	0.00075	0.00092	0.00106	0.00118	0.00126	0.00132
E. Dual	0.00021	0.00045	0.00067	0.00087	0.00105	0.00121	0.00135	0.00146	0.00153
E. Irregular	0.00081	0.00151	0.00223	0.00293	0.00360	0.00418	0.00472	0.00515	0.00548

Como puede apreciarse en el grafico anterior, en todas las estructuras en ambas direcciones, los valores no sobrepasan la distorsión limite, por lo cual sus desplazamientos se encuentran dentro del rango y no implican un riesgo de colapso. Sin embargo, si puede apreciarse que la irregular fue la que presentó datos más elevados debido a que los muros ubicados en colindancias al tener rigideces más altas, incrementaron los esfuerzos y deformaciones de los elementos flexibles, de hecho, los desplazamientos más negativos se inclinaron hacia donde estaban localizados los muros.

5.3.6 Estado de limitación de daños ante sismos frecuentes

Una vez determinados los desplazamientos reales que experimenta cada una de las estructuras, es posible conocer si las propuestas cumplen el requisito de limitación de daños frecuentes que marcan las NTCDS-2020. Para ello, se retoman los valores establecidos en los subtemas 5.2.5.1 (porticada), 5.2.6.1 (dual) y 5.2.7.1 (irregular), y se considera que el límite de este requerimiento es de 0.004, debido a que en todas las propuestas los elementos no estructurales están separados de la estructura principal.

Gráfico 5.30 Limitación de daños ante sismos frecuentes en X. Fuente: Creación propia.

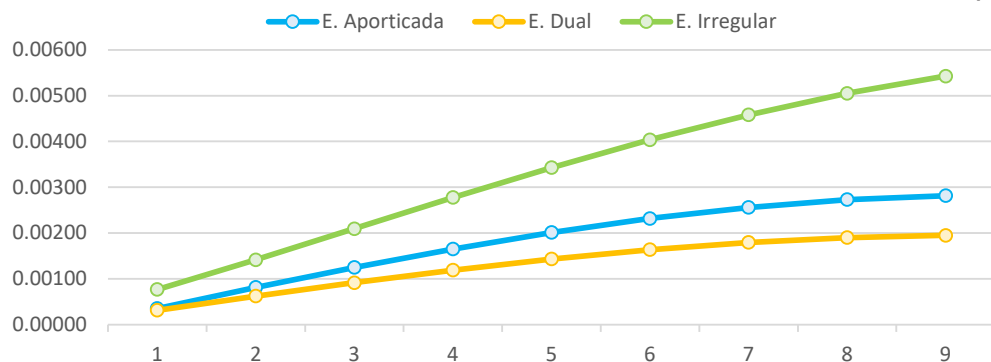


Tabla 5.30 Comparativa de estado limites X. Fuente: Creación propia

Nivel	1	2	3	4	5	6	7	8	9
E. Aporticada	0.00035	0.00082	0.00125	0.00165	0.00201	0.00232	0.00256	0.00273	0.00282
E. Dual	0.00032	0.00062	0.00092	0.00119	0.00144	0.00164	0.00180	0.00190	0.00195
E. Irregular	0.00077	0.00142	0.00210	0.00278	0.00343	0.00404	0.00458	0.00505	0.00543

Gráfico 5.31 Limitación de daños ante sismos frecuentes en Y. Fuente: Creación propia.

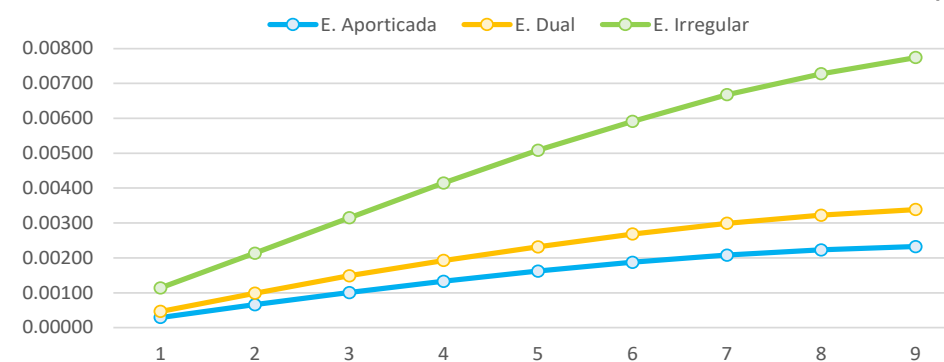


Tabla 5.31 Comparativa de estado limites Y. Fuente: Creación propia

Nivel	1	2	3	4	5	6	7	8	9
E. Aporticada	0.00029	0.00066	0.00101	0.00133	0.00162	0.00187	0.00208	0.00223	0.00233
E. Dual	0.00047	0.00099	0.00149	0.00192	0.00232	0.00268	0.00299	0.00322	0.00339
E. Irregular	0.00114	0.00213	0.00315	0.00415	0.00509	0.00591	0.00668	0.00728	0.00774

Fuente: Creación propia

De la tabla, puede observarse que la estructura irregular fue aquella que rebasó el límite en ambas direcciones, sobrepasando el límite en X a partir del nivel 6 y del 4 en la dirección de Y, lo que sugiere que, por las mismas características de su configuración, esta no soportaría la repetición de los desplazamientos dañándose e incluso colapsando ante sismos frecuentes. En cuanto a la estructura porticada, esta muestra valores dentro del rango y, tanto en la dirección X como en Y, sus cifras no varían mucho, lo que podría implicar que soportaría adecuadamente más eventos.

Por otro lado, aunque la estructura dual es la que se mantiene más estable en X con valores debajo al 0.0020, en Y se observa un incremento en los dígitos, alcanzando casi el límite establecido. Esto podría deberse a que en la dirección de X tiene un mayor número de muros, lo que la hace más estable en esa dirección que los dos muros ubicados en Y.

5.4 Análisis de la información

Una vez presentados los resultados del análisis comparativo entre la estructura porticada, dual e irregular, es posible determinar las diferencias significativas que influyen en su comportamiento sísmico.

Como se estableció previamente, se diseñó un proyecto en el que se incorporaron criterios de diseño sísmico desde la fase del anteproyecto, lo que sirvió para desarrollar un diseño arquitectónico que fuera regular tanto en alzado como en planta. En la parte del alzado se buscó que no fuera uniforme, sino que jugara con la visual con elementos como ventanales, balcones y celosías, donde a excepción de la irregular con su saliente prolongada, se buscó un alzado catalogado como regular.

En planta se incorporaron los criterios de regularidad de las NTCDS-2020, los cuales se sintetizan a continuación:

- Se mantuvo la simetría en planta al distribuir los espacios en retículas de 2.4 a 5.35 en la dirección de X y de 4.43 a 4.85 en la dirección de Y, preservando así que todos los ejes principales se mantuvieran rectos y que los elementos verticales sean paralelos, dotándolo de resistencia ante cargas laterales .

- En cuanto a su relación altura-base, esta no es mayor a 4 ya que la altura establecida fue de 29.70 m para la porticada y dual; y en la irregular 31.40 m, manteniéndose en una relación de 1.6 y 1.69, respectivamente.

- Sobre la relación largo-ancho, esta no se diseñó ni muy alargada ni comprimida para evitar efectos de volteo, por lo cual no es mayor a 4 ya que se mantuvieron las dimensiones del terreno, manteniendo una relación de 1.54.

- En el aspecto de salientes estas se forman por las terrazas, en la porticada y dual son de 1.1 m de saliente mientras que en la irregular se sobrepasa del 20% en ambas direcciones, al salir 6 en X y 5 en Y.

Esto impacta de manera elemental en su comportamiento ya que como puede apreciarse en el subtema 5.3.3, los elementos sustentantes de esa saliente tanto en X como en Y, se mantienen en tensión, regularizándose en X en el nivel 8 y en Y manteniéndose en tensión en toda su altura. De hecho, esta misma condición hace que la estructura dual y porticada se mantengan como diafragmas rígidos mientras que la irregular no, lo que de acuerdo a las NTCDS-2020 podría crear diagramas no tan resistentes.

- En cuanto a los huecos, las normas sostienen que no deben exceder un 20% en planta y en la misma posición, requisito que se respetó en las 3 así como las variaciones de peso y dimensiones que se mantuvieron similares en todos los niveles.

- En cuanto a las columnas, en todas las estructuras se mantuvieron restringidas por vigas y también de misma altura, aunque en la irregular su planta baja es de uso comercial y sus columnas son más altas que el resto con 5.00 m de altura, no existen variaciones de altura en un mismo entrecimiso. Aunque esto es permitido por las normas, si podría existir cierta relación en porque en la resistencia de los elementos (diagrama 5.25), fue esta la única que mostro un esfuerzo crítico en las columnas de planta baja.

- Sobre la rigidez lateral, se establece no sobrepasar un 20% de la del entrecimiso inferior, lo que se mantiene en la porticada y dual pero no en la irregular, ya que combina elementos rígidos como muros con elementos más flexibles como columnas, lo que como se mencionó en las comparativas de resistencia (subtema 5.3.3) los elementos cercanos a los muros se mantuvieron bajo mayor estrés.

Estas características se tomaron en cuenta desde la fase del anteproyecto e influyeron en el diseño arquitectónico, lo que tiene relación directa con el desempeño que experimentó cada estructura simulada, ya que como puede

apreciarse en los análisis comparativos, la estructura irregular que no considero varios de los criterios de regularidad mostró en todos los gráficos un comportamiento más errático, como en los siguientes:

- En las fuerzas laterales de diseño se experimentaron mayores fuerzas en todos los niveles, partiendo de 19.22 tonf y alcanzando 119.06 tonf, la razón se debe a la asimetría de su planta y alzado, ya que debido a ello en su cálculo estructural se tuvo que imponer una corrección por irregularidad, que aumenta las fuerzas de diseño y consecutivamente las exigencias de la estructura

- Sobre las excentricidades torsionales, se vio una mayor rotación en la estructura irregular en ambas direcciones su centro de rigidez un total de 47.82 m acumulados por todos los niveles lo que como se menciona en las NTCDS-2020 podría ocasionar fallas antes demandas menores.

- En la resistencia de sus elementos, las fuerzas actuantes que experimentaban sus columnas eran mayores al resto y sus cargas resistentes menores, a pesar de que la dimensión y armado de la columna era igual a la porticada y mayor a la dual.

- En el estado límite de seguridad contra colapso se rebasó el valor permitido en ambas direcciones lo que podría implicar la aparición de un colapso parcial a partir de los niveles 3 y un colapso general a partir del 5.

- En la misma línea, en la limitación de daños ante sismos frecuentes se sugiere que a partir del nivel 6 habría un colapso total de los pisos tras la repetición de un sismo ya que tanto en X como Y sobrepasa la cifra permitida, sin embargo, como se estableció en el estado límite de seguridad, la estructura quizá no soportaría un primer sismo.

Sobre las otras dos estructuras simuladas vale la pena resaltar que aunque la porticada y la dual se diseñaron bajo los mismos criterios, la dual demostró un mejor comportamiento sísmico en casi todas las comparativas,

esto se debe a que los muros son elementos más resistentes que las columnas lo que lo hace más estable ante los movimientos, siendo una mejor opción de estructuración que la porticada, sin contar el hecho de que la existencia de los muros permitió que la propuesta de las secciones de las columnas se redujeran en sus dimensiones, ganando espacio útil.

De manera que, si se toma en cuenta la propuesta del sistema dual desde el anteproyecto, se podría jugar a favor del diseñador y el proyecto, ya que reduciría el retrabajo tras la fase de estructuración y maximizaría la seguridad de los habitantes al tener un mejor desempeño.



**CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES**

CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se analizaron los datos relativos al sismo, sus efectos en las construcciones; los criterios de diseño sísmico, la influencia estructural que presentan las tendencias arquitectónicas, la existencia de técnicas de control pasivo para resistir eventos telúricos, y la elaboración de un caso práctico.

Lo anterior con el propósito de alcanzar el objetivo general, comprobar la hipótesis, responder las preguntas de investigación que fueron establecidas al inicio de este documento. Y aportar recomendaciones que deberá considerar el arquitecto sobre el diseño sísmico para mejorar el proceso de diseño que eventualmente mejorará el comportamiento de las edificaciones, evitando daños en ellas o su colapso.

En primer lugar, es preciso resaltar las aportaciones que nacieron con este estudio, las cuales a continuación se citan:

- La elaboración de un compendio: el cual consistió en la integración, revisión y análisis comparativo de los efectos que propiciaron el colapso de los edificios en la Ciudad de México tras los sismos de 1957, 1985 y 2017 basados en la literatura existente y presentado como tal en el capítulo 1 que ayuda a exponer los fenómenos, situaciones de conflicto y semejanzas en sus daños para entenderlos y buscar una manera de solucionarlos
- Presentación en el capítulo 3 del impacto que tiene la regularidad de las formas en las tendencias arquitectónicas y su influencia en su desempeño sísmico, como una manera de que el arquitecto conozca evalúe e integre al medio sísmico con el proceso de diseño
- La elaboración de pautas que deben tomarse en cuenta al momento de elegir una técnica de control sísmico, así como la ilustración de su ubicación para que el diseñador disponga del conocimiento para integrarlos dentro del proyecto arquitectónico ¹

¹ Ver el capítulo 5 para más información

- El caso práctico como una guía para el arquitecto, con el propósito de marcar directrices y consejos orientados a incorporar los criterios de diseño sísmico, desde la fase proyectual que a su vez muestra las ventajas de su aplicación²

Cabe aclarar que la realización de estos aportes fue posible al alcanzar los objetivos específicos desarrollados en función de entender el fenómeno sísmico, los patrones de daños de las edificaciones colapsadas, las NTCDS, la regularidad e irregularidad de la forma y su impacto en el proceso de diseño, así como en las tendencias arquitectónicas y en el desarrollo constructivo; lo que a su vez, permitió que se comprobara la hipótesis planteada que señalaba que el considerar los aspectos anteriores permitiría elaborar un proyecto integral que conjugara los requisitos de diseño y función con las exigencias del comportamiento sísmico.

Adicionalmente, en el cuerpo de este trabajo se da respuesta a las preguntas que dieron pie a esta investigación:

- Principalmente se cuestionaba si los edificios afectados tras los sismos de 1957, 1985 y 2017 presentaban algún patrón de daño que requiriera ser estudiado, la respuesta es afirmativa ya que bajo un análisis comparativo entre los tres eventos se pudo identificar que los inmuebles medianos (entre 3 a 15 niveles) ubicados en la Zona III de la Ciudad de México mostraron golpeteo entre edificios, irregularidad geométrica y estructuración pobre como las causas más recurrentes.

• En segundo lugar, se preguntaba sobre los criterios que deberían de considerarse al proponer técnicas de control sísmico en el proyecto, la autora realizó estas observaciones en el tema 5.1, sin embargo, de manera general, fue posible señalar que el incluir estas técnicas permitirá reducir las dimensiones de los elementos estructurales lo que se traducirá en ventajas a nivel arquitectónico para claros más largos y mayor espacio

² Adicionalmente, ver el tema 3.4 para información de los criterios en las tendencias arquitectónicas

útil, no obstante, ya sea un aislador o un amortiguador, al ser elementos de grandes dimensiones, ambos repercutirán en la perspectiva del usuario, por lo cual, es importante considerarlos desde la fase inicial para evitar que no se integren al proyecto.

- En tercer lugar se cuestionó el comportamiento que experimentaría un edificio de 9 niveles ubicado en la zona III de la capital si desde la fase del proyecto arquitectónico se aplicaban los criterios de diseño sísmico, la respuesta se indago en este trabajo y puede encontrarse en las conclusiones del análisis comparativo (ver subtema 5.4), pero de manera sintetizada puede determinarse que se encontraron comportamientos positivos en las simulaciones en las que se habían aplicado los criterios de regularidad de la forma a diferencia de los que no, lo que demostró que considerarlos desde la fase inicial promovía la creación de proyectos regulares que mejoraban el desarrollo constructivo. Incluso al conocer esos puntos, fue posible conjugarlos con el diseño ya que no fue necesario modificar el proyecto por la corrección de la ubicación de los elementos estructurales.

- En otra pregunta se cuestiona el sistema estructural que podría ofrecer ventajas tanto en el diseño arquitectónico como en su comportamiento sísmico en la zona III de la CdMx, la respuesta es que el sistema dual resultó ser más útil para la estructuración de edificios medianos ya que en todas las comparativas fue la que demostró un comportamiento más estable, además de que a nivel arquitectónico representa claros más amplios y elementos estructurales menores.

- Sobre la interrogante de la incidencia del comportamiento sísmico en las tendencias arquitectónicas, se desarrolló de manera detallada el subtema 3.4, pero de manera general, se puede señalar que el cúmulo de estilos y tendencias arquitectónicas que engloba la arquitectura contemporánea crea un abanico de posibilidades para el diseñador que, en zonas sísmicas, se debe escoger y analizar con particular detalle ya que

independientemente del estilo arquitectónico, son los mismos criterios de regularidad los que ayudaran a establecer un comportamiento optimo o deficiente. Aun así, se desaconseja el estilo deconstructivista en zonas sísmicas.

- Por último, se cuestionó qué recomendaciones podrían hacerse con la información obtenida en este trabajo de investigación, referente a las Normas Técnicas Complementarias para Proyecto Arquitectónico, la respuesta es que se incluya una sección dedicada a ilustrar la regularidad de la forma con términos que el diseñador pueda comprender sin demasiado conocimiento técnico, ya que puede existir la falsa idea de que el arquitecto no puede influir en nada con el comportamiento sísmico, o tal vez, que son conocimientos muy complejos, cuando, de hecho, estos conceptos ayudan a entender mejor el fenómeno sísmico en las construcciones.

De manera general, se hace hincapié que el trabajo desarrollado se realizó con la intención de contribuir a la difusión de criterios y técnicas que el arquitecto debería de considerar para crear un proyecto integral y sismorresistente, lo que cumple con el objetivo de la investigación.

Para concluir, se resalta la trascendencia de seguir buscando alternativas que ayuden a mejorar el comportamiento de las estructuras medianas desplantadas en la zona III de la Ciudad de México, ya que como se vio en el documento, éstas suelen estar dirigidas a una parte de la población que no puede costear la inversión de una rehabilitación o reubicación sin considerar el alto riesgo que representa para ellos, la sociedad y la ciudad.

De ahí que sea imperativo que los diseñadores se mantengan a la vanguardia no solo en el diseño, sino también en materia estructural, pues esta es la base que moldea la creatividad del arquitecto y a su vez ese conocimiento es una herramienta que le permitirá participar activamente en la elaboración de un proyecto arquitectónico sismorresistente.

RECOMENDACIONES

Con la realización del trabajo desarrollado, es posible sintetizar algunas recomendaciones que permitirán optimizar el proceso de diseño del arquitecto. Estas se basan en 3 fases principales:

Fase 1. Separación entre edificios:

Lo primero que debe de realizarse al conocer las dimensiones del predio es dejar una separación entre colindancias¹ mínimo de 5 cm para evitar que los elementos de una estructura choquen con los del otro. En esta fase es importante verificar si las colindancias cuentan con separación entre linderos, si la respuesta es no, deberá contemplarse el espacio del proyecto nuevo y el de la colindancia, lo que restará espacio al proyecto.

- La separación siempre deberá de estar libre y solo pueden cubrirse con tapajuntas

Fase 2. Regularidad de la forma:

Una vez contemplada la medida real para usar el terreno, y antes de iniciar los planos arquitectónicos, deberán revisarse los límites máximos de regularidad que permite las NTCDS² y que inciden en cuestiones de forma como la simetría en su planta y en alzado como: la relación de su altura-base; largo-ancho, ubicación y dimensiones de huecos, entrantes y salientes; y variación entre los tamaños de entrepisos.

De ser posible, evitar en el diseño el desplazamiento de elementos, un diafragma discontinuo, variación en sus ejes principales y retrocesos excesivos.

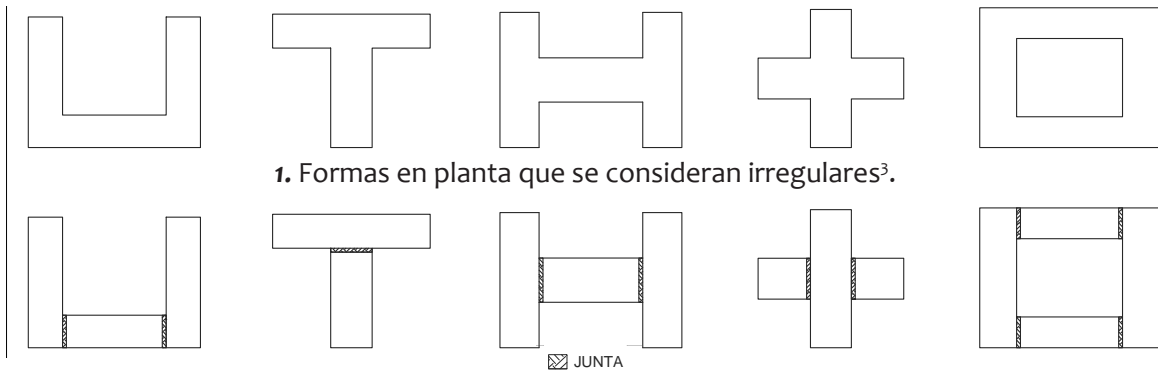
Adicionalmente, considerar en la fase de diseño lo siguiente:

- Todas las columnas de un entrepiso deberán tener la misma altura, aunque si pueden diferir en altura de un entrepiso a otro

1 Verificar los requerimientos de separación en el subtema 3.3

2 Revisar el subtema 3.1 o las paginas 54-64 de las NTC de Diseño por Sismo-2020

- Tener especial atención en las doble alturas ya que de preferencia ninguna columna puede pasar un entrepiso sin estar ligada, para evitar esto, considerar vigas como si no hubiera doble altura
- Cuando se diseñen proyectos que en planta tengan forma de U, T, H, +, O u otros, para que no sean considerados edificios irregulares³ es necesario segmentarlos para trabajarlos como diferentes cuerpos y unirlos con juntas de construcción, quedando de la siguiente forma:



1. Formas en planta que se consideran irregulares³.

2. Formas en planta segmentadas, unidas mediante juntas de construcción

Fuente: Creación propia

Es vital que cada uno de estos cuerpos cumpla los requisitos de separación entre edificios, regularidad y estructuración que se mencionan en las normas.

Fase 3. Pre-Estructuración:

En esta etapa ya está establecida la forma que va a llevar el proyecto, sin embargo, antes de elaborar los planos arquitectónicos, se recomienda pensar en una pre-estructuración, es decir, plantear el sistema estructural que se usará. Para ello, en este apartado la autora sugiere una serie de comentarios que, considerando la normatividad sísmica vigente, cree trascendentales al momento de proponer una estructura:

- Tener en cuenta que el sistema estructural que se use para el proyecto deberá ser el mismo desde el desplante hasta la azotea y de un lado al otro.

3 Para más información consultar Guevara, 2007, p.148 o el tema 3.1 (p.96) de este documento

- Evitar las combinaciones de sistemas como muro de mampostería (o carga) para colindancias con columnas para fachadas ya que empobrecerá el desempeño del inmueble.
- Cuando se esté diseñando una estructura porticada, señalar los muros en el plano como elementos divisorios ya que permitirá en la estructuración desligarlo del sistema, lo que reducirá esfuerzos y pesos
- En el caso de los edificios con planta baja que tengan uso de estacionamiento o comercio, no diseñarlo con columnas en ese nivel y en los pisos superiores muros de mampostería o de carga ya que creará un piso débil que seguramente hará que la planta baja colapse por la diferencia de esfuerzos

Posterior a la fase de pre-estructuración, la siguiente sería realizar los planos arquitectónicos con las consideraciones que el diseñador estableció a través de las recomendaciones aquí señaladas.

Ante esto, cabe destacar que las consideraciones de regularidad de la forma, separación entre edificios y estructuración están dirigidas a que el arquitecto tenga las herramientas necesarias para diseñar un proyecto regular, no para que sea especialista en diseño sísmico. Tampoco se pretende con ello limitar su creatividad, es más bien, una herramienta que lo ayude a identificar las situaciones que causan mayor conflicto en las edificaciones ante eventos telúricos para disminuir las modificaciones tras la fase de estructuración y darle más control sobre los cambios que se requieran.

También, el respetar los criterios de diseño sísmico permitirá el cumplimiento del Artículo 140 del Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México que señala que *“de preferencia se considere una estructura regular ya que de lo contrario deberá diseñarse para condiciones severas”*. De manera que, si se incumple la estructura será considerada irregular (ver tema 3.2). En estos casos, las NTCDS-2020 solicitan métodos más complicados de análisis como el dinámico paso a paso no lineal para evitar la incertidumbre del sistema, así

como la inclusión de penalidades⁴ en el cálculo estructural que no permitirán disminuir el factor de reducción por comportamiento sísmico (Q'), lo que incrementará:

- Las fuerzas de diseño que a su vez aumentarían las demandas y esfuerzos en la construcción
- El desplazamiento real de la estructura que podría dar valores muy altos en la limitación de daños ante sismos frecuentes y rebasar el límite establecido en las normas

De manera general, esas penalidades impactarán en el diseño arquitectónico ya que para soportar las demandas requerirá una disminución en las medidas de los claros y un aumento en el tamaño de las secciones, en su armado, en el peralte de las losas y vigas, entre otros. Lo que disminuirá de manera importante el espacio útil del proyecto además de requerir modificaciones, retrabajos y reajustes en la configuración arquitectónica.

Una manera de mejorar el comportamiento sísmico de esas estructuras irregulares sería con la inclusión de técnicas de control, sin embargo, debido a los alcances del presente estudio no se pudo desarrollar en este documento, por lo cual se recomienda como una posible línea de investigación futura.

Adicionalmente, tras la revisión de la literatura y la evolución de los reglamentos en la Ciudad de México, se observó que existen aún edificios medianos estructurados con normativas anteriores donde muchos de ellos aun presentan importantes deficiencias estructurales, por lo cual sería trascendental realizar un estudio de cómo mejorar esas estructuras con disipadores sísmicos o alguna otra técnica de control.

También, se notó que dentro del país y la capital falta más difusión del uso e inclusión de técnicas de control sísmico en edificios de mediana altura, ya que actualmente su utilización se ha limitado casi por completo en edificios de

4 NTC de Diseño por Sismo-2020 (p.62)

gran altura, lo que deja vulnerable al resto de las edificaciones, por ello, se alienta la difusión de estos sistemas.

De la misma manera, se reconoce la necesidad de seguir estudiando el impacto del fenómeno sísmico en diferentes construcciones, pero desde el enfoque del arquitecto ya que el desempeño de la estructura incidirá directamente en el objeto arquitectónico y en la seguridad sus habitantes.

Por último, es importante considerar que, así como el arquitecto ha ido modificando sus tendencias arquitectónicas para relacionarse con el medio ambiente, ubicación, tecnologías actuales y sustentabilidad, es momento de que igualmente tome en consideración las exigencias del medio sísmico. Siendo uno de los retos actuales el crear un proyecto integral sismorresistente.



**FUENTES CONSULTADAS
E ÍNDICE DE IMÁGENES**

FUENTES CONSULTADAS

LIBROS

- Aguilar, R., Almazán, J. L., Dechent, P. y Suárez, V. (2008). *Aisladores de base elastoméricos y FPS*. Ecuador: Centro de Investigaciones Científicas.
- Bazán, E. y Meli, R. (2006). *Diseño sísmico de edificios*. México: Limusa.
- Becerra, B. (2014). *Condiciones resistentes de los edificios ante sismos*. México: Lomo Sapiens.
- Berry, P. y Reid, D. (2001). *Mecánica de suelos*. Colombia: Mc Graw Hill.
- Bolt, B. A. (2003). *Terremotos*. España: Editorial, S. A.
- Bussagli, M. (2011). *Comprender la arquitectura. Madrid*. España: Susaeta ediciones, S. A. – Obra colectiva Tikal Ediciones
- Carazas, W. (2002). *Adobe: Guía de construcción parasísmica*. Francia: Ediciones CRATerre.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2014). *Sismos*. México: CENAPRED.
- CNEM - Centro Nacional de Estudios Municipales. (1987). *Enciclopedia de los municipios de México*. México: Secretaría de Gobernación.
- Creixell, J. (1993). *Construcciones antisísmicas y resistentes al viento: criterio para su cálculo y diseño*. México: Limusa
- Cruz, V. (2015). *Los sismos. Una amenaza cotidiana*. México: La Caja de Cerillos.
- Fitzgerald, r. w. (1996). *Mecánica de materiales*. México: Alfaomega Grupo Editor.
- Genatios, C. y Lafuente, M. (2016). *Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras*. Caracas, Venezuela: CAF-Banco de Desarrollo de América Latina.
- Gordon, J. E. (2004). *Estructuras o por qué las cosas no se caen*. España: Calamar Ediciones.

- Guevara, T. (2007), *Arquitectura moderna en zonas sísmicas*. España: Editorial Gustavo Gili, SL.
- Hibbeler, R. C. (2017). *Mecánica de materiales*. (9° ed.). México: Pearson.
- Hiriart, F. (1958). Parte III. Criterios generales para el diseño sísmico de estructuras. En F. Hiriart (coord.), *Los efectos del terremoto del 28 de julio y la consiguiente revisión de los criterios para el diseño sísmico de estructuras*. (pp. 26-30). México: Instituto de Ingeniería de la UNAM.
- Kuroiwa, J. (2005). *El terremoto de Sumatra y el Tsunami del Océano Indico. Sus enseñanzas para la prevención de desastres*. Comité de Países Andinos: CAPRADE.
- Lin, T, Y. y Stotesbury, S, D. (1991). *Conceptos y sistemas estructurales para Arquitectos e Ingenieros*. México: Limusa
- Marsal, R. (1958). Parte II. Efectos del macrosismo registrado el 28 de julio en las construcciones de la ciudad. En F. Hiriart (coord.), *Los efectos del terremoto del 28 de julio y la consiguiente revisión de los criterios para el diseño sísmico de estructuras*. (pp. 12-25). México: Instituto de Ingeniería de la UNAM.
- Meli, R. (2011). *Diseño estructural*. México: Editorial Limusa, S.A de C.V.
- Meli, R. y Miranda, E. (1986). *Evaluación de los efectos de los sismos de septiembre de 1985 en los edificios de la ciudad de México. Parte I. Evaluación de daños*. México: Instituto de Ingeniería UNAM.
- Mott, R. L. (1996). *Resistencia de materiales aplicada*. (3° ed.) México: Prentice-Hall Hispanoamericana, S. A.
- Nava, A. (2002). *Terremotos*. (2° ed.) España: Fondo de cultura económica.
- Organización Panamericana de la Salud. (2010). *El terremoto y tsunami del 27 de febrero en Chile. Crónica y lecciones aprendidas en el sector salud*. Chile: Organización Panamericana de la Salud.

- Ortega, A. (1999). *Evolución tecnológica del concreto y la arquitectura contemporánea*. México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C.
- Pan American Health Organization. (1985). *Disaster Chronicles #3, Earthquake in Mexico*. Estados Unidos: Emergency Preparedness and Disaster Relief Coordination Program.
- Pavón, V. (1998). *Los temblores de tierra. El poder destructor de los sismos y los volcanes*. México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- Pérez, H. (2002). *Física General*. (2° ed.). México: Publicaciones Cultural.
- Ramón, F. (2017). *Resonancia*. España: Equaphon University.
- Reinoso, E. (2007). *Riesgo sísmico de la Ciudad de México*. México: Academia de Ingeniería México.
- Romo, M. P., (1992). Interacción dinámica Suelo-Estructura en suelos blandos. En *Memorias del simposio realizado el 18 de septiembre de 1991*. (pp. 129-130). México: CENAPRED
- Salcido, I. (2015). *El terremoto de 1985. Treinta años en nuestra memoria*. México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.
- Salcido, I. (2018). *El terremoto de 2017. Diecinueve de septiembre negro*. México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.
- Santoyo, E., Ovando, E. y Segovia, J. A. (1999). *Evolución de las cimentaciones de edificaciones en la Ciudad de México*. México: TGC Geotecnia, S.A de C.V.
- Trueba, L. (1986). *Compendio de Testimonios del 19 de septiembre, reportajes gráficos de: Imagen Latina, CISM, El Sol de México, Uno más Uno, El Universal, Novedades*. México: Centro de Investigación y Servicios Museológicos.
- Vidal, F. (1994). *Los terremotos y sus causas*. Granada, España: Instituto Andaluz de Geofísica y Prevención de Desastres Sísmicos.

ARTÍCULOS

- Beck, J. L. y Hall, J. F. (1986). Engineering Features of the Recent Mexican Earthquakes. *Engineering & Science*, 49(3), 2-9
- Cruz, V. M., Krishna, S. y Ordaz, M. (2017). “¿Qué ocurrió el 19 de septiembre de 2017 en México?”. *Revista Digital Universitaria (RDU)*, 18(7). <http://doi.org/10.22201/codeic.16076079e.2017.v18n7.a10>
- Domínguez, M. (2014). Periodos de vibración de las edificaciones. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 8(2), 1-13.
- Figueroa, J. (1957). El macrosismo del 28 de julio de 1957. *Anales del Instituto de Geofísica de la UNAM*, 3, 55-88
- Galvis, F., Miranda, E., Heresi, P., Dávalos, H. y Silos, J.R. (2017). Preliminary Statistics of Collapsed Buildings in Mexico City in the September 19, 2017 Puebla-Morelos Earthquake. *Earthquake Engineering Research Institute*. https://www.learningfromearthquakes.org/2017-09-19-puebla-mexico/images/2017_09_19_Puebla_Mexico/pdfs/Preliminary_Report_Mexico2017_v7.pdf
- Gómez, D., Marulanda, J. y Thomson, P. (2008). Sistemas de control para la protección de estructuras civiles sometidas a cargas dinámicas. *Revista de Ingeniería Dyna*, 155, 77-89.
- Hall, J. F y Beck, J. L. (1986). Structural Damage in Mexico City. *Geophysical Research Letters*, 13(6), 589-592.
- Husker, A. Ferrari, L., Arango, C., Corbo, F. y Arzate, J. A. (2018). A geologic recipe for transient slip within the seismogenic zone: Insight from the Guerrero seismic gap, Mexico. *Geology*; 46(1): 35–38.

- Instituto Mexicano del Cemento y Concreto [IMCYC]. (2011). Sistemas de disipación pasiva de energía sísmica. *Revista Construcción y Tecnología*, (272), 20-24.
- Mendoza, G. B. (2009). *El nido de Quetzalcóatl. Construcción y Tecnología*, (254), 15-19.
- Narváez, V. y Reinoso, E. (2007). Revisión a 50 años de los daños ocasionados en la Ciudad de México por el sismo del 28 de julio de 1957 con ayuda de investigaciones recientes y sistemas de información geográfica. *Revista de Ingeniería Sísmica*, (76), 61-87.
- Oviedo, J. A. y Duque, M. P. (2006). Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones. *Revista EIA*, (6), 105-120.
- Pradilla, L. y Chio, G. (2012). Uso de aisladores de base en puentes de concreto simplemente apoyados. *Revista Tecnura*, 16(34), 103-124
- Torres, C. R. (2017). Efectos del sitio del sismo del 19 de septiembre de 2017 en la Ciudad de México. *Geotecnia*, (246), 18-21.
- Ventura, F. (2017). A 60 años del sismo del Ángel del 28 de julio de 1957. *ERNtérate*. https://www.ern.com.mx/boletines/ERNterate_Notas_Sismo-28julio1957.pdf
- Villanueva, C. (2013). La arquitectura minimalista: El ejemplo de Mies van der Rohe. *Galenus*, 42(6), 84

CONGRESOS

- Arce, C. (2013). *Aplicación de los Disipadores Sísmicos en las estructuras prefabricadas, una solución hacia la sustentabilidad en las sociedades modernas*. [Ponencia]. 4º Congreso Internacional de Estructuras Prefabricadas de Concreto, Guanajuato, México. https://anippac.org.mx/demos/010_Aisladores_de_Base_JCD.pdf

- Barbosa, M. (2021, 18-20 de febrero). *Criterios aplicados en la elaboración del proyecto arquitectónico para potencializar el diseño sismorresistente*. [Memorias]. XXII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Aguascalientes, México. <https://smie.com.mx/sistemas/storage/cnie-2020/articulos/10-324-BAPM.pdf>
- Llera, J. C; Vásquez, J., Poulos, A. y Favier, P. (2015, 18-20 de marzo). *Trends in research and design of structures with seismic protection systems*. [Memorias]. XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica ACHISINA 2015, Santiago de Chile. https://www.researchgate.net/publication/323832615_Trends_in_research_and_design_of_structures_with_seismic_protection_systems
- Miranda, E. (2005). *Aspectos fundamentales de la respuesta sísmica de edificios con entrepisos blandos*. [Memorias]. 4º Simposio Nacional de Ingeniería Estructural en la vivienda, Veracruz, México.
- Okazaki, T. (2012, 17-18 de enero). *Lessons from the Great Kanto Earthquake, 1923*. [Ponencia]. International Conference on Science and Technology for Sustainability, Tokio, Japón. <http://www.scj.go.jp/ja/int/kaisai/jizoku2012/ja/pdf/Okazaki.pdf>
- Reinoso, E. (2018, 16 de octubre). *Los sismos de septiembre 2017: intensidad, vulnerabilidad y pérdidas*. [Ponencia]. XV Convención Anual de ERN, Ciudad de México, México. <https://www.ern.com.mx/web/sites/default/files/convencion2018/pdf/01.pdf>
- Tena, A. (2016, 17 de noviembre). *Método simplificado para el diseño de estructuras con base en muros de carga aisladas sísmicamente*. [Memorias]. XX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Yucatán, México.

INFORMES OFICIALES DE SISMOS

- CSNUC - Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile. (2017, 26 de febrero). *Efemérides Sísmicas: Terremoto Del Maule 2010*. Universidad de Chile. <https://www.csn.uchile.cl/efemerides-sismicas-terremoto-del-maule-2010/>
- SSN - Servicio Sismológico Nacional. (2010). *Sismo del 27 de Febrero de 2010, Chile (M = 8.8)*. Universidad Nacional Autónoma de México. http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2010/SSNMX_rep_esp_20100227_chile_M88.pdf
- SSN - Servicio Sismológico Nacional. (2014). *Reporte de Sismo. Sismo del día 8 de mayo de 2014, Guerrero (M 6.4)*. Universidad Nacional Autónoma de México. http://www.ssn.unam.mx/jsp/reportesEspeciales/8mayo2014_Guerrero.pdf
- SSN - Servicio Sismológico Nacional. (2017). *Reporte Especial. Sismo del día 19 de septiembre de 2017, Puebla-Morelos (M 7.1)*. Universidad Nacional Autónoma de México. http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX_rep_esp_20170919_Puebla-Morelos_M71.pdf
- SSN - Servicio Sismológico Nacional. (2019). *Reporte de Sismo. Sismo del 1 de febrero de 2019, Chiapas (M 6.4)*. Universidad Nacional Autónoma de México. http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2019/SSNMX_rep_esp_20190201_Chiapas_M65.pdf
- USGS - United States Geological Survey. (2017). *M 7.1 – 1 km S of Matzaco, Mexico*. USGS. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000ar20/executive#map?ShakeMap%20Stations=true&shakemap-Source=us&shakemapCode=us2000ar20>

REGLAMENTOS DE CONSTRUCCIÓN DE LA CIUDAD DE MÉXICO¹ (Por Orden de Publicación)

Órgano del Gobierno del Distrito Federal. (1921). *Reglamento de construcciones*. Diario Oficial.

Órgano de Difusión del Gobierno del Distrito Federal. (1933, 2 de Agosto). *Reglamento de construcciones para el Distrito Federal*. Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal.

Órgano del Gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos. (1942, 23 de julio). *Reglamento de las construcciones y de los servicios urbanos del Distrito Federal*. Diario Oficial.

Acero BP-40. (1957). *Modificaciones al reglamento de las construcciones y de los servicios urbanos en el Distrito Federal para prevenir los efectos de los sismos*. Barras Preformadas, S. A.

Órgano de Difusión del Gobierno del Distrito Federal. (1966). *Nuevo Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*. Diario Oficial.

Órgano de Difusión del Gobierno del Distrito Federal. (1976). *Reglamento de construcciones para el Distrito Federal*. Editorial Libros Económicos.

Órgano del Gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos. (1987, 3 de julio). *Reglamento de construcciones para el Distrito Federal*. Diario Oficial de la Federación.

Órgano del Gobierno del Distrito Federal. (2004, 29 de enero). *Reglamento de construcción de la Ciudad de México*. Gaceta Oficial del Distrito Federal.

Órgano de Difusión del Gobierno de la Ciudad de México. (2016, 17 de Junio). *Reglamento de Construcciones del Distrito Federal*. Gaceta Oficial de la Ciudad de México.

¹ También conocida como Distrito Federal.

Órgano de Difusión del Gobierno de la Ciudad de México. (2017, 1 de Diciembre).

Ley para la Reconstrucción, Recuperación y Transformación de la Ciudad de México en una cada vez más resiliente. Gaceta Oficial de la Ciudad de México.

Órgano de Difusión del Gobierno de la Ciudad de México. (2017, 15 de Diciembre).

Reglamento de construcciones para el Distrito Federal. Gaceta Oficial de la Ciudad de México.

Órgano de Difusión del Gobierno de la Ciudad de México. (2021, 20 de Julio).

Reglamento de construcciones para el Distrito Federal. Gaceta Oficial de la Ciudad de México.

NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS DEL REGLAMENTO DE CONSTRUCCIÓN PARA LA CIUDAD DE MÉXICO

(Por Orden de Publicación)¹

Órgano de Difusión del Gobierno del Distrito Federal. (1985, 18 de Octubre).

Normas de emergencia en materia de construcción para el Distrito Federal.
Diario Oficial.

Órgano de Difusión del Gobierno del Distrito Federal. (1987, 19 de noviembre).

Norma Técnica Complementaria para Diseño por Sismo. Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal.

Órgano del Gobierno del Distrito Federal. (2004, 6 de Octubre). *Normas Técnicas*

Complementarias para Diseño por Sismo. Gaceta Oficial del Distrito Federal.

Órgano del Gobierno del Distrito Federal. (2004, 6 de Octubre). *Normas Técnicas*

Complementarias para el Proyecto Arquitectónico. Gaceta Oficial del Distrito Federal.

¹ También conocida como Distrito Federal.

Órgano de Difusión del Gobierno de la Ciudad de México. (2017). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo*. SMIE.

Órgano de Difusión del Gobierno de la Ciudad de México. (2017). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto*. SMIE.

Órgano de Difusión del Gobierno de la Ciudad de México. (2017). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones*. SMIE.

Órgano de Difusión del Gobierno de la Ciudad de México. (2017, 11 de Julio). *Normas Técnicas Complementarias para el Proyecto Arquitectónico*. Gaceta Oficial de la Ciudad de México.

Órgano de Difusión del Gobierno de la Ciudad de México. (2017, 15 de diciembre). *Norma Técnica Complementaria sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones*. Gaceta Oficial de la Ciudad de México.

Órgano de Difusión del Gobierno de la Ciudad de México. (2017, 15 de Diciembre). *Normas Técnicas Complementarias para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NTC-RSEE)*. Gaceta Oficial de la Ciudad de México.

Órgano de Difusión del Gobierno de la Ciudad de México. (2017, 4 de Diciembre). *Normas para la Rehabilitación Sísmica de edificios de concreto dañados por el Sismo del 19 de septiembre del 2017*. Gaceta Oficial de la Ciudad de México.

Órgano de Difusión del Gobierno de la Ciudad de México. (2020, 9 de Junio). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo con comentarios*¹. Gaceta Oficial de la Ciudad de México.

1 Referidas en este documento como NTCDS-2020

OTRAS NORMAS

- CFE - Comisión Federal de Electricidad. (2008). *Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Sismo*. Instituto de Investigaciones Eléctricas. https://www.researchgate.net/profile/Ulises-Hernandez-11/publication/305001619_CAPITULO_DE_DISENO_POR_SISMO_2008_MANUAL_DE_DISENO_DE_OBRAS_CIVILES_DE_CFE/links/577efb9f08ae01f736e17a00/CAPITULO-DE-DISENO-POR-SISMO-2008-MANUAL-DE-DISENO-DE-OBRAS-CIVILES-DE-CFE.pdf
- ISO. (2017, Marzo). *ISO 3010:2017 Bases for design of structures - Seismic action on structures*. International Organization for Standardization.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2017). *Normativa Antisísmica en Chile, reglamentación y Normas*. Senado de la República de Chile.

LIBROS ELECTRÓNICOS

- Esquivel, G., Islas, I., y Serdán, A. (Coord.). (2018). *Diagnósticos y propuestas para la reconstrucción*. Instituto Belisario Domínguez, Senado de la República. <http://bibliodigitalibd.senado.gob.mx/bitstream/handle/123456789/4064/Sismos%202017%20Diagn%C3%B3sticos%20y%20propuestas%20para%20la%20reconstrucci%C3%B3n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ettinger, R. C. (2007). *Arquitectura Organica*. En *Historia de la Teoría de la Arquitectura*. (pp. 106-110). <https://contempoarq.files.wordpress.com/2009/09/arquitectura-organica0001.pdf>
- Hasegawa, T. (2013). *Introduction to the Building Standard Law, Building Regulation in Japan*. Building Center of Japan. https://www.bcj.or.jp/upload/international/baseline/BSLIntroduction201307_e.pdf

INSIVUMEH. (2016). Sismología en Guatemala. Departamento de Investigación y Servicios Geofísicos. <https://www.insivumeh.gob.gt/folletos/folletosismo.pdf>

Protección Civil de Oaxaca. (2016). *Peligros de origen Geológico y localización de zonas vulnerables*. Gobierno del Estado de Oaxaca. https://www.oaxaca.gob.mx/wp-content/uploads/sites/26/2016/05/tomo1_cpeligros-de-origen-geol%C3%B3gico-y-localizacion-de-zonas-vulnerables.pdf

TESIS

Buendía, L. M. (2012). *Estimación de daños a contenidos de museos por sismo: caso Museo Soumaya y Museo Nacional de Antropología de la Ciudad de México*. [Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México].

García, G. (2017). *Análisis comparativo del comportamiento estructural de un edificio de concreto reforzado con y sin aislamientos sísmico en la base*. [Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México].

Lazo R. (2008). *Estudio de los daños de los terremotos del 21 y 22 de mayo de 1960*. [Tesis de Licenciatura. Universidad de Chile].

Máximo, A. (2007). *Sistema de aisladores sísmicos de base para edificios*. [Tesis de Licenciatura. Instituto Politécnico Nacional de México].

Ovando, H. A. (2011). *Inyección de suelo por medio de la técnica de Jet Grouting*. [Tesis de Licenciatura. Universidad de San Carlos de Guatemala].

Palacios, J, L. (2009). *Análisis experimental de disipadores viscoelásticos y su relación con la rigidez y el factor de amortiguamiento*. [Tesis de Maestría. Universidad Técnica de Manabí].

Wagner, D. (2017). *Aislamiento sísmico en edificios prefabricados en la zona de transición de la ciudad de México*. [Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México].

PÁGINAS DE INTERNET OFICIALES

- CEMEX. (2015, 2 de julio). *Torre Reforma: un gigante de concreto en la Ciudad de México*. CEMEX. <https://www.cemex.com/es/-/torre-reforma-a-concrete-giant-in-mexico-city>
- CICA - Centro Informático Científico de Andalucía. (S.f). *Leyes de Newton*. Sociedad Andaluza de Educación Matemática Thales. Consultado en enero del 2019. <https://thales.cica.es/rd/Recursos/rd98/Fisica/02/leyes.html>
- CIRES. (s.f.). *Sistema de Alerta Sísmica Mexicano [SASMEX]*. CIRES. Consultado en noviembre del 2018. http://www.cires.org.mx/sasmex_historico_es.php
- Japan Property Central. (2011). *Earthquake Building Codes in Japan*. Japan Property Central. Consultado diciembre de 2019. <http://japanpropertycentral.com/real-estate-faq/earthquake-building-codes-in-japan/>
- Real Estate Japan. (2017, 22 de Noviembre). *Earthquake building codes and technology in Japan*. Real Estate Japan. <https://resources.realestate.co.jp/buy/earthquake-building-codes-and-technology-in-japan/>
- Rogers Stirk Harbour + Partners. (S.f). *BBVA Bancomer Tower*. Rogers Stirk Harbour + Partners. Consultado diciembre de 2019 <https://www.rsh-p.com/projects/office/bbva-bancomer-tower/>

ÍNDICE DE IMÁGENES

CAPÍTULO 1

Figura 1.1 Adaptada de Nava, A. (2002). *Terremotos*. (2º ed.) (p. 71). España: Fondo de cultura económica

Figura 1.2 Vidal, C. (2016). *Corrientes de Convección, diapositiva 29* [Gráfico]. SlidePlayer <https://slideplayer.es/slide/11119959/>

Figura 1.3, 1.4, 1.5 Descubriendo galápagos (s.f). *Límite de placa destructivo o convergente, Placa de colisión, Límite divergente o constructivo, Límite transformante* [Gráficos]. Descubriendogalapagos. <http://descubriendogalapagos.ec/descubre/procesos-geograficos/ubicacion-formacion/placas-tectonicas/>

Figura 1.6, 1.7, 1.8, 1.9 Scienze e scienze. (2015). *Le faglie* [Gráfico]. Blogspot. <http://scienzeescienze.blogspot.com/2015/09/le-deformazioni-della-sueprficie.html>

Figura 1.10 INPRES - Instituto Nacional de Prevención Sísmica. (s.f). *Figura 1: Esquema del proceso del rebote elástico* [Gráfico]. INPRES <http://contenidos.inpres.gob.ar/docs/Terremotos.pdf>

Figura 1.11, 1.12 Bolt, B. A. (2003). *Terremotos* (p.27). España: Editorial, S. A.

Figura 1.13 Guevara, T. (2007), *Arquitectura moderna en zonas sísmicas* (p.83). España: Editorial Gustavo Gili, SL.

Figura 1.14 Construyebien. (2018). *Tipos de sismos* [Gráfico]. Construyebien. <https://www.construyebien.com/blog/tipos-terremotos-sismos/>

Figura 1.15 Nava, A. (2002). *Terremotos*. (2º ed.) España: Fondo de cultura económica.

Figura 1.16 Adaptada de Cruz, V. (2015). *Los sismos* (p.21). Una amenaza cotidiana. México: La Caja de Cerillos.

Figura 1.17 CNEM - Centro Nacional de Estudios Municipales. (1987). *Enciclopedia de los municipios de México*. México: Secretaría de Gobernación. <http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM09DF/>

Figura 1.18 Ventura, F. (2017). *A 60 años del sismo del Ángel del 28 de julio de 1957* (p.2). ERNtérate. https://www.ern.com.mx/boletines/ERNterate_Notas_Sismo28julio1957.pdf

Figura 1.19 Revelo, G. (2016). *30 datos sobre el sismo del 19 de septiembre de 1985* [Fotografías]. Sopitas <https://www.sopitas.com/noticias/30-datos-sobre-el-sismo-del-19-de-septiembre-de-1985/>

MAPAS

- Mapa 1.1** 1.1 IES Ortega y Gasset. (2018). *1 Bach (CC) – Bordes entre placas* [Gráfico]. Blogspot. <http://darwiniano201819.blogspot.com/2018/10/1-bach-cc-bordes-entre-placas.html>
- Mapa 1.2** Adaptado de Nava, A. (2002). *Terremotos* (2º ed.) (p.82 y p.86). España: Fondo de cultura económica
- Mapa 1.3** CENAPRED (2019). *Sismos en México... Brecha de Guerrero*. [Mapa]. CENAPRED. <https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/280-INFOGRAFA-SISMOSENMXICO-BRECHADEGUERRERO.PDF>
- Mapa 1.4** CIRES. (s.f.). *SISTEMA DE ALERTA SÍSMICA MEXICANO* [Mapa]. CIRES http://www.cires.org.mx/sasmex_es.php
- Mapa 1.5** Órgano de Difusión del Gobierno de la Ciudad de México. (2017). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones* (p. 5). SMIE.
- Mapa 1.6** USGS - United States Geological Survey. (2017). *M 7.1 - 1km E of Ayutla, México* [Mapa]. USGS <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000ar20/executive#-map?ShakeMap%20Stations=true&shakemapSource=us&shakemapCode=us2000ar20>
http://www.ampere.mx/uploads/1/3/2/8/13284960/2017_structural_health_monitoring_cmz_ampere.pdf

TABLAS

- Tabla 1.1** Educarchile. (S.f). *Guía 17: escala Richter y Mercalli*. [Gráfico]. Educarchile. http://ww2.educarchile.cl/UserFiles/Planificaciones/545728/65906_GUIA%2017.%20escalas.pdf

GRÁFICOS

- Gráfico 1.1** Beck, J. L. y Hall, J. F. (1986). *Engineering Features of the Recent Mexican Earthquakes* (p.4). *Engineering & Science*, 49(3), 2-9
- Gráfico 1.2** Cruz, V. M., Krishna, S. y Ordaz, M. (2017). “¿Qué ocurrió el 19 de septiembre de 2017 en México?” (P.6). *Revista Digital Universitaria (RDU)*, 18(7). <http://doi.org/10.22201/codeic.16076079e.2017.v18n7.a10>

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 Bazán, E. y Meli, R. (2006). *Diseño sísmico de edificios* (p.29). México: Limusa.

Figura 2.2 Pérez, H. (2002). *Física General*. (2º ed.) (p. 145). México: Publicaciones Cultural.

Figura 2.3, 2.4 Creixell, J. (1993). *Construcciones antisísmicas y resistentes al viento: criterio para su cálculo y diseño* (p25-27, p.29). México: Limusa.

Figura 2.5, 2.6 Medín, J. (2014). *Física de las vibraciones, parte 1*. (p. 7 y p.44). [Gráficos]. Slideshare. <https://es.slideshare.net/reynaldoyeri/pres-vibraciones>

Figura 2.7 Becerra, B. (2014). *Condiciones resistentes de los edificios ante sismos* (p. 25). México: Lomo Sapiens.

Figura 2.8, 2.9, 2.10 Guevara, T. (2007), *Arquitectura moderna en zonas sísmicas* (p.107). España: Editorial Gustavo Gili, SL. P.

Figura 2.11 Órgano de Difusión del Gobierno de la Ciudad de México. (2020, 9 de Junio). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo con comentarios* (p. 23). Gaceta Oficial de la Ciudad de México.

Figura 2.12 A Órgano de Difusión del Gobierno del Distrito Federal. (1966). *Nuevo Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*. Diario Oficial.

Figura 2.12 B Órgano de Difusión del Gobierno del Distrito Federal. (1987, 19 de noviembre). *Norma Técnica Complementaria para Diseño por Sismo*. Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal.

Figura 2.12 C Órgano de Difusión del Gobierno de la Ciudad de México. (2017). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo*. SMIE.

CAPÍTULO 3

Figura 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.8, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 Órgano de Difusión del Gobierno de la Ciudad de México. (2020, 9 de Junio). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo con comentarios* (pp. 54 – 64). Gaceta Oficial de la Ciudad de México.

Figura 3.14, 3.15 Guevara, T. (2007), *Arquitectura moderna en zonas sísmicas* (p. 148, p.111). España: Editorial Gustavo Gili, SL.

Figura 3.16 HASXX. (2021) *Auguste Perret _ Casa de la rue Franklin n° 25 bis (1902-1903)* [Fotografía]. Blogspot. <https://hasxx.blogspot.com/2012/03/casa-de-la-rue-franklin-n-25-bis.html>

Figura 3.17 Pérez, A. (2014). *Clásicos de arquitectura: Seagram Building/ Mies van der Rohe* [Fotografía]. Archdaily.

https://www.archdaily.mx/mx/02-364394/clasicos-de-arquitectura-seagram-building-mies-van-der-rohe/53834618c07a802121000421-seagram-building-mies-van-der-rohe-photo?next_project=no

Figura 3.18 Duque, K. (2014). *Clásicos de arquitectura: Edificio de la Bauhaus en Dessau / Walter* [Fotografía]. Archdaily. https://www.archdaily.mx/mx/02-362897/clasicos-de-arquitectura-edificio-de-la-bauhaus-en-dessau-walter-gropius/537bed5ac07a802121000107?next_project=no

Figura 3.19 Guevara, T. (2007), *Arquitectura moderna en zonas sísmicas* (p.29). España: Editorial Gustavo Gili, SL.

Figura 3.20, 3.21, 3.22 Creación de la autora

Figura 3.23 Gastv. (s.f). *Seattle Public Library* [Fotografía]. Gastv. <https://gastv.mx/wp-content/uploads/2014/03/seattle-public-library.jpg>

Figura 3.24 Wikiarquitectura. (s.f). *Casa danzante* [Fotografía]. Wikiarquitectura. <https://es.wikiarquitectura.com/building/casa-danzante/>

Figura 3.25 Arquigrafico. (2018). *La arquitectura High Tech, todo a la vista* [Fotografía]. Arquigrafico. <https://arquigrafico.com/la-arquitectura-high-tech-todo-a-la-vista/>

Figura 3.26 Archdaily. (s.f). *Biblioteca José Vasconcelos / Taller de Arquitectura X / Alberto Kalach* [Fotografía]. Archdaily. <https://www.archdaily.mx/mx/02-67254/biblioteca-jose-vasconcelos-alberto-kalach>

Figura 3.27 Arquitecturasixxxxxxi. (s.f). *Organicismo* [Fotografía]. Google Sites. <https://sites.google.com/site/arquitecturasixxxxxxi/arquitectura-s-xix/organicismo>

Figura 3.28 Archdaily. (s.f). *Nido de Quetzalcóatl/Javier Senosian* [Fotografía]. Archdaily. https://www.archdaily.mx/mx/907102/nido-de-quetzalcoatl-javier-senosian?ad_medium=office_landing&ad_name=article

Figura 3.29 Archdaily. (s.f). *Edificio Darcons 5 / Arquitectura en proceso* [Fotografía]. Archdaily. https://www.archdaily.mx/mx/02-33510/edificio-darcons-5-arquitectura-en-proceso?ad_medium=gallery

Figura 3.30 Ten Arquitectos. (s.f). *Popocatepetl 526* [Fotografía]. Tenarquitectos. <https://www.ten-arquitectos.com/popocatepetl>

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 Oviedo, J. A. y Duque, M. P. (2006). *Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones* (p. 110). Revista EIA, (6), 105-120. P.110

Figura 4.2 y 4.5 Genatios, C. y Lafuente, M. (2016). *Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras* (p.56). Caracas: Venezuela: CAF-Banco de Desarrollo de América Latina.

Figura 4.3 Sísmica. (s.f.). *Aisladores Elastoméricos (SI) [Imagen]*. SISMICA. <http://www.sismica.cl/?portfolio=aisladores-elastomericos-si>

Figura 4.4 Sísmica. (s.f.). *Aisladores Elastoméricos con Núcleo de Plomo (LRB) [Imagen]*. SISMICA <http://www.sismica.cl/?portfolio=aisladores-elastomericos-con-nucleo-de-plomo-lrb>

Figura 4.6, 4.7, 4.8 Oviedo, J. A. y Duque, M. P. (2006). *Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones* (p. 113). Revista EIA, (6), 105-120. P.113

Figura 4.8, Izquierda Nüyen_tek. (s.f.). *Amortiguador o Disipador Viscoso (VD) [Fotografía]*. Nuyuntek. <http://www.nuyuntek.cl>

Figura 4.9 Centro Sismológico Nacional – Universidad de Chile. (2019). *Chile, país de terremotos [Fotografía]*. Facebook. <https://www.facebook.com/CSN.UChile/photos/chile-pa%C3%ADs-de-terremotos-aqu%C3%AD-una-imagen-con-algunos-de-los-eventos-m%C3%A1s-importantes/1047283038790279/>

Figura 4.10 Jorge, J. (2011). *Un científico acusa en <<Nature>> a Japón de utilizar un método erróneo para prevenir terremotos [Mapa]*. Abc. https://www.abc.es/ciencia/abci-cientifico-acusa-japon-utilizar-201104130000_noticia.html

Figura 4.11 Japan Property Central. (2011). *Earthquake Building Codes in Japan [Gráfico]*. Japan Property Central. <http://japanpropertycentral.com/real-estate-faq/earthquake-building-codes-in-japan/>

Figura 4.12, 4.13 Máximo, A. (2007). *Sistema de aisladores sísmicos de base para edificios* (p.12, p. 92). [Tesis de Licenciatura. Instituto Politécnico Nacional de México].

Figura 4.14 Arce, C. (2013). *Aplicación de los Disipadores Sísmicos en las estructuras prefabricadas, una solución hacia la sustentabilidad en las sociedades modernas*. [Ponencia]. 4º Congreso Internacional de Estructuras Prefabricadas de Concreto, Guanajuato, México.

Figura 4.15 Torre Reforma. (s.f.). *Torre Reforma [Fotografía]*. <https://www.torrereforma.com/>

Gráfico 4.1 García, G. (2017). *Análisis comparativo del comportamiento estructural de un edificio de concreto reforzado con y sin aislamientos sísmico en la base* (p.8). [Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México].

CAPÍTULO 5

Gráfico 5.6 Creación de la autora con información de Efe Prima CE. (2017). *Esquema instalación disipadores* [Gráfico]. Efe Prima CE. <https://www.efepripace.co/di-disipadores-histereticos-metalicos-sismos-colombia/instalacion-disipadores-conexion-directa-riostras-pandeo/>

Gráfico 5.12 Lin, T, Y. y Stotesbury, S, D. (1991). *Conceptos y sistemas estructurales para Arquitectos e Ingenieros* (p. 227). México: Limusa

PORTADAS

Capítulo 1. INFOBAE. (2018). *Escena tras el terremoto de San Francisco en 1906* [Fotografía]. INFOBAE. <https://www.infobae.com/america/eeuu/2018/09/25/detectaron-pequenos-sismos-imprevistos-a-seis-millas-de-profundidad-en-la-falla-de-san-andres-en-california/>

Capítulo 2. Sección Amarilla (2017). *10 apuntes sobre la vivienda en la CDMX y los estados después de los sismos* [Fotografía]. Blog Sección Amarilla. <https://blog.seccionamarilla.com.mx/la-vivienda-en-la-cdmx-y-estados-despues-de-sismos/>

Capítulo 3 Rosas, C. (2021). *“Pasión y Fuerza” Mujeres creando Arquitectura. Parte 1* [Fotografía]. Inperfecto. <https://inperfecto.com.mx/2021/03/07/pasion-y-fuerza-mujeres-creando-arquitectura-parte-1/>

Capítulo 4 Steel Building México. (s.f) *Steel Building México* [Fotografía]. WIX. <https://steelbuildigmx.wixsite.com/home>

Capítulo 5. Weinfeld, I. (s.f). *Jardim Norte* [Fotografía]. Jardim. <https://jardim.nyc/residences/>

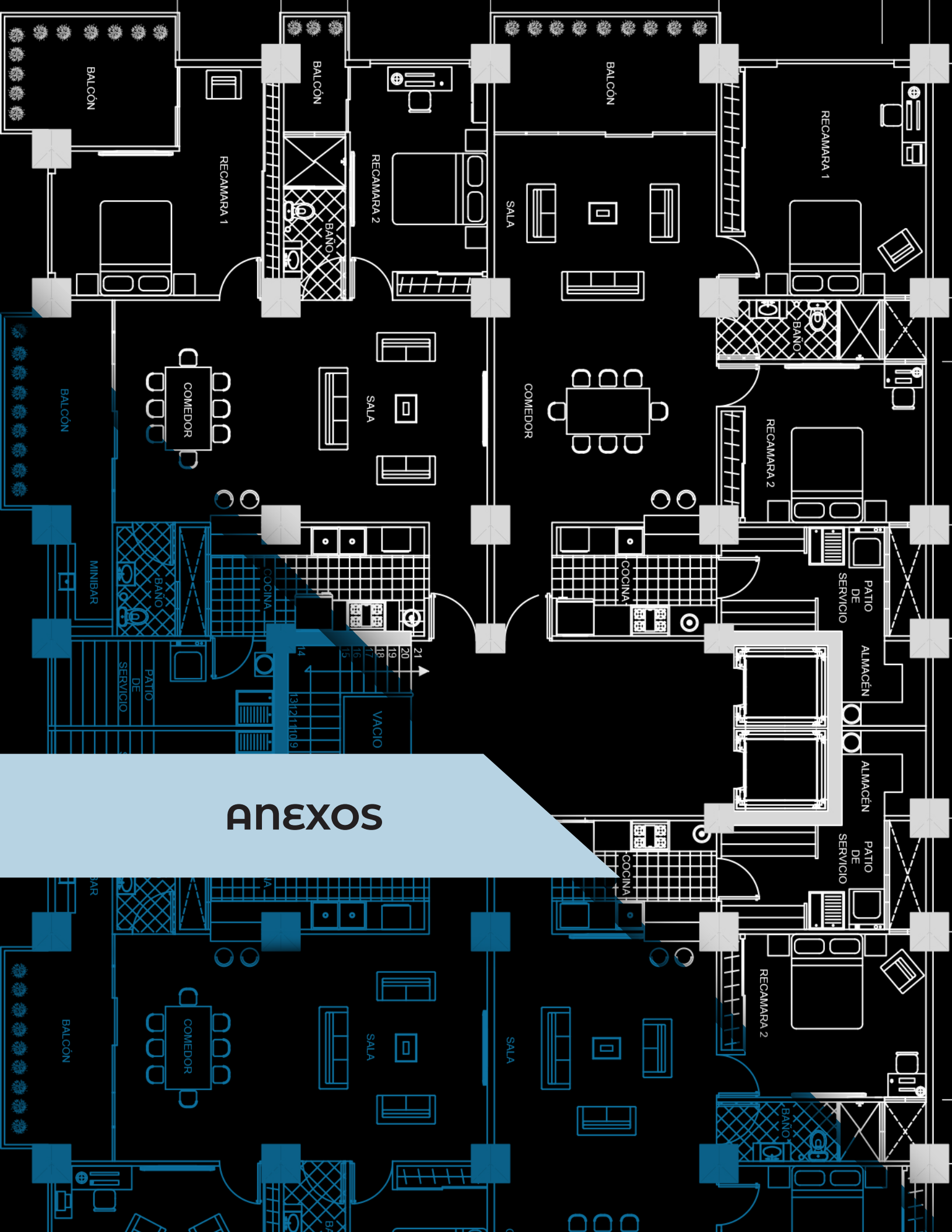
Conclusiones Jcomp. (s.f). *Jigsaw puzzle with missing piece* [Fotografía]. Freepik. https://www.freepik.com/free-photo/jigsaw-puzzle-with-missing-piece-missing-puzzle-pieces_5469650.htm

Fuentes Freepik. (s.f). *Cuaderno y libros de vista superior.* [Fotografía]. Freepik. https://www.freepik.es/foto-gratis/cuaderno-libros-vista-superior_12975500.htm?query=libro%20abierto

NOTA:

Las figuras, gráficos, tablas y planos que no se encuentran enlistados en este índice son **creación de la autora**, por lo cual se deberá citar su autoría como:

Barbosa, M. (2022). *Criterios y técnicas por considerar para la elaboración de un proyecto arquitectónico sismorresistente* [Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México].

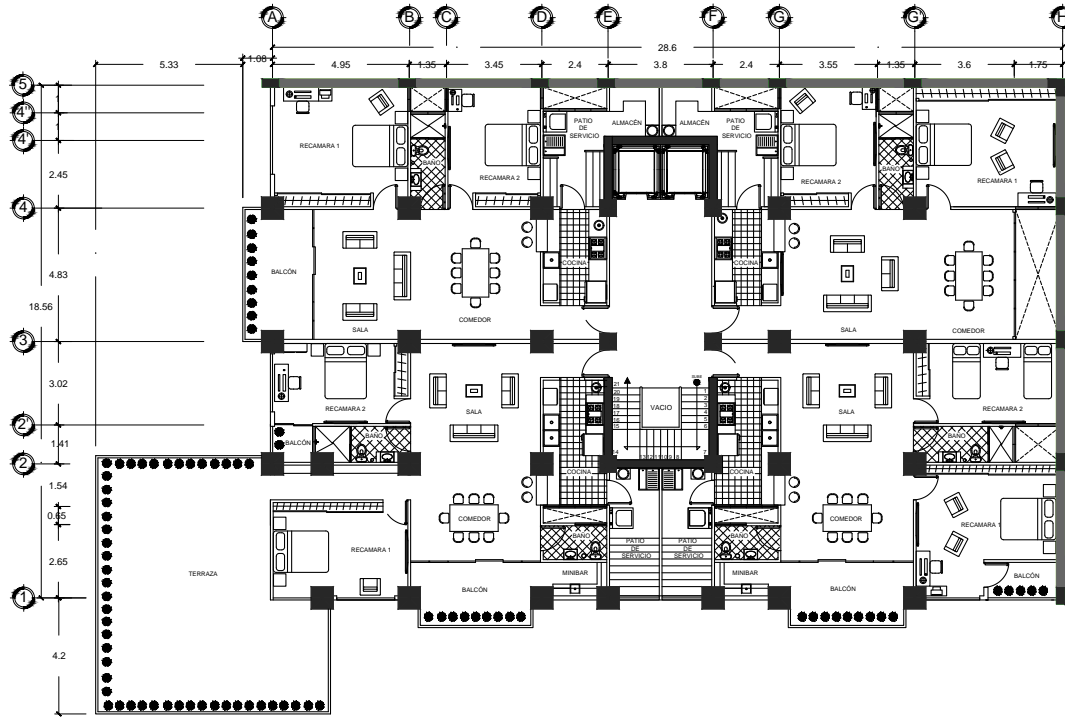


ANEXOS

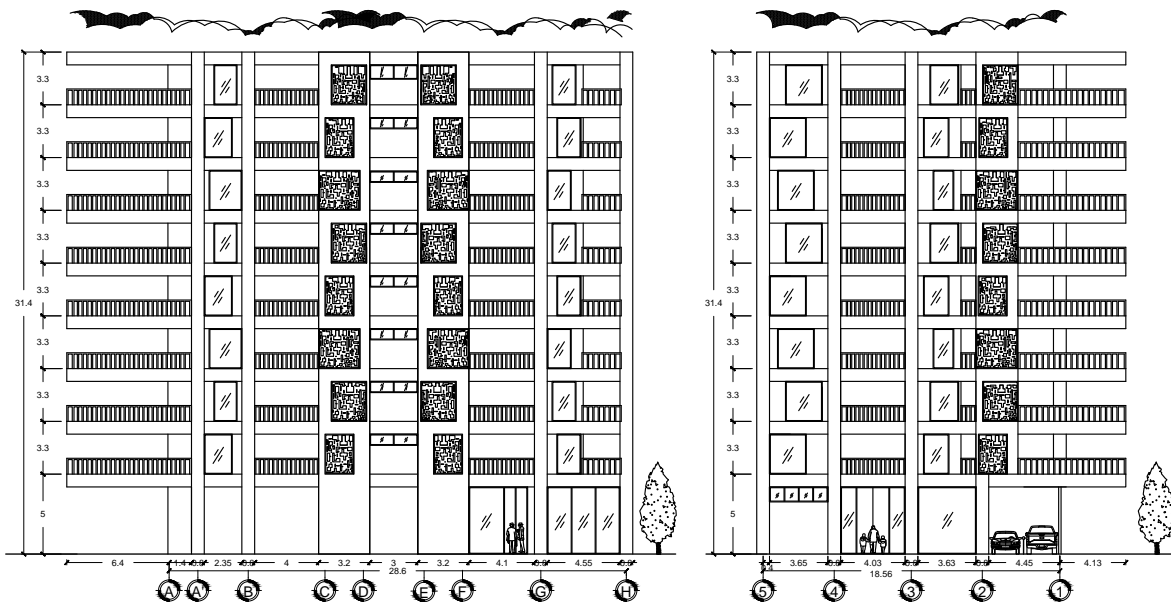
ANEXO 1: PLANO ARQUITECTÓNICO DE LA ESTRUCTURA IRREGULAR

En el presente anexo se muestran el Plano Tipo Residencial de la Estructura Irregular, el cual se modificó para darle las características de irregularidad.

Cabe mencionar que la planta baja de este sistema es la misma que el plano 1, lo único que difiere es que su altura es de 5.0 m en lugar de 3.30 m



Plano Anexo-1. Plano Arquitectónico de la estructura irregular (sin escala)



Plano Anexo-2. Fachadas de la estructura irregular (sin escala)

ANEXO 2: PESOS DE LAS ESTRUCTURAS

Retomando los valores de las cargas permanentes y vivas instantáneas, se calculará el peso sometido para cada entrepiso a partir de su altura de desplante, obteniendo los siguientes datos:

Tabla A.1 Análisis de cargas para la estructura aporcionada e irregular

Losa 1- 8		Kg/m^2	$Kg/m^2 \times \text{área}$
Acciones variables	Carga viva instantanea	100.00	53,053.00
Acciones permanentes	Instalaciones y plafones	8.00	4,244.24
	Azulejo	10.00	5,305.30
	Muros exteriores (Durock)	11.60	1,093.88
	Muros interiores (Tablaroca)	7.80	1,560.00
	Fachada de cristal	5.30	499.79
	Losa de poliestireno con viguetas	256.20	128,189.67
	Peso de elementos estructurales	9,546.26	278,155.15
Total			472,101.03
Losa 9		Kg/m^2	$Kg/m^2 \times \text{área}$
Acciones variables	Carga viva instantanea	70.00	37,137.10
Acciones permanentes	Relleno e impermeabilización	42.00	22,282.26
	Losa de poliestireno con viguetas	256.20	128,189.67
	Peso de elementos estructurales	9,546.26	278,155.15
Total			465,764.18

Fuente: Creación de la autora con pesos de los elementos estructurales calculados por medio del SAP2000

Tabla A.2 Análisis de cargas para la estructura dual

Losa 1- 8		Kg/m^2	$Kg/m^2 \times \text{área}$
Acciones variables	Carga viva instantanea	100.00	53,053.00
Acciones permanentes	Instalaciones y plafones	8.00	4,244.24
	Azulejo	10.00	5,305.30
	Muros exteriores (Durock)	11.60	1,093.88
	Muros interiores (Tablaroca)	7.80	1,560.00
	Fachada de cristal	5.30	499.79
	Losa de poliestireno con viguetas	256.20	128,189.67
	Peso de elementos estructurales	99687.92	365,404.12
Total			559,350.00
Losa 9		Kg/m^2	$Kg/m^2 \times \text{área}$
Acciones variables	Carga viva instantanea	70.00	37,137.10
Acciones permanentes	Relleno e impermeabilización	42.00	22,282.26
	Losa de poliestireno con viguetas	256.20	128,189.67
	Peso de elementos estructurales	99687.92	365,404.12
Total			553,013.15

Fuente: Creación de la autora con pesos de los elementos estructurales calculados por medio del SAP2000

ANEXO 3: COMBINACIÓN DE ACCIONES

Con el fin de garantizar la seguridad de una edificación, la NTC-CADEE señala que al analizar una estructura se debe considerar la posibilidad de que todas las acciones actúen de manera combinada al mismo tiempo, para definir y prever las cargas totales a las que estará sometida y asegurar su resistencia.

De manera que, una de estas combinaciones solo considerará la mezcla de acciones permanentes y variables en su carga máxima.

En cuanto a las acciones accidentales, las NTC-CADEE establece que solo se considerará una carga accidental por combinación, de manera que se evaluará una en X, otra en Y así como el 100% del efecto en ambas direcciones y otra el 30% de manera perpendicular en valores positivos y negativos, esto con el fin de buscar la más desfavorable para basar el diseño en esa posibilidad.

Las combinaciones que serán ingresadas en la simulación de las 3 estructuras se muestran a continuación:

- CMB1) 1.3 AP + 1.5 CVm
- CMB2) 1.1 AP + 1.1 CVi + 1.1 SSX
- CMB3) 1.1 AP + 1.1 CVi - 1.1 SSX
- CMB4) 1.1 AP + 1.1 CVi + 1.1 SSY
- CMB5) 1.1 AP + 1.1 CVi - 1.1 SSY
- CMB6) 1.1 AP + 1.1 CVi + 0.3 SSX
- CMB7) 1.1 AP + 1.1 CVi - 0.3 SSX
- CMB8) 1.1 AP + 1.1 CVi + 0.3 SSY
- CMB9) 1.1 AP + 1.1 CVi - 0.3 SSY

Donde:

AP : Acciones permanentes SSX : Fuerza en X
 CVm : Carga viva máxima SSY : Fuerza en Y
 CVi: Carga viva instantanea

ANEXO 4: EFECTOS DE TORSIÓN EN LA ESTRUCTURA PORTICADA

Para poder calcular la excentricidad torsional, debe de calcularse la excentricidad accidental (e_a) “en la dirección perpendicular a la del análisis” que corresponde a la excentricidad del i -ésimo nivel (e_{ai}) calculada con la ecuación:

$$e_{ai} = [0.05 + 0.05 (i-1) / (n-1)] b_i$$

Cuyos valores se encuentran en el tema 5.2.5.1, formula **7-A**, ahora bien para la excentricidad torsional (e_s) de cada nivel, este efecto se calcula al restarle a la distancia del centro de masa el centro de rigidez en ambas direcciones de análisis:

$$e_{sx} = XCM - XCR \qquad e_{sy} = YCM - YCR$$

Quedando los datos como se ilustra a continuación:

Tabla A.3 Centro de masa, centro de rigidez y excentricidad por losa en direcciones X, Y

Losa	XCM	XCR	e_{sx}	Losa	YCM	YCR	e_{sy}
1	14.65	14.93	-0.28	1	9.25	8.34	0.91
2	14.65	14.96	-0.31	2	9.25	8.35	0.90
3	14.65	14.96	-0.31	3	9.25	8.35	0.90
4	14.65	14.96	-0.31	4	9.25	8.35	0.90
5	14.65	14.96	-0.31	5	9.25	8.35	0.90
6	14.65	14.96	-0.31	6	9.25	8.35	0.90
7	14.65	14.96	-0.31	7	9.25	8.35	0.90
8	14.65	14.96	-0.31	8	9.25	8.35	0.90
9	15.12	14.96	0.16	9	9.27	8.35	0.92

Fuente: Centros de masa y centros de rigidez recuperados del programa SAP2000.

Donde los valores de XCM, YCM, XCR y YCR, señalan las coordenadas en planta donde se encuentran estos centros.

En donde para fines de análisis, deberá de considerarse por lo menos una fuerza igual a la lateral multiplicada por la excentricidad que resulte más desfavorable para los elementos verticales basados en las siguientes ecuaciones:

$$1.5 e_s + e_a$$

$$e_s - e_a$$

Tabla A.4 Excentricidades en x, y con la ecuación 9

$1.5e_s + e_a$				$1.5e_s + e_a$			
Nivel	e_{sx}	e_a	e_{x1}	Nivel	e_{sy}	e_a	e_{y1}
1	-0.28	1.47	1.05	1	0.91	0.97	2.34
2	-0.31	1.65	1.19	2	0.90	1.09	2.44
3	-0.31	1.83	1.37	3	0.90	1.21	2.56
4	-0.31	2.02	1.56	4	0.90	1.33	2.68
5	-0.31	2.20	1.74	5	0.90	1.45	2.80
6	-0.31	2.38	1.92	6	0.90	1.57	2.92
7	-0.31	2.57	2.11	7	0.90	1.69	3.04
8	-0.31	2.75	2.29	8	0.90	1.81	3.16
9	0.16	2.94	3.18	9	0.92	1.93	3.31

Fuente: Creación propia

Tabla A.5 Excentricidades en x, y con la ecuación 10

$e_s - e_a$				$e_s - e_a$			
Nivel	e_{sx}	e_a	e_{x2}	Nivel	e_{sy}	e_a	e_{y2}
1	-0.28	1.47	-1.75	1	0.91	0.97	-0.06
2	-0.31	1.65	-1.96	2	0.90	1.09	-0.19
3	-0.31	1.83	-2.14	3	0.90	1.21	-0.31
4	-0.31	2.02	-2.33	4	0.90	1.33	-0.43
5	-0.31	2.20	-2.51	5	0.90	1.45	-0.55
6	-0.31	2.38	-2.69	6	0.90	1.57	-0.67
7	-0.31	2.57	-2.88	7	0.90	1.69	-0.79
8	-0.31	2.75	-3.06	8	0.90	1.81	-0.91
9	0.16	2.94	-2.78	9	0.92	1.93	-1.01

Fuente: Creación propia

ANEXO 5: EFECTOS DE TORSIÓN EN LA ESTRUCTURA DUAL

Para la excentricidad accidental se resuelve la ecuación 8:

Tabla A.6 Centro de masa, centro de rigidez y excentricidad por losa en direcciones X, Y

Losa	XCM	XCR	e_{sx}	Losa	YCM	YCR	e_{sy}
1	14.02	14.93	-0.91	1	8.72	8.34	0.38
2	14.02	14.96	-0.94	2	8.72	8.35	0.37
3	14.02	14.96	-0.94	3	8.72	8.35	0.37
4	14.02	14.96	-0.94	4	8.72	8.35	0.37
5	14.02	14.96	-0.94	5	8.72	8.35	0.37
6	14.02	14.96	-0.94	6	8.72	8.35	0.37
7	14.02	14.96	-0.94	7	8.72	8.35	0.37
8	14.02	14.96	-0.94	8	8.72	8.35	0.37
9	14.17	14.96	-0.79	9	8.56	8.35	0.21

Después, se aplicaron las ecuaciones 9 y 10, resultando lo siguiente:

Tabla A.7 Excentricidades en x, y con la ecuación 9

$1.5e_s + e_a$				$1.5e_s + e_a$			
Nivel	e_{sx}	e_a	e_{x1}	Nivel	e_{sy}	e_a	e_{y1}
1	0.06	1.47	1.56	1	-0.47	0.97	0.26
2	0.07	1.65	1.76	2	-0.47	1.09	0.38
3	0.07	1.83	1.94	3	-0.47	1.21	0.50
4	0.07	2.02	2.13	4	-0.47	1.33	0.62
5	0.07	2.20	2.31	5	-0.47	1.45	0.74
6	0.07	2.38	2.49	6	-0.47	1.57	0.86
7	0.07	2.57	2.68	7	-0.47	1.69	0.98
8	0.07	2.75	2.86	8	-0.47	1.81	1.11
9	0.03	2.94	2.99	9	-0.64	1.93	0.97

Tabla A.8 Excentricidades en x, y con la ecuación 10

$e_s - e_a$				$e_s - e_a$			
Nivel	e_{sx}	e_a	e_{x2}	Nivel	e_{sy}	e_a	e_{y2}
1	0.06	1.47	-1.41	1	-0.47	0.97	-1.44
2	0.07	1.65	-1.58	2	-0.47	1.09	-1.56
3	0.07	1.83	-1.76	3	-0.47	1.21	-1.68
4	0.07	2.02	-1.95	4	-0.47	1.33	-1.80
5	0.07	2.20	-2.13	5	-0.47	1.45	-1.92
6	0.07	2.38	-2.31	6	-0.47	1.57	-2.04
7	0.07	2.57	-2.50	7	-0.47	1.69	-2.16
8	0.07	2.75	-2.68	8	-0.47	1.81	-2.28
9	0.03	2.94	-2.91	9	-0.64	1.93	-2.57

Fuente: Creación propia

ANEXO 6: EFECTOS DE TORSIÓN EN LA ESTRUCTURA IRREGULAR

Para evitar repetir información, se responde la ecuación 8:

Tabla A.9 Centro de masa, centro de rigidez y excentricidad por losa en direcciones X, Y

Losa	XCM	XCR	e_{sx}	Losa	YCM	YCR	e_{sy}
1	15.06	14.33	0.73	1	10.03	9.55	0.48
2	15.05	14.33	0.72	2	9.97	9.55	0.42
3	15.05	14.33	0.72	3	9.97	9.55	0.42
4	15.05	14.33	0.72	4	9.97	9.55	0.42
5	15.05	14.33	0.72	5	9.97	9.55	0.42
6	15.05	14.33	0.72	6	9.97	9.55	0.42
7	15.05	14.33	0.72	7	9.97	9.55	0.42
8	15.04	14.33	0.71	8	9.96	9.55	0.41
9	14.98	14.33	0.65	9	9.69	9.55	0.14

Posteriormente, se aplicó la ecuación 9 y 10 que resulto en lo siguiente:

Tabla A.10 Excentricidades en x, y con la ecuación 9
 $1.5e_s + e_a$

Nivel	e_{sx}	e_a	e_{x1}
1	0.73	1.47	2.57
2	0.72	1.65	2.73
3	0.72	1.83	2.91
4	0.72	2.02	3.10
5	0.72	2.20	3.28
6	0.72	2.38	3.46
7	0.72	2.57	3.65
8	0.71	2.75	3.82
9	0.65	2.94	3.92

Nivel	e_{sy}	e_a	e_{y1}
1	0.48	0.97	1.69
2	0.42	1.09	1.72
3	0.42	1.21	1.84
4	0.42	1.33	1.96
5	0.42	1.45	2.08
6	0.42	1.57	2.20
7	0.42	1.69	2.32
8	0.41	1.81	2.43
9	0.14	1.93	2.14

Tabla A.11 Excentricidades en x, y con la ecuación 10
 $e_s - e_a$

Nivel	e_{sx}	e_a	e_{x2}
1	0.73	1.47	-0.74
2	0.72	1.65	-0.93
3	0.72	1.83	-1.11
4	0.72	2.02	-1.30
5	0.72	2.20	-1.48
6	0.72	2.38	-1.66
7	0.72	2.57	-1.85
8	0.71	2.75	-2.04
9	0.65	2.94	-2.29

Nivel	e_{sy}	e_a	e_{y2}
1	0.48	0.97	-0.49
2	0.42	1.09	-0.67
3	0.42	1.21	-0.79
4	0.42	1.33	-0.91
5	0.42	1.45	-1.03
6	0.42	1.57	-1.15
7	0.42	1.69	-1.27
8	0.41	1.81	-1.40
9	0.14	1.93	-1.79

Fuente: Creación propia

ANEXO 7: MEMORIA DEL XXII CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL

A continuación, se muestra una memoria de congreso que fue aceptada y expuesta en el CNIE XXII en Aguascalientes 2020, fruto de la presente investigación.



CRITERIOS APLICADOS EN LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO ARQUITECTÓNICO PARA POTENCIALIZAR EL DISEÑO SISMORRESISTENTE

Marisol Barbosa Parada¹ y Daniel Aldama Ávalos²

RESUMEN

Este artículo tiene como fin ilustrar la importancia de considerar los criterios de regularidad de la forma desde la elaboración del proyecto arquitectónico para potencializar su diseño sísmico. Para demostrarlo, se realiza la simulación de dos edificios de 9 niveles ubicados en la zona III de la CdMx, uno con condiciones de irregularidad y otro de regularidad; cuyos resultados comparativos concluyen que el considerar estos criterios optimiza su configuración estructural y desempeño sísmico. Demostrando la relevancia de incluirlos en las NTC para el Proyecto Arquitectónico para que ayude a los arquitectos a participar en la creación de un diseño sismorresistente.

ABSTRACT

The purpose of this article is to illustrate the importance of considering the criteria of shape regularity since the development of the architectural project to enhance its seismic design. To demonstrate this, two 9-level buildings located in zone 3 of the CdMx are simulated, one with irregularity conditions and the other with regularity conditions; whose comparative result conclude that considering these criteria optimizes their structural configuration and seismic performance. Demonstrating the relevance of including them in the NTC for the Architectural Design to help architects participate in the creation of an earthquake resistant design.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia en la Ciudad de México se han presentado un sin número de sismos, de los cuales aquellos suscitados en los años 1957, 1985 y 2017 ocasionaron en las edificaciones medianas una serie de fallas que incluso llegaron a provocar su colapso. Tras una examinación de los daños recabados a través de Narváez y Reinoso, (2007); Meli, y Miranda. (1986) y Galvis, *et. al.* (2017) sobre estas edificaciones, se aprecia que existen similitudes entre ellos que hacen alusión a indicaciones de forma y estructuración. Cuyas incidencias son: planta baja con grandes espacios libres; plantas asimétricas al ser muy cortas u alargadas; alzados desiguales e irregulares debido a claros y volados amplios, una o dos colindancias totalmente cerradas con fachadas abiertas, entre otras, que, como pueden notarse, son propiedades que se definen en la fase conceptual del proyecto arquitectónico.

Estas características si bien son definidas en esa etapa, también forman parte de los parámetros que intervienen en el comportamiento sísmico del edificio, razón por la que se regulan a través de las condiciones de regularidad señaladas en las Normas Técnicas para Diseño por Sismo de la CdMx del 2017 (NTC-DS en adelante). No obstante, esta norma no es una herramienta que el arquitecto consulte en la fase inicial del proyecto generándose con ello un desconocimiento que permite un diseño libre pero que puede dejar al edificio vulnerable a fallas como las citadas anteriormente o a que sufra en fase posteriores grandes

¹ Arquitecta. Estudiante de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, Ciudad de México, 04510, México, D.F. Teléfono: (+52) 2225175823; arq.marisol.barbosa@gmail.com

² Profesor e Investigador, Universidad Nacional Autónoma de México. Av. Hacienda de Rancho Seco S/N, Impulsora Popular Avícola 57130, Nezahualcóyotl, México. Teléfono: (+52) 5538857250; dangeo2429@gmail.com

modificaciones debido al dimensionamiento final de la estructura. Es por lo anterior que el presente artículo tiene como finalidad demostrar la importancia de considerar las condiciones de regularidad de la forma desde la fase conceptual, para que éstos se incluyan también en las Normas Técnicas Complementarias para el Proyecto Arquitectónico del 2017 (NTC-PA en adelante).

Para demostrarlo, se desarrolla el proceso de diseño de un edificio de 9 niveles tomando en cuenta algunas condiciones de irregularidad que suele considerar un arquitecto como planta baja libre, volados amplios, fachadas abiertas y colindancias cerradas. Después, al mismo edificio se le incluyen los criterios de regularidad, con el fin de analizar ambos en el SAP2000 a través del método sísmico estático. Posteriormente, se realiza una comparación de resultados para ver el desempeño sísmico de cada caso. Finalmente, se concluye que el considerar los criterios de diseño sísmico desde la concepción del proyecto optimiza no solo la configuración arquitectónica, sino también la estructural. Demostrando con ello la importancia de incluir estos criterios en las NTC-PA para crear un diseño sismo resistente.

ANTECEDENTES

Desde la creación de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo en 1987, se incluyó un apartado referente a las condiciones de regularidad en las construcciones, cuyo propósito ha sido ilustrar y controlar la influencia que desempeña la geometría en la respuesta sísmica de los edificios que a su vez influye en la configuración arquitectónica. No obstante, las NTC-PA aunque fueron creadas en el 2004 y modificadas dos veces desde entonces, no cuentan con ninguna norma o criterio que haga alusión a la forma ni a la importancia que desempeña está en el comportamiento estructural, lo que ocasiona un vacío que debe ser abordado puesto que, como se recordará de los efectos de los sismos de 1957, 1985 y 2017, los principales daños que fueron encontrados en las edificaciones colapsadas tenían relación directa con su configuración arquitectónica como fueron planta baja débil, e irregularidad en alzado y en planta, por mencionar algunas, que aunque no son adecuadas para el desempeño sísmico, son usualmente utilizadas al ser particularidades de algunas tendencias arquitectónicas que ayudan a crear diseños atractivos y que por lo tanto son sumamente utilizadas en la arquitectura contemporánea.

CRITERIOS DE FORMA EN LAS TENDENCIAS ARQUITECTÓNICAS Y SU INCIDENCIA EN EL COMPORTAMIENTO SÍSMICO

Para comprender la influencia de la geometría en el comportamiento sísmico del edificio y como se han ido integrando las formas irregulares en la arquitectura, es importante remontarnos a un hecho histórico que revolucionó los estilos arquitectónicos: La construcción en 1905 por Auguste Perret del primer edificio de concreto armado con el sistema Hennebique que proponía la utilización de losas, traveses y columnas de concreto reforzadas con armaduras y varillas de acero, que permitió claros amplios y en donde por primera vez se diseñó una planta baja reducida de elementos estructurales para maximizar su espacio y que tuviera un uso comercial (ver figura 1).



Figura 1 Fachada del edificio Rue Franklin diseñado por Auguste Perret

Este hecho creó un parteaguas ya que no solo impulsó la construcción de ese sistema y estableció a Perret como precursor de la arquitectura moderna sino que también logro con su visión influir en una generación de arquitectos posteriores como Le Corbusier, Walter Gropius y Ludwig Mies van der Rohe, quienes en los años 20s impulsaron el inicio del movimiento moderno al promover una construcción funcionalista que sugería que la forma debía responder a una función, y que a su vez renovaron y establecieron tanto una nueva forma de diseñar como de construir, que cambiaría la arquitectura del futuro.

Por ejemplo: Mies van der Rohe optó por impulsar el acristalamiento continuo del inmueble al desarrollar el muro cortina (ver figura 2).



Figura 2 Edificio Lake Shore Drive construido en 1951 por Mies van der Rohe

Walter Gropius propuso la utilización de configuraciones ricas en formas y composición que logran crear diferentes vistas en una edificación como puede verse en La Bauhaus (ver figura 3).



Figura 3 Edificio de la Bauhaus en Dessau / Walter Gropius

Le Corbusier desarrolló “los 5 puntos de la nueva arquitectura” que, de manera general, se ilustran en la figura 4.

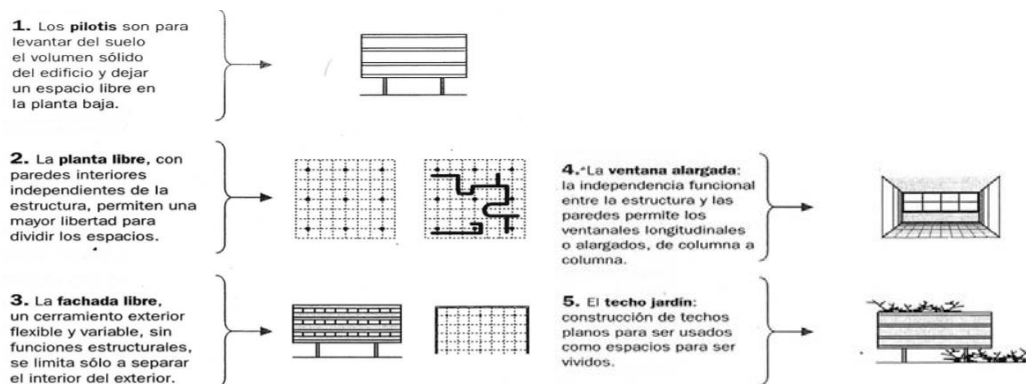


Figura 4 Los 5 puntos de la nueva arquitectura de Le Corbusier

Creando con ello un impacto arquitectónico sin precedentes, ya que, contrapuesto a los órdenes historicistas, este estilo renovó la arquitectura por lo atractivo que resultaban sus formas y por la facilidad con la que podía replicarse el sistema constructivo en cualquier parte del mundo. No obstante, el error de recrearlo en otros continentes fue que no se consideraron las características del entorno en el que iba a ubicarse ni su desempeño ante fenómenos naturales. Esto se debió principalmente a que el estilo surgió en Europa, en lugares como Alemania y Francia, en donde no suelen presentarse eventos sísmicos, pero también porque la ingeniería sísmica empezó a estudiar científicamente el impacto que generaban en las estructuras hasta pasada la mitad del siglo XX.

De esta manera, al trasladar diseños de los años 20s a zonas sísmicas que aún no comprendían del todo el efecto del movimiento telúrico en las construcciones, provocó que los inmuebles, ante un sismo intenso, no presentaran un buen desempeño, convirtiéndose más tarde en lecciones aprendidas que contribuyeron a la creación del mejoramiento de los parámetros de diseño como lo son las condiciones de regularidad. No obstante, su inserción en la arquitectura permitió crear diseños atractivos y modernos que se volvieron parte de las particularidades de algunas tendencias posteriores y que hoy en día siguen formando parte de la conceptualización de los proyectos.

No obstante, algunas de las características implementadas en la arquitectura cuyos orígenes provienen del movimiento moderno crean plantas y alzados irregulares que ante un sismo intenso puede provocar en los inmuebles un desempeño sísmico inadecuado. Siendo estas particularidades la planta baja débil, el problema de rigidez debido a fachadas abiertas con colindancias cerradas, discontinuidad en elementos estructurales, esbeltez en planta y en alzado, asimetría, inadecuada densidad de apoyos, huecos en losa, entradas y salientes prolongadas; que se contraponen a las condiciones de regularidad, que se verán a detalle más adelante.

CRITERIOS DE DISEÑO SÍSMICO QUE INCIDEN EN EL PROYECTO ARQUITECTÓNICO

A continuación, se abordarán de manera particular los criterios de diseño sísmico señalados en las NTC-DS que inciden en el proyecto arquitectónico al tener influencia directa en su geometría y estructuración.

PLANTAS IRREGULARES

Una planta arquitectónica se considera irregular cuando presenta formas en T, L, U, H, +, o una combinación de las mismas, debido a que genera una concentración de esfuerzos en la unión de los diferentes cuerpos que la componen y que además crea centros de masa asimétricos que provocan vibraciones torsionales. La manera de evitar este fenómeno y que permite la libertad de la forma en planta es seccionar cada parte en cuerpos individuales y unirlos mediante juntas constructivas (ver figura 5).



Figura 5 Tipos de plantas consideradas irregulares

PLANTA BAJA DÉBIL

Este caso ocurre cuando en la planta baja se propone un entrepiso mayor al de los niveles superiores para dejar un espacio de gran altura que pueda utilizarse como estacionamiento o zona comercial que provoca que los elementos estructurales en ese nivel tengan una altura mayor al resto, creando en los inferiores una concentración de esfuerzos de cortante que ocasionara su falla o incluso el colapso de los mismos. Para evitar este problema las NTC-DS alientan que la altura de todos los entre pisos sea la misma (excepto en el último piso) o que en el caso de que no sea posible, se realice un análisis que considere con detalle la diferencia de rigideces (ver figura 6).

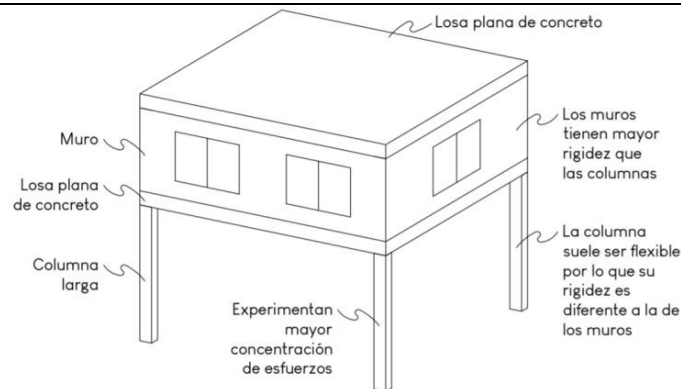


Figura 6 Un ejemplo del fenómeno planta baja débil

SALIENTES Y ENTRANTES

Una condición que está relacionada con la asimetría en planta o alzado son las entrantes o salientes pronunciadas ya que de acuerdo a las NTC-DS éstas no deben ser mayores al 20% de la dimensión de la planta paralela a la dirección en que se considera su ubicación. Esto para evitar que se concentren los esfuerzos en las esquinas entrantes y que ante un sismo esas partes colapsen (ver figura 7).

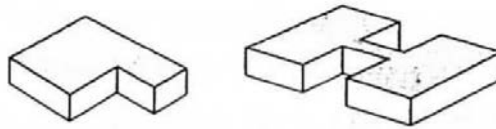


Figura 7 Ejemplo de salientes y entrantes pronunciadas

SIMETRÍA

Uno de los criterios que deben tomarse en cuenta para los proyectos realizados en zonas sísmicas es que prevalezca la simetría ya que su asimetría provocará que las cargas no se distribuyan uniformemente, que la rigidez en los elementos verticales sea mayor en unos, así como que los empujes del sismo no coincidan con los elementos haciendo que cada parte rote en un plano diferente creando un momento torsional que en el peor de los casos puede provocar el colapso.

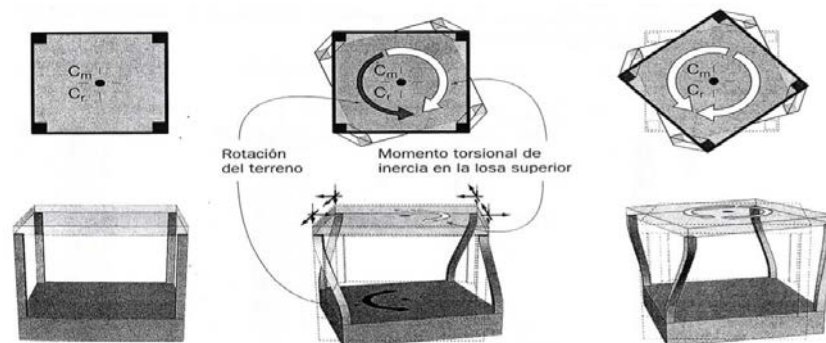


Figura 8 Diagrama que ilustra los efectos de torsión

ALZADOS IRREGULARES

Se dice que un alzado es irregular cuando la planta baja o alguno de los niveles superiores tiene un entrepiso mayor al resto; los elementos verticales son discontinuos; existen cambios de elementos verticales de uno a otro piso; se produce una variación en la masa; reducciones bruscas en la forma; hay retrocesos o salidos

excesivos o una planta tiene mayor dimensión que los demás. Aunque cada situación provoca cosas diferentes en general quedan sometidos a grandes deformaciones causados por la diferencia de rigideces, un aumento de momentos en columnas anteriores que provocara mayores desplazamientos laterales y que las cargas no se distribuyan uniformemente. De manera que las NTC-DS señalen como máximo un 20% de diferencia de rigidez lateral con relación al entrepiso anterior, así como de desplazamiento lateral de los extremos.

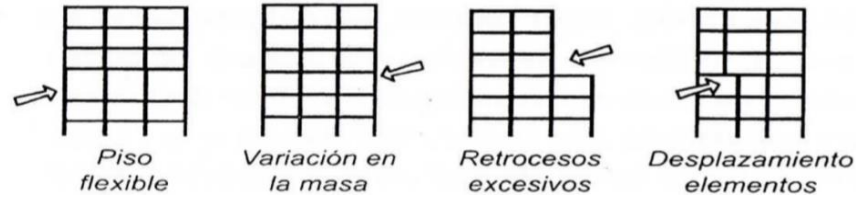


Figura 9 Tipos de edificaciones irregulares en alzado

INMUEBLE EN ESQUINA

Los inmuebles en esquina son aquellos ubicados en esquinas de avenidas o calles que están provistos de dos fachadas llenas de ventanales con colindancias totalmente cerradas y que suelen resolverse con columnas en los frentes y muros corridos en el resto. Cuya problemática es que el inmueble presente diferencia de rigideces al tener más resistencia aquellas con muro corrido que aquellas en las que se tienen muchos vanos, lo que producirá efectos de torsión y, en el peor de los casos, el colapso. La manera de resolverlo es proponer los mismos elementos verticales en los cuatro lados y, de optar por una estructuración de columnas, colocar muros divisorios para que no absorban los esfuerzos participando como muros de carga.

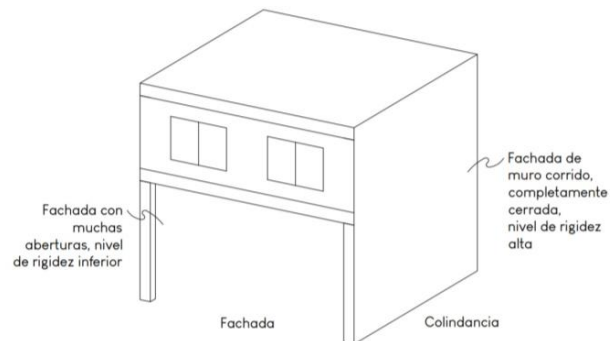


Figura 10 Ilustra el problema existente con colindancias cerradas y fachadas abiertas

PLANTA Y ALZADO DESPROPORCIONADAS

Otro criterio importante a considerar es que tanto el ancho como el alto del proyecto debe ser proporcional para evitar problemas de volteo en el caso de que sea muy esbelto el edificio o la ruptura de este al tener plantas muy alargadas. Siendo así que las NTC-DS señalan que la relación de su altura a la dimensión menor de su base no debe ser mayor a 4 pero a su vez la proporción de largo a ancho no debe ser mayor a 4.

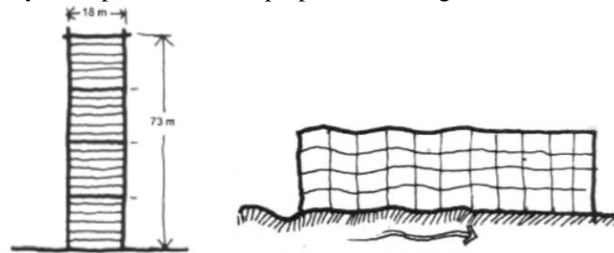


Figura 11 Desproporción de la dimensión de la planta en relación con su altura

EXCESO DE ABERTURAS EN LA LOSA

Un factor que también tiene relación en el proyecto son el número de aberturas que puede existir en la losa debido a que su exceso podría causar zonas débiles en las cuales el sismo intentará disipar su energía provocando fallas locales. Para evitarlo, las NTC-DS sugieren que la losa no deberá tener aberturas que excedan un 20% del área de su planta y deberán estar en la misma posición en todo el proyecto.

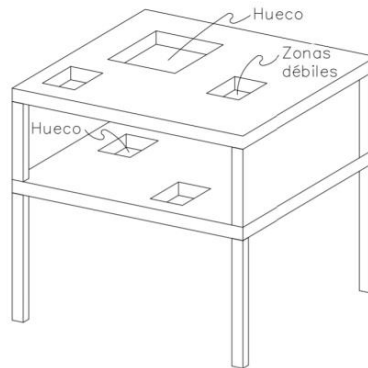


Figura 12 Ejemplo de exceso de aberturas

Una vez abordados los criterios de diseño sísmico que pueden considerarse desde la fase del proyecto arquitectónico, así como las fallas que causa no tomarlas en cuenta, se procede a realizar la descripción del edificio regular e irregular.

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO ARQUITECTÓNICO

Para la realización del proyecto arquitectónico del presente caso práctico se propone una edificación de nueve niveles de tipo mixto al tener la planta baja dedicada a comercios y las superiores a residencia, ubicado en esquina para crear dos fachadas principales y dos colindancias; con una dimensión propuesta de 18.55 m x 28.6 m. Además de ello, para la estructura irregular se retomaron las siguientes características: planta baja libre, salientes prolongadas y exceso de aberturas en la losa.

Una vez definido el tamaño disponible y las características que debía llevar el proyecto, se procedió a revisar las condiciones de regularidad que establecen las NTC-DS, específicamente los puntos que infieren en la geometría del edificio y que están relacionados con el comportamiento de la estructura, los cuales ya fueron abordados previamente y se señalan en la tabla 1.

Tabla 1 Parámetros para el proyecto retomando de los criterios señalados por las NTC-DS

CONDICIONES QUE SEÑALA LAS NTCDS-2017	VALORES PERMITIDOS PARA EL PROYECTO
La relación de la altura a la dimensión menor de su base no es mayor que cuatro	Como la dimensión menor es de 18.55 m, su altura no deberá exceder los 74.00 m. Aunque se recomienda que la relación no sea mayor a 2.5 veces para no tener problemas de esbeltez, que para este caso no sobrepase los 46.00 m.
La relación de largo a ancho de la base no es mayor que cuatro	El tamaño contemplado es de 28.6 m x 18.55 m, por lo tanto, este criterio se cumple ya que su relación es de 1.54.
En planta no debe haber entrantes ni salientes de dimensiones mayores que 20% de la dimensión medida paralelamente a la dirección en que se considera este entrante o saliente	El tamaño máximo permitido de entrantes o salientes del lado ancho es de 3.71 m mientras que del lado largo es 5.72 m.
Los huecos en la losa por nivel no pueden sobrepasar el 20% del área de ese nivel y los huecos no tienen que cambiar de posición de un piso al otro.	Al ser el área de cada nivel 530.53 m ² , el área total de los huecos no deberá pasar los 106.10 m ²
Ningún piso tiene una dimensión en planta mayor que 110% del área de la del piso inmediato inferior, ni 125% mayor que la menor de las dimensiones de los pisos inferiores.	Como se esta considerando usar todo el espacio util de la planta, el área máxima para un nivel no deberá sobrepasar los 583.58 m ²

En base a los valores de la tabla, se estableció lo siguiente:

Tabla 2 Valores para el proyecto

CARACTERISTICAS ADICIONALES DEL PROYECTO	ESTRUCTURA REGULAR	ESTRUCTURA IRREGULAR
Altura del edificio	29.70 M	31.30 M
Altura de entrepisos	3.30 M	5.00 M en la planta baja, el resto de 3.30 M
Todas las columnas de cada entrepiso tienen la misma altura.	SI	NO
Volado mayor al 20% del limite	NO	SI
Las aberturas exceden los 106.10 m2 permitidos	NO	NO

Ahora bien, de los valores obtenidos se diseña una planta tipo (ver figura 13) así como sus alzados (ver figura 14).

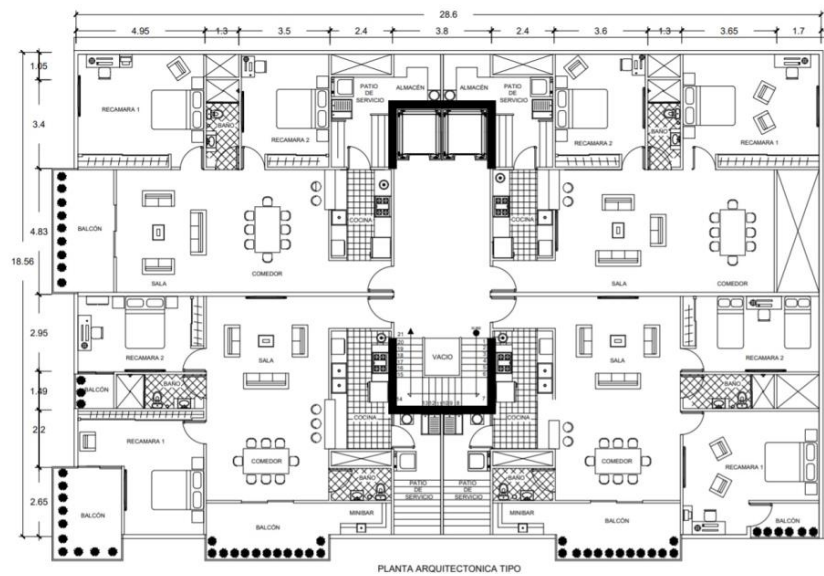


Figura 13 Planta arquitectónica tipo

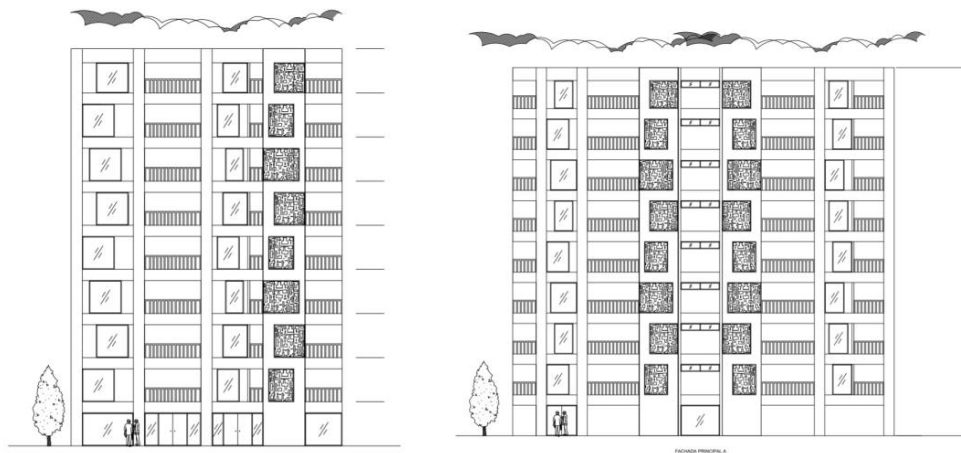


Figura 14 Fachadas principales

Cabe mencionar que existen otros requerimientos que deben tomarse en cuenta para lograr una edificación regular, sin embargo, éstos se verán más adelante ya que repercuten en la etapa de estructuración.

ESPECTRO DE DISEÑO PARA EL PROYECTO

Para poder realizar la simulación de las estructuras, se debe calcular el espectro de diseño que actualmente se retoma de acuerdo al lugar en donde se vaya a localizar, de manera que para este caso se seleccionó un terreno ubicado en Av. Paseo de la Reforma con coordenadas 19.424554; -99.171363. Las cuales, junto con el factor de importancia de la estructura, el factor de irregularidad, el comportamiento sísmico (Q) y el factor de corrección por hiperestaticidad (k_1), ayudan a calcular el espectro de diseño.

Sobre el primero, de acuerdo al tipo de uso del proyecto, éste se considera dentro del grupo B. En cuanto al resto de los factores éstos se retoman del programa SASID y las NTC-DS arrojando los valores de la tabla 3.

Tabla 3 Espectro de diseño de las estructuras retomadas del SASID y las NTC-DS

Espectro de diseño	Estructura	
	Regular	Irregular
Factor de importancia	B	B
Factor de irregularidad	1.0	0.8
Q (F. comportamiento sísmico)	3.0	3.0
K_1 (F. corrección por hiperestaticidad)	1.0	1.0
T_s (Período de vibrar dominante)	1.277	2.275
a_0 (Período natural de vibrar)	0.318	0.330
c (Ordenada espectral máxima)	0.838	0.952
T_a (Período característico del espectro)	0.941	1.806
T_b (Período característico del espectro)	1.760	2.650
k (Desplazamiento máx. del suelo y la estructura)	0.560	0.560
a_{max} (Aceleración máxima)	0.127	0.166

De la tabla anterior puede apreciarse que a pesar de que los valores son iguales en los factores Q, K_1 y K, el resto de los datos como los periodos, ordenadas espectrales y la aceleración máxima de la estructura difirieron, señalando que efectivamente las estructuras irregulares sufren mayores aceleraciones al experimentar periodos de vibrar más largos que producirán mayores esfuerzos en la estructura.

ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Una vez que se definió el diseño arquitectónico, así como sus cargas y espectros, es posible continuar con la estructuración del mismo para realizar su análisis sísmico. Por ello, para ambos casos se considera una estructura de marcos compuesta por una base empotrada, muros rígidos para los núcleos de servicio, losas de entrepiso aligeradas con viguetas en las dos direcciones, columnas y trabes con las siguientes dimensiones:

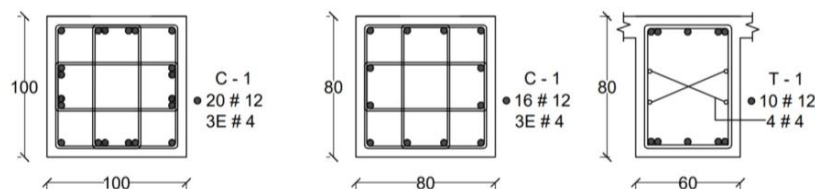


Figura 15 Detalle de los elementos estructurales para ambas estructuras

ANÁLISIS SÍSMICO ESTÁTICO DE LA ESTRUCTURA REGULAR

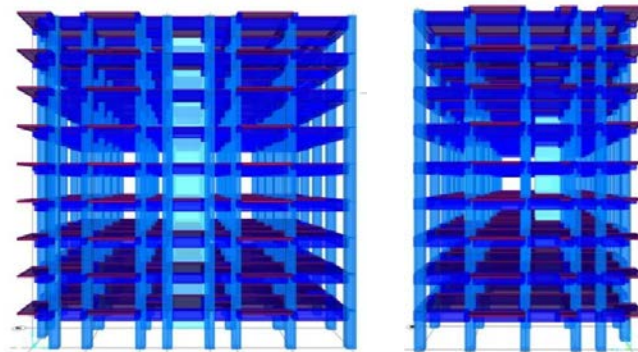


Figura 16 Estructura regular

Para analizar el comportamiento sísmico de la estructura regular se requiere determinar las fuerzas laterales de diseño que experimentara, que de acuerdo a las NTC-DS al calcularse por el método estático se obtienen de la siguiente ecuación:

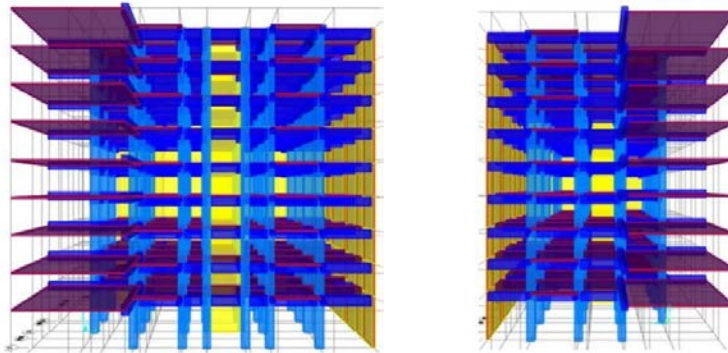
$$F_i = \frac{C}{Q'R} W_i h_i \frac{\sum W_i}{\sum W_i h_i} \quad (1)$$

Cuya sustitución de incógnitas de acuerdo a la tabla 2 y 3 dio como resultado lo siguiente:

$$F_i = \frac{0.838}{3.56 \times 1.985} W_i h_i \frac{4,242.56}{66,740.44} \quad (2)$$

$$F_i = (0.118) W_i h_i (0.0636) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} F_9 &= (0.118) 13,833.07 (0.0607) = 99.08 \text{ tonf} \\ F_8 &= (0.118) 12,463.44 (0.0607) = 89.27 \text{ tonf} \\ F_7 &= (0.118) 10,905.51 (0.0607) = 78.11 \text{ tonf} \\ F_6 &= (0.118) 9,347.58 (0.0607) = 66.95 \text{ tonf} \\ F_5 &= (0.118) 7,789.65 (0.0607) = 55.79 \text{ tonf} \\ F_4 &= (0.118) 6,231.72 (0.0607) = 44.63 \text{ tonf} \\ F_3 &= (0.118) 4,673.79 (0.0607) = 33.47 \text{ tonf} \\ F_2 &= (0.118) 3,115.86 (0.0607) = 22.31 \text{ tonf} \\ F_1 &= (0.118) 1,557.93 (0.0607) = 11.15 \text{ tonf} \end{aligned} \quad (4)$$

ANÁLISIS SÍSMICO ESTÁTICO DE LA ESTRUCTURA IRREGULAR

Figura 17 Estructura irregular

En el caso de esta estructura, anexado a las características previamente descritas se consideran muros corridos para las colindancias. Sus fuerzas se calculan a partir de la ecuación 1 y al sustituir valores se obtiene lo siguiente:

$$F_i = \frac{0.838}{2.844 \times 1.985} W_i h_i \frac{4,242.56}{77,130.90} \quad (5)$$

$$F_i = (0.118) W_i h_i (0.0636) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} F_9 &= (0.148) 14,624.86 (0.0550) = 119.06 \text{ tonf} \\ F_8 &= (0.148) 13,266.01 (0.0550) = 107.99 \text{ tonf} \\ F_7 &= (0.148) 11,708.08 (0.0550) = 95.31 \text{ tonf} \\ F_6 &= (0.148) 10,150.15 (0.0550) = 82.63 \text{ tonf} \\ F_5 &= (0.148) 8,592.22 (0.0550) = 69.95 \text{ tonf} \\ F_4 &= (0.148) 7,034.29 (0.0550) = 57.26 \text{ tonf} \\ F_3 &= (0.185) 5,476.36 (0.0550) = 44.58 \text{ tonf} \\ F_2 &= (0.185) 3,918.43 (0.0550) = 31.90 \text{ tonf} \\ F_1 &= (0.185) 2,360.50 (0.0550) = 19.22 \text{ tonf} \end{aligned} \quad (7)$$

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Una vez analizadas y modeladas las propuestas estructurales, es posible comparar los resultados para demostrar si la incorporación de los criterios de regularidad desde el proyecto arquitectónico ayudo a mejorar la respuesta sísmica del edificio. De manera que cada uno arrojo resultados diferentes, en función a su configuración estructural, así como de las fuerzas laterales que incidieron en ellos, que se obtuvieron en las ecuaciones 4 y 7. Estas fuerzas, a su vez, determinaron el estado límite de servicio que se basa en el desplazamiento que produce la estructura en la dirección X , Y que a su vez determinan el estado límite de seguridad contra colapso y la limitación de daños ante sismos frecuentes, Éstos resultados pueden apreciarse en la tabla 4 y 5.

Tabla 4 Desplazamiento que señala el estado límite de seguridad contra colapso en X, Y para ambas estructuras que no debe ser mayor a $y_{max} = 0.020$

DESPLAZAMIENTO ESTADO LÍMITE DE SEGURIDAD CONTRA COLAPSO EN X			DESPLAZAMIENTO ESTADO LÍMITE DE SEGURIDAD CONTRA COLAPSO EN Y		
Nivel	Estructura Irregular	Estructura Regular	Nivel	Estructura Irregular	Estructura Regular
9	0.00384	0.00159	9	0.00548	0.00132
8	0.00357	0.00133	8	0.00515	0.00126
7	0.00324	0.00145	7	0.00472	0.00118
6	0.00286	0.00131	6	0.00418	0.00106
5	0.00243	0.00114	5	0.00360	0.00092
4	0.00196	0.00094	4	0.00293	0.00075
3	0.00148	0.00071	3	0.00223	0.00057
2	0.00100	0.00046	2	0.00151	0.00037
1	0.00054	0.00020	1	0.00081	0.00017

De lo anterior puede verse que en el caso de la estructura regular tanto en X como en Y se mantiene dentro de los valores permitidos para no alcanzar la distorsión límite, no obstante, en el caso de la estructura irregular estos se sobrepasan de los niveles 5 a 9 en X y de 3 a 9 en Y, demostrando con ello que al ser mayores sus desplazamientos se podría generar su colapso.

Tabla 5 Desplazamiento para limitar los daños ante sismos frecuentes en X, Y para ambas estructuras

DESPLAZAMIENTO LIMITACIÓN DE DAÑOS ANTE SISMOS FRECUENTES EN X (NO DEBERÁ SER MAYOR A 0.004)			DESPLAZAMIENTO LIMITACIÓN DE DAÑOS ANTE SISMOS FRECUENTES EN Y (NO DEBERÁ SER MAYOR A 0.004)		
Nivel	Estructura Irregular	Estructura Regular	Nivel	Estructura Irregular	Estructura Regular
9	0.00543	0.00282	9	0.00774	0.00233
8	0.00505	0.00236	8	0.00728	0.00223
7	0.00458	0.00256	7	0.00668	0.00208
6	0.00404	0.00232	6	0.00591	0.00187
5	0.00343	0.00201	5	0.00509	0.00162
4	0.00278	0.00165	4	0.00415	0.00133
3	0.00210	0.00125	3	0.00315	0.00101
2	0.00142	0.00082	2	0.00213	0.00066
1	0.00077	0.00035	1	0.00114	0.00029

En cuanto a los valores obtenidos de los desplazamientos para limitar los daños ante sismos frecuentes, estos no pueden sobrepasar el límite reglamentario pues es importante que la estructura resista más de un evento sísmico. En el caso de la estructura regular esta se mantuvo bajo la deriva, al contrario de la irregular en donde en su dirección X en los niveles 6 a 9 así como en Y del nivel 4 a 9 sobrepasa el límite, lo que induce que si presentaran daño tras la repetición de eventos sísmicos e incluso que no resistan ni el primer evento.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La incorporación de criterios de diseño sísmico desde la fase proyectual sirvió como base para desarrollar los requerimientos del diseño arquitectónico y fueron los que ayudaron a que la estructura tuviera regularidad de forma tanto en alzado como en planta. Que, como se puede ver en la comparación de resultados resultó ser más efectiva que aquella que no tomo en cuenta estás condicionantes, es decir, la estructura irregular en donde sus estados límites de seguridad contra colapso y limitación de daños resultó sobrepasar los límites reglamentarios. A su vez, se puede rescatar que los elementos estructurales que funcionaban adecuadamente en la estructura aporticada, en la irregular ya no, lo que significa que para mejorar su comportamiento tendrían que modificarse las secciones y armados que evidentemente provocaría que se ensanchen los elementos, reduciendo el espacio útil del proyecto y causando la modificación de la configuración arquitectónica.



De manera que, si el arquitecto aprende a identificar las situaciones que causan mayor conflicto en las edificaciones ante este tipo de eventos, es posible que busque soluciones a través de la configuración arquitectónica que eviten que el ingeniero cause grandes modificaciones en su proyecto y que tenga que hacerse reajustes importantes en el mismo. Es por ello que se hace énfasis en que si se consideran los criterios de regularidad de forma, así como de diseño sísmico y estructuración a partir de la concepción del proyecto arquitectónico, eso ayudará al arquitecto a contribuir en la elaboración de un proyecto sismorresistente y a disminuir las modificaciones en el mismo, razón por la cual es importante que sea incluido en las NTC-PA como una herramienta que ayude a los arquitectos a participar activamente en la creación de un diseño sismorresistente.

REFERENCIAS

Galvis, F., Miranda, E., Heresi, P., Dávalos, H. y Silos, J.R. (2017). **“Preliminary Statistics of Collapsed Buildings in Mexico City in the September 19, 2017 Puebla-Morelos Earthquake”**, Earthquake Engineering Research Institute: Estados Unidos. Pp. 12

Meli, R. y Miranda, E. (1986). **“Evaluación de los efectos de los sismos de septiembre de 1985 en los edificios de la ciudad de México. Parte I. Evaluación de daños”**, México: Instituto de Ingeniería UNAM. P. 28

Narváez y Reinoso, (2007); **“Revisión a 50 años de los daños ocasionados en la Ciudad de México por el sismo del 28 de julio de 1957 con ayuda de investigaciones recientes y sistemas de información geográfica”**. Ingeniería Sísmica, México. pp. 65-66.