



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL

***Obtención de la rigidez lateral en edificios irregulares
en planta, con diafragma rígido, para disminuir la
excentricidad estática.***

T E S I S

Que para obtener el título de:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

Sarahi Oropeza Porras

DIRECTOR DE TESIS:

M. en I. Jesús Eduardo Ramírez Castañeda

Mineral de la Reforma, agosto de 2025



Índice

Resumen	9
Abstract	10
Capítulo 1. Enfoque de la investigación	11
1.1 Introducción	12
1.2 Planteamiento del problema	13
1.3 Justificación	14
1.4 Hipótesis	15
1.5 Objetivo general	15
1.6 Objetivos específicos	15
1.7 Alcances	15
1.8 Limitaciones	16
Capítulo 2. Antecedentes	17
Capítulo 3. Estado del arte	22
Capítulo 4. Marco conceptual y teórico	31
4.1 Marco conceptual	32
Rigidez de una estructura.....	32
Diafragma rígido.....	32
Matriz de rigidez global.....	33
Torsión sísmica.....	33
Centro de masas (CM).....	34
Centro de torsión.....	35
Excentricidad estática, <i>e_s</i>	35
Excentricidad accidental.....	35
Sistema y tipos de contraventeos.....	36
SAP2000.....	37
PRODISIS.....	38
4.2 Normativa mexicana vigente para el análisis sísmico de estructuras	39
4.2.1 Clasificación de las estructuras según el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal.....	39

4.2.2	Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones.....	40
	Acciones de diseño.....	41
	Factores de carga.....	42
4.2.3	Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo.....	42
	Zonas sísmicas.....	42
	Estructuras irregulares.....	43
	Estructura irregular por su forma geométrica en planta.....	43
	Correcciones para estructuras irregulares.....	44
	Efectos a considerar en el análisis sísmico.....	44
	Efectos de torsión.....	44
	Excentricidad accidental.....	45
	Espectros de diseño.....	45
	Reducción de fuerzas sísmicas.....	45
	Factor de comportamiento sísmico.....	46
	Factores de comportamiento sísmico para estructuras de concreto.....	46
	Distorsiones de entrepiso.....	47
	Distorsiones de entrepiso para estructuras irregulares.....	47
	Tipos de análisis sísmico.....	47
	Método estático.....	47
4.2.4	Normas y Especificaciones para estudios, proyectos, construcciones e instalaciones del INIFED, Volumen 4, Tomo II Diseño por Sismo.....	49
	Regionalización sísmica.....	49
	Determinación de parámetros dinámicos del suelo y clasificación del tipo de terreno.....	49
	Espectros de diseño de estructuras del sector educativo.....	50
	Condiciones de irregularidad.....	52
	Elección del tipo de análisis.....	53
4.2.5	Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad. Diseño por Sismo. 53	
	Clasificación de las estructuras.....	53
	Espectros de diseño sísmico.....	54
	Regionalización sísmica.....	55
	Factores para el espectro sísmico de estructuras tipo edificio.....	55
	Corrección por irregularidad.....	57
4.3	Normativa de otros países.....	58
4.3.1	Eurocódigo-8.....	58
	Tipos de estructuras.....	58
	Clases de ductilidad.....	59
	Métodos de análisis.....	59
	Cálculo del coeficiente de comportamiento sísmico.....	60
	Efecto de regularidad estructural.....	61
4.3.2	Normativa Española NCSE-02.....	64
	Métodos de análisis sísmico.....	64
	Factores de reducción de respuesta sísmica.....	64
	Desviación de piso.....	66

Torsión e irregularidades	66
4.4 Análisis matricial de edificios.....	66
Capítulo 5. Metodología.....	69
5.1 Formulación matricial para modelos de un nivel.....	70
5.1.1 Estructura con asimetría en la dirección “x”.....	71
5.1.2 Estructura con asimetría en la dirección “y”.....	76
5.1.3 Estructura con asimetría en ambas direcciones, “x” y “y”	80
Capítulo 6. Casos de estudio	86
6.1 Modelo de 1 nivel.....	87
6.1.1 Obtención de la rigidez lateral para disminuir la excentricidad estática.....	92
6.1.2 Modelo computacional.....	95
6.2 Modelo de 5 niveles.....	105
6.2.1 Obtención de la rigidez lateral para disminuir la excentricidad estática.....	105
4.2.1 Modelo computacional.....	105
6.3 Modelo de 10 niveles.....	108
6.3.1 Obtención de la rigidez lateral para disminuir la excentricidad estática.....	110
6.3.2 Modelo computacional.....	113
Capítulo 7. Resultados.....	116
7.1 Comparación de los centros de torsión de los modelos sin y con contraventeos.....	117
7.1.1 Vistas en planta de las rotaciones en cada dirección donde se aplicó el sismo	119
7.2 Desplazamientos y distorsiones	122
Capítulo 8. Conclusiones y recomendaciones	129
Referencias.....	132
Glosario.....	137

Lista de figuras

Figura 2.1 Daños observados en edificios irregulares (Colunga,2010)	18
Figura 2.2 Colapso del hotel Duca D´Abruzzi (Colunga, 2010).....	19
Figura 2.3 Palacio de Gobierno de Haití dañado por planta baja débil (Colunga, 2010)	19
Figura 2.4 Colapsos parciales y daños graves en edificios con combinaciones de irregularidades en planta y elevación (Colunga, 2010).....	20
Figura 2.5 Condominio Monte Albán en Mexicali (Colunga, 2010)	20
Figura 3.1 Modelos con geometría en "T" con muros de corte (Subodh, et al.,2017). .	23
Figura 3.2 Modelos con geometría en "L" (Subodh, et al.,2017).....	23
Figura 3.3 Modelos A y B con muros de corte (Mohamed-Sherif et al., 2019).	24
Figura 3.4 Modelos analizados (Georgoussis y Mamou,2018).	25
Figura 3.5 Modelos analizados (Hamdy H. A. y Ahmed-Abd-el-rahim, 2010).	26
Figura 3.6 Posición del marco en el modelo con disposición asimétrica (Lyublinskiy ,2024).	26
Figura 3.7 Geometrías en planta analizadas (Gómez-Soberón y González- Herrera,2008).	27
Figura 3.8 Modelos analizados (Bohara, et al., 2021).....	28
Figura 3.9 Objeto de estudio (Ñauta-Ayala y Vélez Lliguisupa,2024).	29
Figura 4.1.1 Torsión sísmica (elaboración propia).....	34
Figura 4.1.2 Configuraciones de contraventeos (Del Rincón de la Macorra, 2017).....	36
Figura 4.1.3 Configuraciones de marcos con contraventeos (Tapia-Hernández, s.f.)..	37
Figura 4.1.4 Secciones transversales de contraventeos (Tapia-Hernández, s.f.)	37
Figura 4.1.5 Interfaz de SAP2000 (elaboración propia)	38
Figura 4.1.6 Interfaz de PRODISIS (elaboración propia)	39
Figura 4.2.1 irregularidades en planta por forma geométrica (NTC de Diseño por Sismo, 2023)	43
Figura 4.2.2 Factor de reducción por comportamiento sísmico (NTC de Diseño por Sismo, 2023)	45
Figura 4.2.3 Regionalización sísmica de la República Mexicana (INIFED, 2022).	49
Figura 4.2.4 Carta de microzonificación sísmica (INIFED, 2022).....	50
Figura 4.2.5 Zonas sísmicas según Manual de CFE (Manual de CFE, 2015).....	55
Figura 5.1.1 Ejemplo de excentricidad estática en "x" (elaboración propia).	72
Figura 5.1.2 Ejemplo de excentricidad estática en "y" (elaboración propia).....	77
Figura 5.1.3 Ejemplo de excentricidad estática en las dos direcciones de edificio (elaboración propia).....	82
Figura 6.1.1 Localización geográfica de Acapulco, Guerrero (Niño-Gutiérrez, y Rodríguez, 2010).....	88
Figura 6.1.2 Regiones sísmicas de la República Mexicana (Delgado-Anguiano y Ledesma-Rivera,2016)	88
Figura.6.1.3 Planta tipo para los modelos con 1 y 5 niveles (elaboración propia).	89
Figura 6.1.4 Vista en elevación de los 3 casos de estudio (elaboración propia).	90
Figura 6.1.5 Pasos a seguir para el modelado de los casos de estudio (elaboración propia).	96

Figura 6.1.6 Dibujo del esquema para modelo de 1 nivel (elaboración propia).....	96
Figura 6.1.7 Importación del modelo a SAP2000 (elaboración propia).	97
Figura 6.1.8 Definición del concreto $f'c=250$ (elaboración propia).....	97
Figura 6.1.9 Creación de secciones para los elementos estructurales (elaboración propia).	98
Figura 6.1.10 Creación de patrones de carga (elaboración propia).	99
Figura 6.1.11 Combinaciones de carga (elaboración propia).....	99
Figura 6.1.12 Asignación de cargas a las trabes y definición de masa (elaboración propia).	99
Figura 6.1.13 Asignación de diafragmas a los entrepisos del edificio (elaboración propia).	100
Figura 6.1.14 Obtención del espectro de respuesta con PRODISIS (elaboración propia).	102
Figura 6.1.15 Obtención de los valores del espectro de diseño (elaboración propia). ..	103
Figura 6.1.16 Exportación de datos a Excel (elaboración propia).....	103
Figura 6.1.17 Importación del espectro de diseño (elaboración propia).....	104
Figura 6.1.18 Configuración para la obtención de la gráfica del espectro de diseño (elaboración propia).	104
Figura 6.1.19 Vista 3D del modelo con 1 nivel con contraventeos (elaboración propia).	105
Figura 6.2.1 Vista 3D del modelo con 5 niveles con contraventeos (elaboración propia).	108
Figura 6.3.1 Planta estructural para el modelo de 10 niveles (elaboración propia). ...	109
Figura 6.3.2 Vista 3D del modelo con 10 niveles con contraventeos (elaboración propia).	115
Figura 7.1.1 Comparación de los centros de torsión del modelo de 1 nivel (elaboración propia)	117
Figura 7.1.2 Comparación de los centros de torsión del modelo de 5 niveles (elaboración propia)	118
Figura 7.1.3 Comparación de los centros de torsión del modelo de 10 niveles (elaboración propia).....	118
Figura 7.1.4 Modelo de 1 nivel sin contraventeos, a) sismo en dirección "x", b) sismo en dirección "y" (elaboración propia).....	119
Figura 7.1.5 Modelo de 1 nivel con contraventeos, a) sismo en dirección "x" (elaboración propia), b) sismo en dirección "y"	119
Figura 7.1.6 Modelo de 4 niveles sin contraventeos, a) sismo en dirección "x", b) sismo en dirección "y" (elaboración propia).....	120
Figura 7.1.7 Modelo de 4 niveles con contraventeos, a) sismo en dirección "x", b) sismo en dirección "y" (elaboración propia).....	120
Figura 7.1.8 Modelo de 10 niveles sin contraventeos, a) sismo en dirección "x", b) sismo en dirección "y" (elaboración propia).....	121
Figura 7.1.9 Modelo de 10 niveles con contraventeos, a) sismo en dirección "x", b) sismo en dirección "y" (elaboración propia).....	121
Figura 7.2.1 Distorsiones de entrepiso en dirección "X", modelo con 1 nivel (elaboración propia).	122
Figura 7.2.2 Distorsiones de entrepiso en dirección "Y", modelo con 1 nivel (elaboración propia).	122

Figura 7.2.3 Desplazamientos en dirección "X", modelo con 1 nivel (elaboración propia).	123
Figura 7.2.4 Desplazamientos en dirección "Y", modelo con 1 nivel (elaboración propia).	123
Figura 7.2.5 Distorsiones de entrepiso en dirección "X", modelo con 5 niveles (elaboración propia).	124
Figura 7.2.6 Distorsiones de entrepiso en dirección "Y", modelo con 5 niveles (elaboración propia).	124
Figura 7.2.7 Desplazamientos en dirección "X", modelo con 4 niveles (elaboración propia).	125
Figura 7.2.8 Desplazamientos en dirección "Y", modelo con 4 niveles (elaboración propia).	125
Figura 7.2.9 Distorsiones de entrepiso en dirección "X", modelo con 10 niveles (elaboración propia).	126
Figura 7.2.10 Distorsiones de entrepiso en dirección "Y", modelo con 10 niveles (elaboración propia).	126
Figura 7.2.11 Desplazamientos en dirección "X", modelo con 10 niveles (elaboración propia).	127
Figura 7.2.12 Desplazamientos en dirección "Y", modelo con 10 niveles (elaboración propia).	127

Lista de tablas

Tabla 4.2.1 Reducción de distorsiones máximas en estructuras irregulares (NTC de Diseño por Sismo, 2023).	44
Tabla 4.2.2 Factores de comportamiento sísmico para marcos de concreto (NTC de Diseño por sismo, 2023).	46
Tabla 4.2.3 Valores de los periodos característicos y exponentes que controlan las ramas descendientes de los espectros de diseño (INIFED, 2022).	50
Tabla 4.2.4 Factor correctivo por irregularidad (INIFED,2022).	52
Tabla 4.2.5 Clasificación de estructuras según su destino (Manual de CFE, 2015).	53
Tabla 4.2.6 Valores para clasificar el tipo de zona (Manual de CFE, 2015).	55
Tabla 4.2.7 Factores de comportamiento sísmico (Manual de CFE,2015).	55
Tabla 4.2.8 Valores de los periodos característicos y exponentes que controlan las ramas de los espectros de diseño (Manual de CFE,2015).	57
Tabla 4.2.9 Factor para corregir irregularidad (Manual de CFE,2015).	57
Tabla 4.3.1 Tipos de estructuras según Eurocódigo E-8, (AN/UNE,2022).	58
Tabla 4.3.2 Valores sugeridos para el factor básico de reducción de respuesta q_0 (Barbat, et al, 2005).	61
Tabla 4.3.3 Factores de reducción para estructuras porticadas, con nivel de ductilidad alto (Barbat, et al., 2005).	62
Tabla 4.3.4 Factores de reducción para estructuras porticadas, con nivel de ductilidad bajo (Barbat, et al., 2005).	62
Tabla 4.3.5 Factores de reducción para estructuras con muros de cortante, con nivel de ductilidad alto (Barbat, et al., 2005).	63

Tabla 4.3.6 Factores de reducción para estructuras con muros de cortante, con nivel de ductilidad bajo (Barbat, et al., 2005).....	63
Tabla 4.3.7 Factores de reducción para estructuras con muros de cortante con falla a flexión (Barbat, et al., 2005).....	63
Tabla 4.3.8 Parámetros del factor de reducción (Barbat, et al., 2005).....	65
Tabla 4.3.9 Factores de reducción para ductilidad alta (Barbat, et al., 2005).....	65
Tabla 4.3.10 Factores de reducción para ductilidad intermedia (Barbat, et al., 2005)...	65
Tabla 4.3.11 Factores de reducción para ductilidad baja (Barbat, et al., 2005).....	65
Tabla 5.1.1 Valores de la rigidez lateral, ejemplo con excentricidad en “x” (elaboración propia)	73
Tabla 5.1.2 Valores de la rigidez lateral, ejemplo con excentricidad en “y” (elaboración propia)	78
Tabla 5.1.3 Valores de la rigidez lateral, ejemplo con excentricidad en “x” y en “y” (elaboración propia)	83
Tabla 6.1.1 Análisis de carga para entresijos (elaboración propia).....	91
Tabla 6.1.2 Análisis de cargas para losa de azotea (elaboración propia).....	91
Tabla 6.1.3 Valores de la rigidez lateral para el primer caso de estudio (elaboración propia)	92
Tabla 6.1.4 Fuerzas laterales por sismo en dirección “x”, para modelo de 1 nivel (elaboración propia).....	101
Tabla 6.1.5 Fuerzas laterales por sismo en dirección “y”, para modelo de 1 nivel (elaboración propia).....	101
Tabla 6.1.6 Fuerzas laterales por sismo en dirección “x”, para modelo de 1 nivel (elaboración propia).....	101
Tabla 6.1.7 Fuerzas laterales por sismo en dirección “y”, para modelo de 1 nivel (elaboración propia).....	101
Tabla 6.2.1 Fuerzas laterales por sismo en dirección “x”, para modelo de 5 niveles (elaboración propia)	106
Tabla 6.2.2 Fuerzas laterales por sismo en la dirección “y”, para el modelo de 5 niveles (elaboración propia)	106
Tabla 6.2.3 Fuerzas laterales por sismo en la dirección “x”, para el modelo de 5 niveles con CTV (elaboración propia).....	107
Tabla 6.2.4 Fuerzas laterales por sismo en la dirección “y”, para el modelo de 5 niveles con CTV (elaboración propia).....	107
Tabla 6.3.1 Valores de la rigidez lateral para el primer caso de estudio (elaboración propia).....	110
Tabla 6.3.2 Fuerzas laterales por sismo en la dirección “x”, para el modelo de 10 niveles (elaboración propia)	113
Tabla 6.3.3 Fuerzas laterales por sismo en la dirección “y”, para el modelo de 10 niveles (elaboración propia)	114
Tabla 6.3.4 Fuerzas laterales por sismo en la dirección “x”, para el modelo de 10 niveles con CTV (elaboración propia).....	114
Tabla 6.3.5 Fuerzas laterales por sismo en la dirección “y”, para el modelo de 10 niveles con CTV (elaboración propia).....	115

Resumen

En este trabajo se analiza el comportamiento de edificios con geometrías irregulares en planta ante fuerzas laterales, en los cuales, generalmente el centro de torsión (CT) y el centro de masas (CM) no se encuentran ubicados en un mismo lugar, es decir, se genera una excentricidad en cada uno de los entresijos del edificio, denominada excentricidad estática, dicha condición provoca efectos de torsión alrededor del eje vertical de la estructura y, en consecuencia, puede provocar daños severos durante eventos sísmicos de magnitud considerable.

En México ya se han realizado avances importantes para minimizar los daños en las estructuras irregulares sometidas a fuerzas laterales, evidencia de ello es que actualmente las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México son consideradas como una de las más completas a nivel mundial. Para el diseño por sismo, la normativa mexicana realiza diversas recomendaciones para garantizar un buen comportamiento estructural, sin embargo, en la práctica no siempre se atienden correctamente puesto que se siguen presentando diversas patologías debido a los diseños irregulares que pueden causar daños importantes en los edificios.

Por ello, el objetivo de este trabajo es el de desarrollar una metodología con la que se pueda reducir la excentricidad estática en edificios irregulares en planta, modificando la rigidez lateral de la estructura. Dicha metodología se basa en el análisis matricial de estructuras, a través del cual se determina la matriz de rigidez global del edificio, con esta información, es posible localizar el centro de torsión de la estructura y ajustarlo de manera que su posición se aproxime al centro de masas. El método se plantea primeramente a edificaciones de un solo nivel para facilitar su comprensión y validación, y posteriormente se extrapola a estructuras de varios niveles.

Para comprobar la eficacia del método, se desarrollaron tres casos de estudio a base de marcos de concreto reforzado que contemplan estructuras de 1, 5 y 10 niveles, para dichas estructuras se considera un alto grado de asimetría en planta y un entresijo rígido, las cuales fueron sometidas a una demanda sísmica correspondiente a la zona de Acapulco, Guerrero.

Para cada caso de estudio se realizaron dos modelos, uno sin contraventeos y otro con contraventeos, y se compararon ambos resultados.

Los resultados muestran que la modificación de la rigidez lateral, mediante la implementación de contraventeos estratégicamente ubicados, reduce significativamente la excentricidad estática y con ello la torsión y los desplazamientos en estructuras irregulares. De igual manera, otro de los beneficios del método es que puede ayudar a mejorar la propuesta estructural antes de la construcción de la edificación, ya que, si inicialmente se trata de reducir la torsión, se reduce también la demanda de los esfuerzos en los elementos estructurales, contribuyendo a diseños con mejor comportamiento.

Palabras clave: asimetría en planta, centro de torsión, torsión sísmica, análisis estructural, contraventeos.

Abstract

This work analyzes the behavior of buildings with irregular geometries in plan subjected to lateral forces, in which, the center of torsion (CT) and the center of mass (CM) are generally not located at the same point. This condition creates an eccentricity at each floor level, known as static eccentricity, that condition generates torsional effects around the vertical axis of the structure and, as a result, can cause severe damages during seismic events of considerable magnitude.

In Mexico, significant progress has already been made in minimizing damage to irregular structures subjected to lateral forces, as evidence of this, the current “Normas Tecnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México” are considered among the most comprehensive in the world. For seismic design, Mexican regulations offer various recommendations to ensure proper structural performance; however, these are not always correctly followed in practice, and structural pathologies due to irregular designs continue to appear, often resulting in significant building damage.

Therefore, the objective of this study is to develop a methodology to reduce static eccentricity in buildings with irregular floor plans by modifying the structure’s lateral stiffness. This methodology is based on the matrix analysis of structures, through which the global stiffness matrix of the building is determined. With this information, the location of the structure’s center of torsion can be identified and adjusted to approximate the center of mass. The method is initially applied to models of one story to facilitate understanding and validation, and is later extrapolated to multi-story models.

To verify the effectiveness of the method, three case studies were developed using reinforced concrete frames representing structures of 1, 5, and 10 stories. These structures feature a high degree of plan asymmetry and a rigid diaphragm, and were subjected to seismic demand corresponding to the region of Acapulco, Guerrero.

For each case study, two models were developed, one without bracing and one with bracing, and their results were compared.

The results show that modifying the lateral stiffness, through the implementation of strategically located bracing, significantly reduces static eccentricity and consequently, torsion and displacements in irregular structures. Additionally, another benefit of the method is that it can contribute to improving the structural proposal before the construction of the building, inasmuch as, if the torsion is initially reduced, the demand for stresses on the structural elements is also reduced, contributing to better performing designs.

Keywords: plan asymmetry, center of torsion, seismic torsion, structural analysis, bracing systems.

Capítulo 1. Enfoque de la investigación

1.1 Introducción

En épocas recientes es común ver edificaciones con diseños llamativos y poco convencionales, en la mayoría de los casos con geometrías irregulares e incluso plantas asimétricas, estas configuraciones arquitectónicas provocan que la distribución de la rigidez en los elementos estructurales genere excentricidades, las cuales repercuten en el comportamiento de la estructura. (Garrido y Fernández-Dávila, 2024).

Cuando una estructura irregular (ya sea por la geometría de su planta, por asimetría en elevación, por asimetría en la distribución de la rigidez de sus elementos estructurales o por asimetría en cargas) es sometida a cargas laterales, usualmente aquellas provocadas por un sismo o por viento, presenta un comportamiento de torsión causado por la no coincidencia entre el centro de torsión del edificio (CT) y su centro de masas (CM), es decir, se genera una excentricidad denominada excentricidad estática, dicha condición puede provocar que el edificio gire alrededor de su eje vertical. En eventos sísmicos ocurridos a través del tiempo, se ha visto que este fenómeno produce daños severos en las estructuras tales como: fallas en columnas y trabes, fallas en elementos de conexión e incluso la probabilidad de presentar un colapso parcial o total. (Padilla-Quincot, 2010).

A diferencia de las estructuras irregulares, el fenómeno de la torsión sísmica es menos crítico en edificios regulares ya que la excentricidad que presentan es muy poca y por ende la rotación es mínima, en consecuencia, se producen principalmente desplazamientos traslacionales.

Debido a la presencia de patologías en las estructuras irregulares durante eventos sísmicos, los códigos de construcción en los países con mayor peligro sísmico han ido implementado diferentes recomendaciones para el análisis y diseño de las edificaciones, algunos de ellos penalizan las irregularidades en las estructuras u otros las prohíben para ciertas zonas.

Un ejemplo de dichos códigos es la normativa estadounidense ASCE 7-16 y ASCE 7-22, las cuales clasifican las irregularidades estructurales en planta y en elevación, y restringen el uso de estructuras muy irregulares en zonas altamente sísmicas según el nivel de importancia (Restrepo et al., 2023). Por su parte, la normativa colombiana aplica factores de reducción según el tipo de irregularidad. En cambio, en Perú, el código normativo, penaliza las irregularidades en estructuras, ubicadas en zonas con una alta probabilidad sísmica (Medina-Christian y Medina-Santiago, 2017). En México, en las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo 2023, de igual manera que en la normativa estadounidense, se clasifica a las estructuras irregulares en dos tipos, considerando 5 tipos de irregularidad en planta y 3 tipos de irregularidad en elevación.

Los avances en el diseño sísmico han mejorado a través del tiempo, los códigos normativos se han actualizado ampliamente en varios países. Sin embargo, a pesar de todas las mejoras en las normativas pareciera ser que aún hay mucho por desarrollar, porque en la práctica se siguen presentando devastadores colapsos en edificios.

Por otra parte, además de los avances en la elaboración de reglamentos para el diseño sísmico de edificios irregulares, ya se han realizado diferentes investigaciones que analizan el comportamiento de las estructuras irregulares durante la presencia de fuerzas provocadas por sismos. Un ejemplo de dichas investigaciones es la realizada por Boddu-

Venkata, et. al. (2021) en la cual se evaluaron varias combinaciones de irregularidades en una estructura, se evaluaron 9 casos de 3 combinaciones de irregularidades los cuales fueron sometidos a un análisis sísmico mediante el método de espectro de respuesta, una de las combinaciones más críticas fue al considerar un edificio con irregularidad en rigidez, en elevación e irregularidad torsional. Lyublinskiy (2024), realizó un estudio para evaluar la torsión de edificios asimétricos de concreto reforzado, se realizó un modelo con 20 pisos para obtener los diagramas de deformación, utilizando el método de elementos finitos. Los resultados obtenidos revelaron que las estructuras asimétricas mostraron un aumento en la vibración y su primer modo de vibrar fue torsional.

De manera similar, en la Ciudad de México se han realizado estudios sobre los efectos ocasionados por los sismos, dichos estudios indican que una gran proporción de las construcciones que colapsaron total o parcialmente, o que presentaron daños severos, correspondían a estructuras con irregularidades, uno de ellos determinó que el 40% de las estructuras dañadas por el sismo de 1957 eran edificios esquineros (irregulares en planta) u otros presentaban irregularidad en rigidez por la presencia de elevadores (Trujillo-Tamayo, 2020). Otro trabajo de tesis realizado, evaluó mediante una metodología matricial, los efectos de la torsión sísmica, concluyendo que las distorsiones y desplazamientos de un edificio son más severas cuando se presentan en las direcciones principales en comparación con las direcciones no principales (Ramírez-Castañeda, 2015). En otro estudio se realizaron análisis elásticos a edificios con las configuraciones geométricas en planta más comunes en la Ciudad de México (cuadrada, rectangular, en U, L y T) contemplando uno, dos y cuatro niveles, los autores concluyeron que las configuraciones en T y U tenía mayor demanda sísmica, que equivalía al 50% o hasta un 80% más, en comparación con geometrías regulares. (Trujillo-Tamayo, 2020)

A partir de lo que se conoce en el contexto nacional e internacional, lo que se pretende con este trabajo es desarrollar una metodología matricial para disminuir la excentricidad estática presente en estructuras irregulares en planta y como consecuencia, aminorar los efectos de torsión sísmica. En dicha metodología se modifica de manera estratégica la rigidez lateral de los marcos de la estructura para reducir la distancia entre el centro de torsión (CT) y el centro de masas del edificio (CM). Los casos de estudio serán evaluados mediante el programa de cálculo SAP2000, el cual es un programa comercial que se ha implementado en proyectos de investigación y ha dado resultados congruentes puesto que ofrece una interfaz para llevar a cabo el modelado, análisis y diseño. El caso de estudio principal será una estructura con marcos a base de concreto reforzado, con secciones circulares en las columnas, asimetría en planta y para uso habitacional.

1.2 Planteamiento del problema

El análisis sísmico de edificios en muchos casos resulta ser más complejo cuando se trata de estructuras irregulares, ya que las características peculiares del edificio influyen en el comportamiento estructural. Este tipo de edificaciones requiere una modelación con especial atención al cumplimiento de los lineamientos normativos relacionados a los efectos de torsión, puesto que como se mencionó anteriormente, las estructuras irregulares son

especialmente vulnerables a sufrir daños durante sismos de intensidad media o alta debido al fenómeno de la torsión sísmica.

Por lo tanto, si en la práctica no se presta atención al contemplar los efectos de torsión para estructuras irregulares y si además no se consideran todas las recomendaciones que hace la normativa mexicana, es probable que los resultados del análisis estructural no sean correctos para implementarse en el diseño de los elementos, conduciendo a la elaboración de proyectos de construcción cuyo desempeño estructural no corresponde a la demanda de las acciones a las que es sometida la edificación (cargas vivas, muertas y accidentales).

1.3 Justificación

Aunque los sismos son impredecibles y tampoco se pueden evitar, lo que si podemos hacer es asegurar la integridad de la población mediante la construcción de estructuras capaces de soportar los efectos de las cargas laterales producidas por eventos sísmicos.

En este sentido, según investigaciones que se han desarrollado, es primordial que en las estructuras irregulares se haga una ubicación cuidadosa de los elementos que aportan rigidez lateral (columnas, muros y contraventeos principalmente) para que la ubicación del centro de torsión coincida lo más posible con el centro de masas, y entonces se puedan disminuir los efectos de torsión (Inga-Solórzano, 2019).

Una estrategia eficaz para reducir la excentricidad estática en edificaciones con irregularidad en planta consiste en ajustar la rigidez lateral de manera que su distribución sea más equilibrada. Para ello, se modifica la rigidez de los marcos estructurales más adecuados, seleccionados en función de la posición del centro de torsión con respecto al centro de masas. Por ejemplo, si el centro de torsión se encuentra desplazado hacia el lado derecho del centro de masas (coordenadas positivas), será necesario incrementar la rigidez en marcos del lado opuesto, es decir, en el lado izquierdo, con el fin de contrarrestar la asimetría y reducir los efectos torsionales. Una pregunta que seguramente surge a partir de la idea antes mencionada es: ¿cuánta rigidez se debe agregar al edificio para que su centro de torsión coincida con su centro de masas?, en base a lo anterior, el objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología basada en el análisis matricial de edificios para obtener de manera practica cuanta rigidez lateral se debe añadir para que la distancia entre el centro de torsión y el centro de masas pueda disminuir considerablemente. En la investigación, una vez encontrada la rigidez lateral, se busca añadirla mediante elementos como los contraventeos ya que han mostrado un buen desempeño sísmico en edificios de varios niveles.

Gracias a esta metodología se podrán obtener diseños de las estructuras irregulares de manera más practica puesto que al saber la rigidez lateral mediante una sola ecuación se podrá elegir qué tipo de contraventeo será más conveniente utilizar. De igual manera, con la obtención de dicha metodología, las estructuras podrán ser analizadas con mayor confianza mediante los métodos de diseño que se proponen en las normas sismorresistentes del país y de otras partes del mundo.

1.4 Hipótesis

Es posible disminuir los efectos de la torsión sísmica, modificando la rigidez lateral de la estructura mediante la adición de elementos de rigidez como los contraventeos, para reducir la excentricidad estática y garantizar un mejor comportamiento de los elementos estructurales.

1.5 Objetivo general

Desarrollar una metodología basada en el análisis estructural matricial, para disminuir la excentricidad estática en edificios irregulares en planta mediante la modificación de la rigidez lateral de la estructura y así aminorar los efectos de la torsión sísmica.

1.6 Objetivos específicos

- Aplicar la metodología desarrollada a casos de estudio representativos de edificios irregulares en planta con geometría en “L” de 1, 5 y 10 niveles, añadiendo contraventeos a los marcos más convenientes de la estructura, para comprobar la eficacia del método.
- Evaluar la torsión presente en edificios irregulares en planta con excentricidad estática, comparando dichos efectos antes y después de la modificación de la rigidez lateral.
- Mejorar la propuesta estructural antes de la construcción de la edificación, al reducir la torsión sísmica y, en consecuencia, la demanda de los esfuerzos en los elementos estructurales, para contribuir a proyectos con un mejor comportamiento estructural.

1.7 Alcances

La metodología desarrollada en este trabajo puede ser aplicada a cualquier edificio que tenga las características similares a las que se consideran en la investigación, es decir que sea un edificio con geometría irregular en planta, a base de marcos de concreto reforzado.

Se realizaron tres casos de estudio con una planta con geometría en “L” y con entrepiso rígido, a base de marcos de concreto. Para cada caso de estudio se elaboraron dos modelos mediante el programa de SAP2000, un modelo sin rigidez adicional y otro con rigidez adicional mediante contraventeos en configuración “V invertida”, para validar la efectividad de la metodología propuesta. No obstante, pueden emplearse otras disposiciones de contraventeos, siempre y cuando proporcionen la misma cantidad de rigidez lateral determinada mediante la metodología desarrollada en este trabajo.

La demanda sísmica que se consideró es para zonas tipo C, las cuales, de acuerdo con las Normas y Especificaciones para estudios, proyectos, construcciones e instalaciones del INIFED, son zonas en donde los eventos sísmicos son más probables y de mayor intensidad.

1.8 Limitaciones

El método que se desarrolla es una herramienta que nos permite disminuir la excentricidad en edificios irregulares en planta y además plantear criterios para saber en qué marcos se debe modificar la rigidez lateral, sin embargo, no puede utilizarse para todos los tipos de irregularidades en las estructuras (irregularidad en elevación, en planta y en rigidez), solo será aplicable para estructuras irregulares en planta y que poseen un entrepiso que funja como diafragma rígido.

Así mismo, en la investigación solo se consideró, para los casos de estudio, una planta con geometría en “L”, pero también se podrían realizar estudios con plantas cuya forma geométrica sea en “U” en “T” o en cualquier otra geometría altamente irregular, para poder verificar con mayor claridad el funcionamiento de la metodología de estudio.

Otra de las limitaciones es que, el presente trabajo sólo considera el uso de contraventeos como medida para alterar la rigidez lateral de los casos de estudio, sin embargo, hay distintos elementos que también se puede utilizar para modificar la rigidez lateral como los contraventeos restringidos al pandeo, los muros de cortante o la modificación de las secciones de columnas, por mencionar algunos elementos.

De manera práctica, se adicionó rigidez lateral mediante contraventeos de perfiles de acero estructural con secciones OR, pero se podrían realizar investigaciones encaminadas a comparar la influencia del tipo de sección del contraventeo para verificar cual sección es la mejor que se puede utilizar.

Para la obtención del espectro de diseño sísmico los datos fueron adquiridos mediante el software PRODISIS, dichos datos ya están precargados en el programa mediante mediciones anteriores, no se realizaron mediciones directas en el sitio.

En el análisis sísmico desarrollado en el proyecto no se consideraron efectos de segundo orden: el análisis realizado en el estudio se limita al rango elástico de la estructura, sin incluir los efectos de segundo orden (no linealidad elástica). Esto es una limitación importante, ya que, durante un sismo severo, las estructuras pueden experimentar deformaciones más allá de su límite elástico, y los resultados obtenidos bajo la suposición de comportamiento elástico podrían no ser precisos para predicciones más realistas de desempeño sísmico.

Estas limitaciones indican que la metodología propuesta es válida solo bajo ciertas condiciones específicas y no abarca la totalidad de los posibles escenarios que un edificio irregular podría enfrentar bajo carga sísmica, por lo que futuros estudios podrían desarrollar modelos en donde se analicen efectos de segundo orden, mediciones directas para el espectro de diseño sísmico o incluso investigaciones donde se consideren otros tipos de irregularidades además de la irregularidad en planta.

Capítulo 2. Antecedentes

De acuerdo con los sismos ocurridos en la última década, en distintas partes del mundo, se ha evidenciado la presencia de patologías en las estructuras, dejando importantes lecciones para la ingeniería estructural, especialmente en lo referente a los efectos negativos de las irregularidades estructurales. Estos eventos han confirmado que condiciones como el “primer piso débil”, plantas alargadas, configuraciones irregulares en planta o en elevación y distribución asimétrica de rigidez y masa son factores determinantes en la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones. En este capítulo, se mencionan algunos de los sismos ocurridos en los últimos 10 años, haciendo énfasis en los daños que recibieron las estructuras irregulares.

En el **sismo de Wenchuan, China (12 de mayo de 2008)**, con una magnitud de 7.9, se reportaron más de 90,000 muertes y la destrucción de más de 216,000 edificios. Muchas de estas pérdidas fueron consecuencia directa de configuraciones estructurales inadecuadas. Las causas principales del colapso de las estructuras incluyeron la presencia de plantas alargadas y primer piso débil. Los edificios que tenían marcos en la planta baja y muros en los niveles superiores mostraron un patrón clásico de colapso progresivo por debilidad en el nivel inferior, debido a la concentración de esfuerzos en las columnas más vulnerables.



Figura 2.1 Daños observados en edificios irregulares (Colunga,2010)

El **sismo de L’Aquila, Italia (6 de abril de 2009)**, de magnitud 6.3, afectó gravemente a la región de Abruzzo y causó 305 muertes. El hotel Duca D’Abruzzi fue un caso emblemático: colapsó completamente debido a una combinación de planta irregular y primer piso débil. Las fotografías documentaron el colapso completo del primer nivel, dejando las plantas superiores derrumbadas sobre los escombros, un claro ejemplo del comportamiento no deseado provocado por la falta de continuidad en rigidez estructural. En general, en L’Aquila se observaron numerosos colapsos en edificios que compartían estas condiciones de vulnerabilidad, confirmando que incluso con normativas modernas, las irregularidades siguen siendo un problema cuando no se abordan correctamente en el diseño.



Figura 2.2 Colapso del hotel Duca D´Abruzzi (Colunga, 2010)

El devastador **sismo de Haití del 12 de enero de 2010**, con magnitud 7.0, causó más de 230,000 muertes y dejó a más de un millón y medio de personas sin hogar. La mayoría de los colapsos fueron consecuencia de edificaciones sin diseño estructural profesional; sin embargo, incluso las estructuras diseñadas con cierta ingeniería presentaron fallas cuando existían irregularidades. Un ejemplo relevante fue el edificio Digicel, una torre de 12 pisos que, pese a estar en construcción con aparente ingeniería, presentó problemas de torsión debido a la disposición asimétrica de muros estructurales (muros en L en tres esquinas, mientras una permanecía sin reforzar). Esta asimetría generó esfuerzos torsionales durante el sismo, causando daños estructurales como desprendimientos de recubrimiento en columnas y pandeo del acero en vigas.



Figura 2.3 Palacio de Gobierno de Haití dañado por planta baja débil (Colunga, 2010)

El **sismo de Maule, ocurrido el 27 de febrero de 2010 en Chile**, fue uno de los más intensos del continente americano en el siglo XXI, con una magnitud $MW=8.8$. Afectó gravemente a regiones de Chile, Argentina y Perú, causando más de 450 muertes y dejando a unas 800 mil personas sin hogar. Aunque se esperaban daños por su magnitud, sorprendió que muchas estructuras diseñadas con normativas sismo-resistentes modernas colapsaran o sufrieran daños severos. La mayoría de estas construcciones presentaban

irregularidades estructurales marcadas, producto del abuso arquitectónico en busca de estética. En ciudades como Santiago, Viña del Mar y Concepción, se observaron numerosos edificios esbeltos, con plantas alargadas y poca redundancia estructural, factores que contribuyeron a su vulnerabilidad. En zonas como la “ciudad empresarial” de Santiago, predominan estos diseños irregulares, tanto en planta como en elevación, lo cual fue determinante en el mal desempeño sísmico de muchos edificios modernos.



Figura 2.4 Colapsos parciales y daños graves en edificios con combinaciones de irregularidades en planta y elevación (Colunga, 2010)

El **sismo de Mexicali, México del 4 de abril de 2010** con magnitud de 7.2 afectó tanto a la ciudad como al Valle de Mexicali. El sismo afectó a varios edificios de la ciudad de Mexicali, algunos de ellos con claras condiciones de irregularidad estructural. Entre ellos los multifamiliares Monte Albán, construidos en los años sesenta, están ubicados en una zona de riesgo sísmico con historial de daños. El conjunto lo conforman ocho edificios de cuatro niveles con planta alargada y marcos de concreto no dúctiles ligados a muros de mampostería. Presentan columnas cortas por muros a media altura en su eje largo y muros rígidos en la dirección corta. Los edificios están conectados por cubos de escaleras de concreto reforzado que acoplan su respuesta sísmica. Aunque no colapsaron, sufrieron daños estructurales severos y desiguales. Algunos pares de edificios, pese a estar cercanos, fueron más afectados que otros. (Colunga, 2010)



Figura 2.5 Condominio Monte Albán en Mexicali (Colunga, 2010)

El sismo ocurrido el **19 de septiembre de 2017 en México** se posicionó como uno de los más destructivos en la historia reciente del país, provocando daños significativos y colapsos en numerosas edificaciones, especialmente en aquellas de baja y mediana altura. Entre los factores que intensificaron los daños se identificaron la torsión provocada por configuraciones en esquina y formas geométricas irregulares, así como el golpeteo entre estructuras y la presencia de plantas bajas débiles. En la Ciudad de México, la mayoría de los inmuebles afectados fueron construidos entre las décadas de 1960 y 1980, destacando particularmente los edificadas en los años 70 por su alta vulnerabilidad. No obstante, también se registraron daños en construcciones posteriores a 1985, lo cual sugiere posibles fallas en el diseño estructural o en la ejecución de obra, a pesar de los avances normativos posteriores al sismo de ese año. (Buendía Sánchez et al., 2019)

El evento sísmico más reciente ha sido el ocurrido en **Tailandia. El 28 de marzo de 2025**, un terremoto de magnitud 7.7 con epicentro en Myanmar ocasionó daños severos en edificios de dicha zona y a sus alrededores, dejando un saldo de más de 1,600 muertos. (Terremoto 7.7 en Myanmar 2025, 2025).

En Bangkok, capital de Tailandia, dos edificios tomaron el interés de muchos investigadores, uno de ellos colapsó totalmente y el otro resistió las fuerzas laterales por sismo dejando una evidencia de como la ingeniería bien aplicada, conforme a la normativa vigente, puede generar buenos resultados.

El primero de ellos, el edificio de 33 niveles para las futuras Oficinas de Auditoría del Estado de Tailandia, que se encontraba en construcción, colapsó totalmente en un instante. Hay muchas teorías que explican las causas que provocaron la alta vulnerabilidad de la construcción, una de ellas es que probablemente el acero de refuerzo y el concreto utilizado era de mala calidad, también se cree que como el edificio estaba en construcción no contaba aún con la rigidez necesaria para resistir las fuerzas sísmicas. A todas las causas anteriores se adiciona la baja capacidad de carga del suelo en el lugar, pues es un suelo arcilloso, y cuando las ondas sísmicas llegan a este tipo de suelos se amplifican debido al fenómeno de la licuefacción. Es decir, el fenómeno de la licuefacción ocurre cuando las vibraciones sísmicas elevan la presión del agua en los poros de suelos granulares no cohesivos, saturados y con drenaje limitado. Esto reduce la tensión efectiva y la resistencia al corte, haciendo que el suelo pierda rigidez y se comporte temporalmente como un líquido.

El segundo, el Intercontinental Bangkok Sucumbi, un hotel de lujo, permaneció intacto después del sismo ocurrido. La diferencia con el edificio de las Oficinas de Auditoría, es que el Hotel está diseñado para oscilar, posiblemente en la cimentación se utilizaron osciladores sísmicos capaces de disipar la energía sísmica permitiendo que la estructura presente movimientos menos bruscos y solo se desplace lateralmente, en su base. Otro patrón ampliamente observado fue el colapso por piso suave, tanto en edificaciones históricas como en modernas. En Haití, múltiples estructuras de mampostería con muros en los pisos superiores y columnas desnudas en planta baja colapsaron de forma catastrófica. La combinación de materiales de baja calidad, mala conexión entre elementos estructurales y configuración irregular agravó los efectos destructivos del sismo.

Capítulo 3. Estado del arte

De acuerdo con los sismos referenciados en el capítulo anterior, se ha observado que la vulnerabilidad de las estructuras irregulares se debe a que las irregularidades que presenta pueden causar una distribución desigual de las fuerzas sísmicas a lo largo del edificio, en consecuencia, la edificación tiende a girar alrededor de su centro de su eje vertical.

En estudios pasados se han realizado diversos procedimientos para analizar el problema de la torsión sísmica en los edificios irregulares ante eventos sísmicos, de estos estudios se han obtenido resultados de gran interés que nos ayudan a comprender la complejidad del problema de la torsión sísmica, a continuación, se describen algunos trabajos en el contexto internacional, nacional y local, de los últimos 7 años el que se estudian irregularidades en planta.

Comenzando por el contexto internacional, en una investigación realizada en la India por [Subodh, et al., \(2017\)](#) se diseñaron dos modelos, denominados "G+20" y "G+22" con geometría en L y en T cada uno, en donde obtuvieron diversas propiedades de las estructuras como su peso, periodo de vibrar, desplazamientos, momento torsional y cortante basal mediante un análisis sísmico según el código IS1893, con la ayuda del programa STADD-Pro V8i. En las conclusiones obtenidas resaltan que: el cortante basal aumenta un 9.54% al aumentar la altura del edificio en forma de L, el momento torsional disminuye un 37% con alivio arquitectónico en el edificio en forma de L, el aumento en la altura incrementa los desplazamientos y esfuerzos en las esquinas reentrantes.

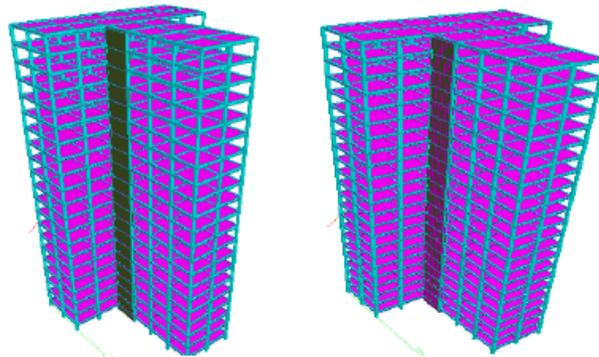


Figura 3.1 Modelos con geometría en "T" con muros de corte (Subodh, et al.,2017).

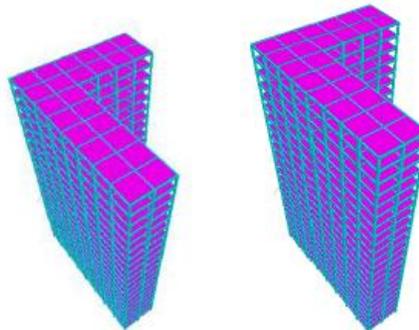


Figura 3.2 Modelos con geometría en "L" (Subodh, et al.,2017).

La revisión de la literatura revela que las estructuras irregulares requieren un análisis estructural más detallado para lograr un sistema sísmico adecuado. Debido a esto, incluso errores menores derivados de simplificaciones incorrectas en dichos análisis pueden causar daños significativos durante los terremotos, generando condiciones de vulnerabilidad que no siempre se cuantifican de manera precisa utilizando ciertos métodos simplificados.

Otro estudio realizado por **Siroya y Patel (2021)** consistió en el análisis de irregularidades de masa y rigidez, mediante la realización de edificios de 12 pisos con diferentes formas (T, L, regular) ubicados en la zona de terremotos (IV) en la India. El método de análisis que utilizaron fue el de análisis de espectro de respuesta, evaluaron como la ubicación de los muros de corte en planta afecta la respuesta sísmica de las estructuras. En los resultados compararon periodos naturales de vibrar, cortante basal, desplazamientos en los entrepisos y distorsiones. Las conclusiones fueron las siguientes: los modelos con mayor periodo natural mostraron menor resistencia sísmica, los edificios asimétricos (como el modelo en forma de L) tuvieron mayores distorsiones. En las conclusiones mostradas, es evidente que los edificios irregulares, los cuales no presentaban una coincidencia de su centro de masas con su centro de torsión o rigidez, tienen una mayor vulnerabilidad a los efectos de torsión sísmica.

Mohamed-Sherif et al. (2019) evaluaron la frecuencia de estructuras irregulares utilizando el método de la fuerza estática equivalente aplicado a edificios de una sola planta, de acuerdo con los resultados, mostraron que los edificios con $\Omega(\text{frecuencia}) > 1.0$ son rígidos torsionalmente y los desplazamientos no son sensibles al aumento de la excentricidad. Los edificios con $\Omega < 1.0$ son flexibles torsionalmente y los desplazamientos son sensibles al incremento en la excentricidad. En este estudio se puede notar que diversas propiedades de la estructura como la frecuencia y la rigidez están directamente relacionadas con la configuración geométrica en su planta y de la distribución de sus elementos estructurales.

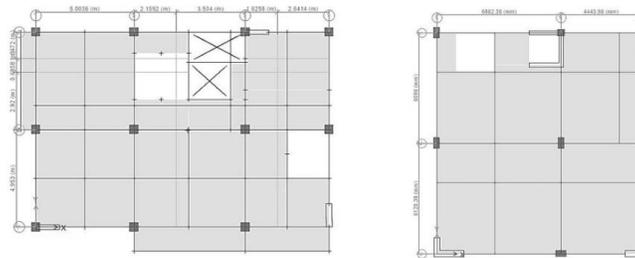


Figura 3.3 Modelos A y B con muros de corte (Mohamed-Sherif et al., 2019).

En Grecia, de igual manera se han realizado estudios en edificios irregulares proponiendo diversas estrategias para mitigar los efectos de torsión sísmica. **Georgoussis y Mamou (2018)**. El estudio consistió en evaluar la respuesta torsional de edificios asimétricos con varios pisos cuando todas las masas del piso se concentran en un solo punto. Como objeto de estudio se realizaron edificios de 9 pisos, con sistemas de resistencia lateral mixtos (marcos, muros, sistemas acoplados) y variaciones en la distribución de excentricidades accidentales. Para el análisis utilizaron un método de matrices de rigidez, un análisis paramétrico y la comparación con software estructural (SAP2000-V16). Con el desarrollo del trabajo se propuso una ecuación para evaluar la ubicación del elemento clave que minimiza la torsión. En base a los resultados, se demostró que la respuesta torsional puede

ser reducida ajustando la posición de ciertos elementos estructurales. El procedimiento tiene precisión razonable y puede usarse con confianza en aplicaciones estructurales

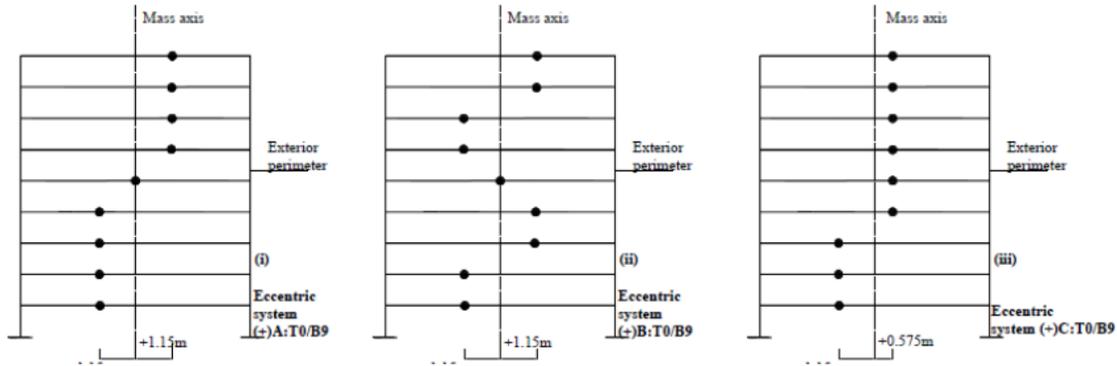


Figura 3.4 Modelos analizados (Georgoussis y Mamou,2018).

Otro estudio de gran importancia es el desarrollado por [Dhakal y Srestha \(2022\)](#). Algo valioso que se comenta en dicho estudio es que algunos edificios pueden parecer regulares y simétricos en planta, pero debido a diversas funciones que debe ofrecer se pueden presentar aberturas, escaleras, ascensores y sistemas de calefacción, los cuales conducen a la irregularidad en la planta. En base a la iniciativa por evitar la torsión sísmica en las estructuras, en esta investigación se propone el uso de muros de corte, posicionándolos de manera adecuada, para contrarrestar la torsión en los edificios. El objeto de estudio fueron dos edificios de seis plantas analizados en el rango lineal: primero se estudiaron con aberturas para ascensores y sistemas HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado), y después con muros de cortante en el borde de cada edificio. Los resultados obtenidos confirmaron que el muro de cortante en la posición adecuada ayuda a rigidizar el edificio en la dirección más débil, desacoplando la torsión y reduciendo la influencia de la translación, es decir, ayuda a regular la distribución de masa y rigidez. Una desventaja de este sistema de solución es que al agregar muchos muros de corte la estructura de vuelve más pesada y por lo tanto los elementos estructurales en la cimentación deben ser más robustos traduciéndose en una mayor inversión económica.

En otro estudio realizado en Egipto, se evaluó el desempeño de edificios irregulares para lo cual se realizaron modelos de edificios de 12 pisos con formas de planta "+", "H", "T", "L", "⊥", y "U", cargados por gravedad, con dimensiones constantes de componentes estructurales y distribución uniforme de masa. Dichos modelos fueron analizados mediante un análisis histórico del tiempo con una aceleración máxima del suelo de 0.25g utilizando el programa de SAP2000. Los resultados obtenidos revelan que las formas de planta T, L y U muestran efectos de torsión significativos y un aumento en la cortante basal. Los edificios con formas irregulares en planta tienen desplazamientos mayores en el piso superior en comparación con los edificios de planta regular ([Ahmed-Abd-el-rahim y Hamdy H. A., 2010](#)).

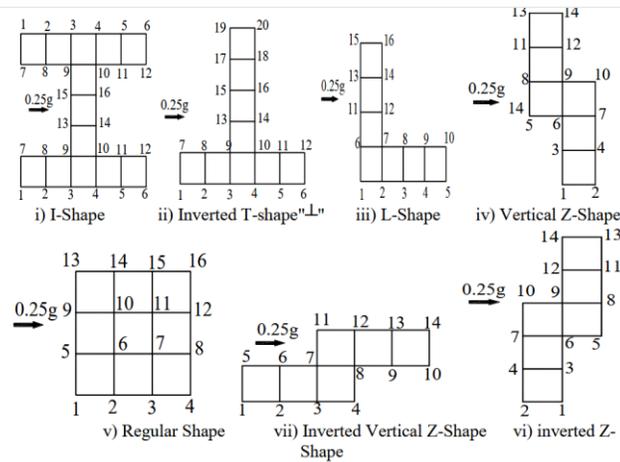


Figura 3.5 Modelos analizados (Hamdy H. A. y Ahmed-Abd-el-rahim, 2010).

Lyublinskiy (2024) realizó un modelo estructural de 20 pisos, de 3m cada uno, en donde buscó a través de los elementos estructurales de carga, columnas, generar una excentricidad para evaluar sus efectos ante cargas sísmicas. El método utilizado fue el método de elementos finitos en el software LIRA. De acuerdo con las conclusiones, la torsión aumenta con la excentricidad y afecta los momentos de torsión y el ángulo de rotación; de igual manera las estructuras no lineales muestran menor torsión comparado con las lineales. Este estudio fue desarrollado en Rusia,

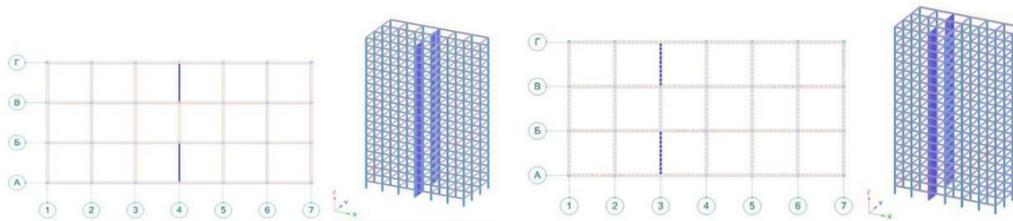


Figura 3.6 Posición del marco en el modelo con disposición asimétrica (Lyublinskiy ,2024).

En el contexto nacional, de manera similar que, en el contexto internacional, en los últimos años se han realizados varios aportes significativos al estudio de la torsión sísmica, evaluando diversos edificios con diversas metodologías.

Pérez Peña y Doz (2018), en su proyecto de investigación, presentan como influyen las irregularidades en planta en la resistencia sísmica de una estructura de ocho pisos, con pórticos de concreto armado. Para el análisis se realizaron 10 modelos, 4 para la irregularidad “Recortes o Retrocesos en las esquinas”, 2 para la irregularidad “Discontinuidades en el diafragma” y 4 para la combinación de ambas, todos se realizaron utilizando los softwares ETABS Nonlinear v9.7.2 y MATLAB R2009b. Los resultados demostraron que las irregularidades afectan la capacidad de la estructura para resistir cargas laterales, provocando la formación de mecanismos plásticos y aumentando la vulnerabilidad sísmica. Es necesario reforzar las zonas con columnas que presentaron rótulas plásticas, ya que no se cumple el principio de columna fuerte – viga débil.

Gómez-Soberón y González-Herrera (2008), en una investigación desarrollada en la Ciudad de México, compararon parámetros como el porcentaje de desempeño sísmico en base a una estructura regular, mediante 6 casos de estudio, cada uno con una particular geometría en planta. Dicha comparación fue útil para determinar qué tipo de geometría irregular en planta era la más crítica. Según los resultados del estudio, las formas T y U generan mayores demandas sísmicas, incrementando la inestabilidad en comparación con los sistemas regulares.

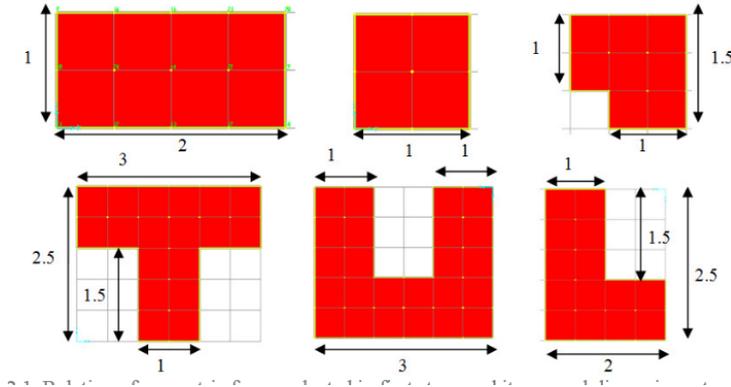


Figura 3.7 Geometrías en planta analizadas (Gómez-Soberón y González-Herrera,2008).

En cuanto al alcance actual de normativa sismorresistente, Rodríguez (2023) llevó a cabo un estudio en donde se realizó una revisión bibliográfica de los efectos que generaron sismos recientes en las estructuras, en todo el país. Algunos sismos contemplados en el estudio fueron: terremoto de Maule, en Concepción, Chile, 27 febrero 2010; terremotos en Christchurch, Nueva Zelanda, en 2010 y 2011; terremoto del 19 de septiembre 2017 en la Ciudad de México. Los daños estructurales de dichos sismos reflejan que las demandas establecidas en las normativas existentes fueron rebasadas, ya que presentaron fuertes fallas en las columnas y desplazamientos considerables de entrepisos. Como conclusión, se indica que se requiere de estructuras con mayor capacidad de deformación y no se recomienda el uso de factores de comportamiento sísmico bajos en zonas de alta sismicidad. Debido a la incertidumbre de los valores establecidos para el análisis sísmico, sobre todo de estructuras irregulares, es de gran preocupación que se pueda disminuir la irregularidad en las estructuras y así poder realizar un análisis sísmico más fácil.

Otro estudio desarrollado por Picazo-Gama (2018) se buscó obtener factores correctivos por irregularidad para el diseño de edificios asimétricos, el objetivo era lograr niveles de confiabilidad sísmica similares a los de una estructura de varios niveles con planta simétrica, para ello el autor realizó sistemas de seis y doce niveles de altura los cuales fueron sometidos a un análisis no lineal de respuesta sísmica y simulaciones de funciones de confiabilidad mediante el análisis de Empuje Lateral Seudo Estático (ELSE). Finalmente se proponen factores correctivos para lograr niveles de confiabilidad sísmica en edificios asimétricos equivalentes a los de edificios simétricos. Es importante considerar la carga axial en columnas en futuros estudios.

Según investigaciones anteriores, una manera practica de disminuir la torsión sísmica en estructuras irregulares en geometría, es añadir rigidez lateral a la estructura mediante el uso de contraventeos. Algunos estudios realizados hacen evidente como el uso de

contraventeos es beneficioso para disminuir la torsión sísmica en edificios irregulares, especialmente en edificios irregulares en planta, los cuales se describen a continuación. Posteriormente se explican cuáles son las mejores configuraciones de contraventeos para el desempeño sísmico en las estructuras según investigaciones que ya se han desarrollado.

Bojorquez, et al., (2024) realizaron un estudio el cual se enfoca en la optimización de diferentes sistemas estructurales en edificios de acero de gran altura, en la ciudad de Acapulco Guerrero, región de alta actividad sísmica. Se evaluaron diferentes parámetros de un modelo analizado por el método modal espectral, en donde se compararon diversos datos como la distorsión máxima de entrepiso, el cortante basal, los desplazamientos y el peso total de las estructuras. Los resultados indicaron que los contraventeos son una opción favorable para reducir los efectos de torsión en las estructuras.

De manera similar, en otro estudio se evaluó el comportamiento de un edificio de concreto reforzado en forma de L con y sin arriostramientos de acero (contraventeos) en diferentes posiciones de los marcos. Se usó un análisis de espectro de respuesta con ayuda del software ETABs. Se estudiaron dos casos para comprender el efecto de los contraventeos tipo V invertida con un total de 12 modelos, Los parámetros a evaluar fueron los desplazamientos, esfuerzos de cortante de la base, el periodo fundamental de vibrar, la relación de irregularidad torsional y la relación de la capacidad de las columnas.

De acuerdo con los resultados obtenidos se fundamenta lo siguiente: el período de tiempo fundamental de las estructuras disminuyó cuando el arriostramiento de acero utilizado en los edificios en forma de L es efectivo. La provisión de arriostramientos de acero en los edificios de hormigón armado en forma de L redujo los desplazamientos máximos en los edificios. Se observan reducciones de casi el 50% en los desplazamientos máximos en comparación con el modelo L1. Los arriostramientos de acero en los edificios en forma de L aumentan la rigidez del piso de las estructuras de manera efectiva. Se observa que las distorsiones de entrepiso máximas de las estructuras están por debajo del límite permisible (Bohara, et al., 2021).

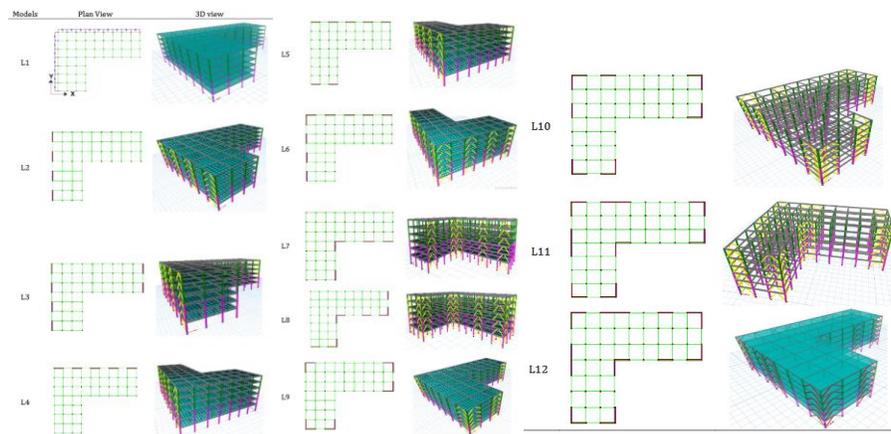


Figura 3.8 Modelos analizados (Bohara, et al., 2021).

Otro estudio desarrollado por Ñauta Ayala y Vélez Lliguisupa (2024) se compararon los beneficios estructurales, beneficios de tiempo y costo mediante tres soluciones para disminuir los efectos de torsión en edificios irregulares: juntas sísmicas, muros de corte y

contraventeos. En el estudio se verificaron los periodos de vibrar, las distorsiones de cada entrepiso, así como los costos de construcción y el tiempo estimado de duración.

En cuanto al uso de contraventeos o riostras, se probaron configuraciones de riostras excéntricas en X. Estas riostras están diseñadas para resistir esfuerzos axiales de tracción y compresión, absorbiendo energía sísmica y brindando estabilidad a la estructura. Sin embargo, su aportación a la rigidez global fue menor en comparación con los muros de corte, aunque ayudaron a acercar el centro de rigidez al centro de masa.

Se desarrollaron dos modelos estructurales: uno con muros de corte y otro con riostras. En el modelo con riostras, los primeros dos modos de vibración fueron traslacionales, con solo un 1.51% y un 0.94% de torsión en el primer y segundo modo, respectivamente. Esto mejoró la distribución de cargas a lo largo de la estructura, reduciendo puntos de tensión y aumentando la resistencia global de la estructura en comparación con el modelo sin riostras.

Los resultados obtenidos indicaron que, en términos de distorsiones o derivas de entrepiso, el modelo con muros de corte superó al modelo con riostras, logrando una reducción más significativa en los desplazamientos laterales. Las riostras, aunque aportaron a la rigidez lateral, resultaron menos efectivas en comparación con los muros de corte en la reducción de derivas. Sin embargo, los contraventeos presentan una mejor opción ya que son más fáciles de acoplar a los diseños arquitectónicos, debido a que ocupan menor espacio y dan mayor libertad para la disposición de ventanas, puertas y espacio abiertos, y son menos pesados lo que disminuye la demanda en la cimentación de la estructura.



Figura 3.9 Objeto de estudio (Ñauta-Ayala y Vélez Lliguisupa, 2024).

De igual manera, un caso de estudio que se relaciona con este proyecto de investigación es el realizado por Arias-Lizárraga (2023), en la ciudad de Acapulco Guerrero se evaluó el comportamiento sísmico de una estructura fuertemente irregular ubicada en una zona de alta sismicidad, considerando muros de corte o contraventeos de acero para minimizar los efectos de irregularidad. En dicho estudio se hicieron más de 20 modelos estructurales, llevando a cabo un análisis modal espectral con ayuda del software ETABS y considerando cargas y combinaciones de acuerdo a las NTC 2017. Se compararon diferentes parámetros en los modelos como la distorsión máxima de entrepiso, cortante basal y desplazamientos.

Los resultados demostraron que es más factible el uso de elementos de acero para optimizar el comportamiento sísmico y económico del edificio en zonas de alta sismicidad.

De acuerdo con las investigaciones anteriormente mencionadas, gracias a los avances tecnológicos, cada vez más se desarrollan mecanismos de gran utilidad para lograr estructuras más sismo resistentes, es evidente que aun hace falta gran investigación por realizar en el área de la sismicidad considerando que nuestro país y en especial la Ciudad de México es muy susceptible a eventos sísmicos de gran magnitud.

Capítulo 4. Marco conceptual y teórico

Con el fin de implementar la metodología desarrollada en este trabajo, es necesario contar con un conocimiento sólido del marco teórico y conceptual relacionado con la torsión sísmica en estructuras irregulares, ya que dicho conocimiento constituye la base para el desarrollo del estudio. En este capítulo se exponen los conceptos fundamentales vinculados al fenómeno de torsión, así como el contexto normativo que regula el análisis sísmico, incluyendo tanto la normativa mexicana vigente como la de otros países.

4.1 Marco conceptual

Rigidez de una estructura

La rigidez es la capacidad de los elementos estructurales para resistir las deformaciones, es decir, su habilidad para soportar cargas sin experimentar desplazamientos o deformaciones excesivas. Esta propiedad depende del módulo de elasticidad del material, del momento de inercia y de la longitud del elemento. (Salazar-Moreno, 2020)

En este sentido, rigidez lateral de los elementos es la capacidad para soportar cargas laterales sin presentar desplazamiento o deformaciones considerables. En el presente trabajo la rigidez lateral se atribuye principalmente a los elementos verticales como las columnas o contraventeos.

La rigidez estructural se refiere a la capacidad de un miembro, conexión o estructura para resistir deformaciones, y generalmente se expresa como la relación entre una fuerza (o momento) y el desplazamiento (o rotación) resultante. En el diseño sismorresistente, la rigidez lateral, que está relacionada con los desplazamientos de los pisos, es de particular importancia. (Crisafulli, 2018).

Diafragma rígido

Un diafragma rígido es un sistema de piso (como una losa) que se considera infinitamente rígido en su plano, es decir, **no se deforma significativamente ante cargas laterales**, por lo que puede transmitir estas cargas de manera eficiente y uniforme a los elementos verticales de soporte del edificio (como columnas o muros). Esta condición permite suponer que todos los puntos del nivel se mueven solidariamente como un cuerpo rígido, lo que simplifica considerablemente el análisis estructural al reducir los grados de libertad a solo tres por nivel: dos desplazamientos horizontales (en los ejes X y Y) y una rotación alrededor del eje vertical (φ). (Delgado-Anguiano y Ledesma-Rivera, 2016)

Matriz de rigidez global

La **matriz de rigidez global** o **matriz de rigidez general** es una matriz que reúne la rigidez lateral de todos los marcos y elementos estructurales del edificio, considerando sus contribuciones en función de tres grados de libertad por nivel: dos traslaciones (en los ejes X y Y) y una rotación alrededor del eje vertical (φ). (Delgado-Anguiano y Ledesma-Rivera, 2016)

Se expresa en la forma matricial:

$$\{F\} = [K_G]\{d\}$$

Donde:

$\{F\}$ = vector de fuerzas sísmicas aplicadas en cada nivel (componentes F_x , F_y y M_z)

$\{d\}$ = vector de desplazamientos correspondientes (U_x , V_y y φ)

$[K_G]$ = matriz de rigidez global que relaciona ambas magnitudes

La matriz de rigidez global se compone de 9 submatrices que relacionan las fuerzas y desplazamientos en las distintas direcciones de la estructura

$$\begin{bmatrix} [K_{xx}] & [K_{xy}] & [K_{x\theta}] \\ [K_{yx}] & [K_{yy}] & [K_{y\theta}] \\ [K_{\theta x}] & [K_{\theta y}] & [K_{\theta\theta}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{u\} \\ \{v\} \\ \{\theta\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{F_x\} \\ \{F_y\} \\ \{M_z\} \end{bmatrix}$$

Por ejemplo:

$[K_{xx}]$ = relación entre desplazamientos en X y fuerzas en X

$[K_{x\theta}]$ = relación entre rotaciones del nivel y fuerzas en X

Estas submatrices se componen a partir de las contribuciones de cada marco estructural en función de su orientación y distancia respecto al centro de masa del nivel.

Torsión sísmica

La torsión sísmica es un fenómeno que ocurre en las estructuras cuando hay una discrepancia entre el centro de masa y el centro de rigidez. Esta irregularidad puede deberse a la geometría de la construcción o a la distribución desigual de la masa o la rigidez en el edificio. Durante un sismo, las fuerzas horizontales actúan sobre el centro de masas, pero la resistencia de la estructura se organiza alrededor del centro de rigidez o torsión, que no siempre coincide con el primero.

Cuando estas fuerzas actúan, se produce una rotación de la estructura alrededor del centro de torsión debido a esta diferencia de ubicación. Este giro o rotación genera esfuerzos cortantes, que son fuerzas internas que intentan deformar los elementos estructurales. Cuanto mayor es la distancia entre el centro de masa y el centro de torsión o de rigidez (denominada brazo de torsión), más grande es la fuerza torsional generada y, por lo tanto, mayor es la demanda de esfuerzo cortante en los elementos estructurales que se encuentran más alejados del centro de rigidez.

Esta torsión puede ser particularmente peligrosa para la estabilidad del edificio, ya que puede sobrecargar ciertos elementos estructurales y hacer que fallen, comprometiendo la seguridad de la estructura durante un sismo. (Ñauta-Ayala y Vélez-Lliguisupa, 2024).

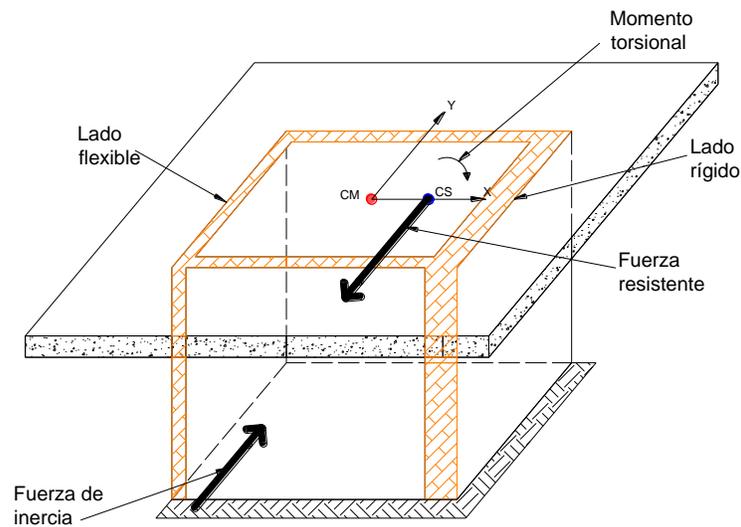


Figura 4.1.1 Torsión sísmica (elaboración propia)

Centro de masas (CM)

En términos simples, el centro de masas es el promedio ponderado de todas las posiciones de los elementos de un sistema. En un edificio, cada componente estructural (muros, columnas, losas, etc.) tiene una masa y una ubicación específicas, y el CM es la posición donde se equilibra la distribución total de estas masas (Botis y Cerbu, 2020). En otras palabras, es un punto geométrico dinámico en el cual se aplica la resultante de las fuerzas laterales a la estructura, su ubicación depende de la distribución de masas y de la geometría en planta (Ñauta-Ayala y Vélez-Lliguisupa, 2024).

En un edificio, el punto donde se concentra la masa de cada piso es el centro de masas de ese nivel. Este punto representa la ubicación en la que se puede asumir que la masa total del piso está concentrada para simplificar los cálculos de análisis estructural.

El CM de un edificio es crucial para el diseño sísmico. Si el centro de masas no está alineado con el centro de rigidez (el punto donde las fuerzas resistentes al movimiento están equilibradas), pueden generarse torsiones o giros en la estructura durante un sismo, lo que aumenta la probabilidad de daños estructurales.

Centro de torsión

En el contexto del análisis sísmico, es el punto geométrico en cada nivel donde debe aplicarse la fuerza sísmica para que el movimiento sea únicamente de traslación. En otras palabras, es el punto donde se concentra la resultante de las resistencias a cortante de los elementos del entrepiso (Delgado-Anguiano y Ledesma-Rivera, 2016).

Esta definición es válida bajo la suposición de que el comportamiento del nivel es completamente rígido en su plano, lo que significa que las deformaciones del mismo dentro de su plano son despreciables. Esto suele modelarse como si el piso fuera infinitamente rígido, es decir, como si no hubiera flexibilidad dentro del propio plano del piso. Este tipo de modelación es común en análisis estructurales cuando se considera que las deformaciones en sí no afectan de manera significativa la respuesta global de la estructura (Botis y Cerbu, 2020).

Excentricidad estática, e_s

Se define como la distancia entre el centro de torsión (CT) y al punto donde pasa la fuerza cortante sísmica en el entrepiso, que generalmente se asocia al centro de masas (CM) (Delgado-Anguiano y Ledesma-Rivera, 2016). Para cada dirección de análisis se tendrá una excentricidad, es decir:

$$e_{sx} = X_{CM} - X_{CT} \quad \text{Ecuación 4.1.1}$$

$$e_{sy} = Y_{CM} - Y_{CT} \quad \text{Ecuación 4.1.2}$$

Excentricidad accidental

Es aquella que se establece en las normas de diseño sismorresistente la cual trata de considerar efectos dinámicos y otro tipo de incertidumbres como la no precisión en los procesos constructivos. Se considera debido a la incertidumbre en la localización de los centros de masas de cada nivel, la cual se obtiene según la normativa de diseño sismorresistente que se esté empleando, en la sección correspondiente a las NTC-Sismo se menciona como obtener este tipo de excentricidad. (Inga Solórzano, 2019)

Sistema y tipos de contraventeos

Un sistema de contraventeos es aquel que complementa las bondades del sistema de marcos, adicionando un refuerzo lateral mediante elementos diagonales que, en conjunto a columnas y vigas, tienden a comportarse como si fuesen una armadura. Son elementos tipo barra que generalmente trabajan de manera axial, ya sea en tensión o compresión. Estos componentes estructurales se ubican de manera diagonal dentro de las retículas, y su función principal es disipar energía. (Arias-Lizárraga, 2023).

Un contraventeo es un elemento estructural que se usa para aumentar la rigidez lateral de un edificio. Se conforma de un elemento estructural con configuración diagonal que se coloca dentro de un marco rectangular. La configuración de estos elementos puede ser en varias maneras, en forma de cruz, en V, en V invertida (Chevrón) y otras. (Del Rincón- De la Mora, 2017).

Los contraventeos proporcionan rigidez lateral además de estabilidad y son muy útiles para edificios de gran altura, sin embargo, sus propiedades son exclusiva de estructuras de acero, debido a que los contraventeos de acero pueden resistir grandes cantidades de fuerza a tensión.

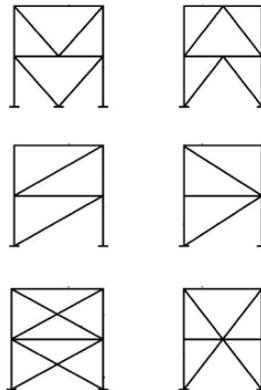


Figura 4.1.2 Configuraciones de contraventeos (Del Rincón de la Macorra, 2017)

Los marcos con contraventeos se clasifican principalmente en dos grupos:

Marcos con contraventeos concéntricos: cuando el eje del contraventeo intercepta con el eje de la trabe y la columna

- Marcos con contraventeos excéntricos: cuando el del contraventeo intercepta en diferentes puntos del eje de la trabe (Tapia-Hernández, s.f.).

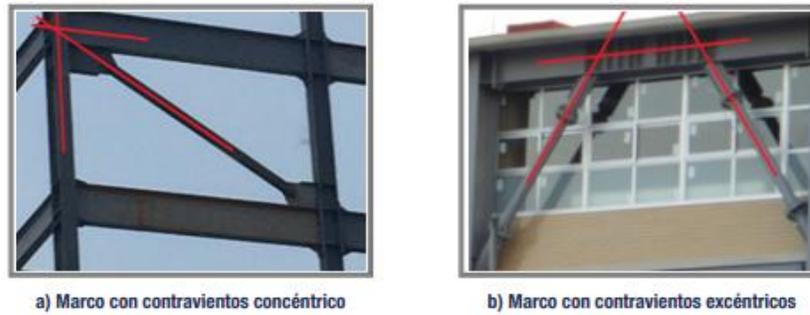


Figura 4.1.3 Configuraciones de marcos con contravientos (Tapia-Hernández, s.f.)

Principalmente se prefiere que los contravientos tengan aproximadamente la misma capacidad a tensión (P_y) o por pandeo global en compresión (R_c), en ambos ejes principales, por lo que en la práctica es más común que se utilicen contravientos de sección en cajón. En la figura 6 se observan algunos tipos de sección transversal que se pueden usar en los contravientos.



Figura 4.1.4 Secciones transversales de contravientos (Tapia-Hernández, s.f.)

SAP2000

El SAP2000 es un software que integra una interfaz gráfica en 3D diseñada para llevar a cabo de manera completa el modelado, análisis y diseño de estructuras. Ofrece una variedad de plantillas que permiten modelar diferentes tipos de estructuras, como vigas simples, armaduras 3D, marcos 3D, tanques de almacenamiento, escaleras, presas y tuberías.

El software genera y aplica automáticamente cargas sísmicas y de viento basadas en diversos códigos normativos tanto nacionales como internacionales. Además, cuenta con un avanzado generador de cargas móviles que permite a los usuarios aplicar cargas en movimiento. Entre las cargas que se pueden simular en el programa se incluyen: sísmicas, de viento, cargas móviles, cargas vivas, fuerzas o momentos, desplazamientos, temperatura y presión de poros.

El análisis estático lineal en SAP2000 resuelve un sistema de ecuaciones, y algunos tipos de patrones de carga son escalonados, lo que significa que representan múltiples patrones espaciales de carga aplicados de manera secuencial. (Delgado-Anguiano y Ledesma-Rivera, 2016).

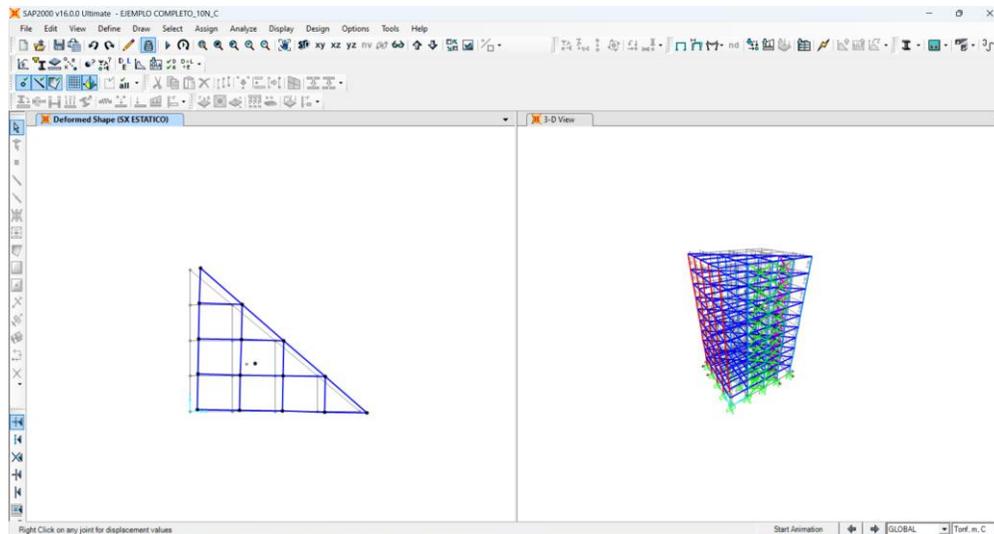


Figura 4.1.5 Interfaz de SAP2000 (elaboración propia)

PRODISIS

Es un programa utilizado para la obtención de espectros de respuesta para la república mexicana. El sistema PRODISIS (Programa de Diseño Sísmico) fue creado como una herramienta para facilitar la implementación de las nuevas recomendaciones de diseño sísmico actualizadas en el Capítulo de Diseño por Sismo del Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE (CDS-MDOC 2015). Inicialmente, se desarrolló para calcular la aceleración en el nivel del terreno rocoso, considerando que esta varía a lo largo del país, y para la construcción de espectros de diseño. No obstante, también incluye módulos que permiten aplicar diversos criterios del Manual de Diseño de Obras Civiles, Capítulo Diseño por Sismo 2015.

PRODISIS incorpora módulos adicionales para ajustar el espectro de diseño, teniendo en cuenta:

- Efectos de sitio.
- Interacción entre el suelo y la estructura.
- Factores de sobrerresistencia.
- Ductilidad.
- Irregularidades y redundancia estructural.

Asimismo, el sistema permite calcular la distribución de fuerzas mediante el método simplificado y el método estático para edificios, y recientemente ha incorporado parámetros de licuación y la generación de acelerogramas. Esto ha permitido clasificar las zonas en función de su riesgo sísmico, considerando la sismicidad propia de cada región (Pérez Rocha, 2023).

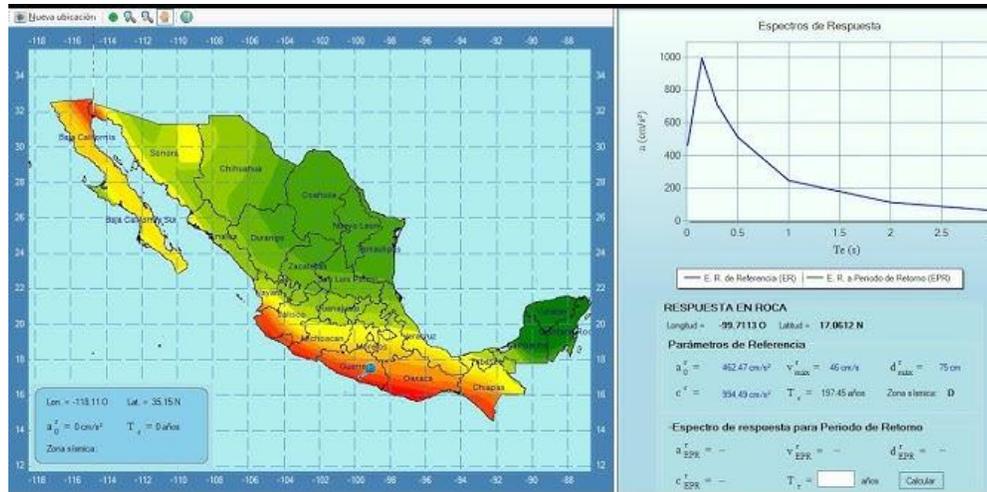


Figura 4.1.6 Interfaz de PRODISIS (elaboración propia)

4.2 Normativa mexicana vigente para el análisis sísmico de estructuras

A lo largo del tiempo, las normativas para el diseño de edificaciones bajo condiciones accidentales han evolucionado conforme los avances en la investigación han permitido entender mejor el comportamiento estructural ante eventos sísmicos. En general, los reglamentos buscan garantizar que las edificaciones cuenten con la resistencia, rigidez, capacidad de disipación de energía y deformación en el rango inelástico necesarias para minimizar daños tanto en la estructura como en sus componentes no estructurales durante un sismo.

Estos reglamentos tienen un carácter legal y su propósito principal es salvaguardar a la sociedad frente al colapso o mal desempeño estructural de las edificaciones. Aunque no se puede garantizar una protección total, los lineamientos deben ofrecer un nivel de seguridad adecuado, equilibrando el riesgo de fallos con el costo de incrementar dicha seguridad.

A raíz de los sismos ocurridos recientemente en la ciudad de México y los daños significativos que causaron, especialmente en edificaciones ubicadas en zonas de alta sismicidad, se produjo un cambio importante en la normativa sísmica. Actualmente, el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF) y sus Normas Técnicas Complementarias 2023 (NTC) son la base para el diseño estructural en gran parte del país.

4.2.1 Clasificación de las estructuras según el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal.

Para efectos del reglamento, las construcciones se dividen en los siguientes grupos:

Grupo A: Edificaciones cuya falla estructural podría ocasionar un gran número de muertes, representar un peligro por contener sustancias tóxicas o explosivas, o ser esenciales en caso de emergencia. Se subdividen en:

- **Subgrupo A1:** Construcciones que requieren mayores niveles de seguridad, como hospitales, aeropuertos, estaciones de transporte, instalaciones militares, centros de emergencias, subestaciones eléctricas, estaciones de radio, antenas, estaciones de bomberos, sistemas de agua potable, puentes, y aquellas que alojan equipos esenciales. También incluye construcciones con sustancias peligrosas que podrían poner en riesgo a la población.
- **Subgrupo A2:** Estructuras cuya falla tendría un impacto social significativo, como estadios o templos que alojen a más de 1000 personas, escuelas con población vulnerable (preescolar, primaria y secundaria), o construcciones que contengan bienes históricos o culturales importantes, como museos y archivos.

Las edificaciones del Grupo A se dividen según características específicas:

- **Caso 1:** Edificios entre 30 y 70 m de altura o con un área entre 6,000 y 15,000 m² en zonas I y II.
- **Caso 2:** Construcciones de más de 70 m de altura o con más de 15,000 m² en zonas I y II.
- **Caso 3:** Edificaciones de más de 15 m de altura o con más de 3,000 m² en zona III.

Grupo B: Edificaciones comunes destinadas a vivienda, oficinas, comercios, hoteles y construcciones industriales no incluidas en el Grupo A. Se subdividen en:

- **Subgrupo B1:** Incluye edificios de más de 30 m de altura o con más de 6,000 m² en zonas I y II, o más de 15 m de altura o 3,000 m² en zona III. También incluye construcciones anexas a hospitales, aeropuertos o instituciones educativas.
- **Subgrupo B2:** Edificios de entre 15 y 30 m de altura o con un área entre 3,000 y 6,000 m² en zonas I y II, o construcciones de entre 10 y 15 m de altura o entre 1,500 y 3,000 m² en zona III.

4.2.2 Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones

Estas normas tienen los siguientes objetivos:

1. Definir las acciones que pueden obrar sobre las construcciones, así como sus posibles efectos sobre ellas y la forma de tomarlos en cuenta para fines de diseño estructural.
2. Establecer las condiciones de seguridad y de servicio que deberán revisarse al realizar el diseño estructural de una construcción, así como los criterios de aceptación relativos a cada una de dichas condiciones, de manera de satisfacer lo estipulado en el Reglamento.

3. Establecer las combinaciones de acciones que deberán suponerse aplicadas simultáneamente para revisar cada una de las condiciones de seguridad y servicio establecidas de acuerdo con lo que se menciona en el inciso anterior.

Para efectos del trabajo a desarrollar es de interés mencionar las acciones de diseño, el análisis de cargas y los factores de cargas en el análisis de edificaciones, el apartado referente al diseño estructural no se menciona.

Acciones de diseño

Se consideran tres categorías de acciones de acuerdo a su duración e intensidad máxima

- *Las acciones permanentes* son las que obran en forma continua sobre la estructura y cuya intensidad varía poco con el tiempo. Las principales acciones que pertenecen a esta categoría son: la carga muerta; el empuje estático de suelos y de líquidos y las deformaciones y desplazamientos impuestos a la estructura que varían poco con el tiempo, como los debidos a presfuerzo o a movimientos diferenciales permanentes de los apoyos
- *Las acciones variables* son las que obran sobre la estructura con una intensidad que varía significativamente con el tiempo. Las principales acciones que entran en esta categoría son: la carga viva; los efectos de temperatura; las deformaciones impuestas y los hundimientos diferenciales que tengan una intensidad variable con el tiempo, y las acciones debidas al funcionamiento de maquinaria y equipo, incluyendo los efectos dinámicos que pueden presentarse debido a vibraciones, impacto o frenado
- *Las acciones accidentales* son las que no se deben al funcionamiento normal de la edificación y que pueden alcanzar intensidades significativas sólo durante lapsos breves. Pertenecen a esta categoría: las acciones sísmicas; los efectos del viento; las cargas de granizo y estancamiento (o inundación); los efectos de explosiones, incendios y otros fenómenos que pueden presentarse en casos extraordinarios. Será necesario tomar precauciones en las estructuras, en su cimentación y en los detalles constructivos, para evitar un comportamiento catastrófico de la estructura para el caso de que ocurran estas acciones.

Las cargas acciones comunes en las edificaciones son las cargas vivas, muertas y accidentales por sismo o viento.

Se considerarán como cargas muertas los pesos de todos los elementos constructivos, de los acabados y de todos los elementos que ocupan una posición permanente y tienen un peso que no cambia sustancialmente con el tiempo.

Se considerarán cargas vivas las fuerzas que se producen por el uso y ocupación de las edificaciones y que no tienen carácter permanente.

Para la aplicación de las cargas vivas unitarias se deberá tomar en consideración las siguientes disposiciones:

- La carga viva máxima W_m se deberá emplear para diseño estructural por fuerzas gravitacionales y para calcular asentamientos inmediatos en suelos, así como para el diseño estructural de los cimientos ante cargas gravitacionales
- La carga viva instantánea W_a se deberá usar para diseño por cargas accidentales, como sismo o viento, y cuando se revisen distribuciones de carga más desfavorables que la uniformemente repartida sobre toda el área
- La carga viva media W se deberá emplear en el cálculo de asentamientos diferidos y para el cálculo de flechas diferidas

Factores de carga

- Para combinaciones que incluyen acciones permanentes y variables, para estructuras del Grupo B se aplicará un factor de carga igual a 1.3 para las cargas permanentes y 1.5 para las variables, mientras que para las del Grupo A serán igual a 1.5 y 1.7, respectivamente.
- Para combinaciones de acciones variables se tomará un factor de carga de 1.1 aplicado a los efectos de todas las acciones que intervengan en la combinación.

4.2.3 Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo

Los requisitos que menciona esta norma para el sistema estructural y el análisis sísmico son los siguientes:

- Toda edificación deberá contar con un sistema estructural capaz de transmitir al sistema suelo-cimentación los efectos combinados de las fuerzas laterales de inercia generadas durante el sismo y de las fuerzas gravitacionales.
- El modelo numérico que se emplee para el análisis estructural debe considerar la participación de todos los elementos constructivos que, por su rigidez y forma de conexión, puedan tener una influencia significativa en la respuesta sísmica de la estructura, formen o no parte del sistema estructural principal.
- Las estructuras se analizarán bajo las acciones de dos componentes horizontales ortogonales de movimiento del terreno. La dirección principal mayor será la dirección de la cortante basal asociada al modo fundamental de vibrar de un modelo tridimensional del edificio, y la dirección principal menor será perpendicular a la anterior.

Zonas sísmicas

Para los efectos del cumplimiento de la norma, la Ciudad de México se divide en tres zonas sísmicas de acuerdo con lo siguiente:

- Zona A. Corresponde a la zona de la ciudad para la que el periodo dominante de vibrar más largo del terreno en el sitio de interés, T_s , es igual o menor que 0.5s.
- Zona B. Corresponde a la zona de la ciudad para la que $0.5 < T_s \leq 1.0s$
- Zona C. Corresponde a la zona de la ciudad para la que T_s es mayor que 1.0s

Estructuras irregulares

En las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo se describen 8 condiciones de irregularidad, de las cuales 5 son irregularidades en planta y 3 son irregularidades en elevación.

Irregularidades en planta

- Irregularidad por torsión
- Fuerte irregularidad por torsión
- Forma geométrica irregular en planta
- Irregularidad por flexibilidad excesiva en el diafragma
- Irregularidad por discontinuidad en el diafragma

Irregularidades en elevación

- Irregularidad por reducciones geométrica en elevación
- Irregularidad por reducciones bruscas de rigidez lateral
- Fuerte irregularidad por reducciones brusca de rigidez lateral

La irregularidad que es de interés para el presente trabajo es la irregularidad por la forma geométrica en planta.

Estructura irregular por su forma geométrica en planta

La Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo indican que una estructura es considerada como irregular por su forma geométrica en planta cuando, tiene entrantes o salientes de dimensiones mayores que 40 por ciento de la dimensión de la planta medida paralelamente a la dirección en que se considera el entrante o saliente.

Se muestran unos ejemplos de irregularidades en planta

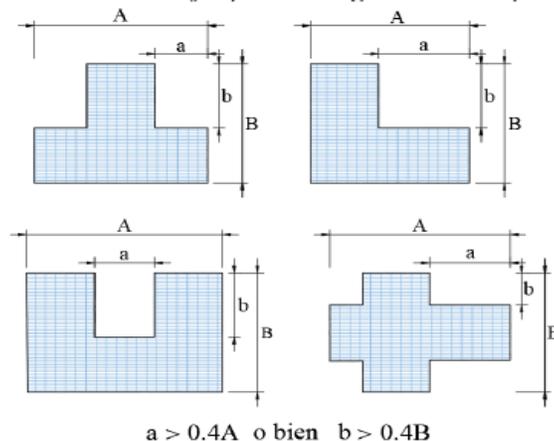


Figura 4.2.1 irregularidades en planta por forma geométrica (NTC de Diseño por Sismo, 2023)

Correcciones para estructuras irregulares

En la nueva edición de la normativa mexicana se da mayor relevancia al control de las deformaciones laterales para mejorar el desempeño sísmico de las edificaciones irregulares durante un sismo, más que en modificar las fuerzas laterales que estas estructuras deben soportar. En lugar de considerar que las estructuras irregulares enfrentan fuerzas mayores que las regulares, se enfatiza que ciertas partes de las estructuras irregulares experimentan mayores deformaciones laterales, lo que incrementa el riesgo de daño.

Para mitigar estos efectos, se reduce el valor límite de las distorsiones laterales que pueden experimentar las estructuras irregulares, con la finalidad de controlar y minimizar las deformaciones máximas en dichas estructuras. Además, se plantea una reducción más significativa de las distorsiones permitidas a medida que aumenta el número de condiciones de irregularidad.

A continuación, se resumen los diferentes tipos de irregularidades que considera la normativa mexicana y como se debe de corregir reduciendo su distorsión límite (γ_{max}). Donde, “1 condición” se refiere a estructuras que presentan solo un tipo de irregularidad, “2 condiciones” se refieren a estructuras que presentan dos tipos de irregularidad y así sucesivamente. (NTC de Diseños por Sismo, 2023).

Tabla 4.2.1 Reducción de distorsiones máximas en estructuras irregulares (NTC de Diseño por Sismo, 2023)

Inciso	Cuando se cumple:		
	1 condición	2 condiciones	3 o más condiciones
Irregularidad por torsión	$\gamma_c = 0.8\gamma_{max}$	$\gamma_c = 0.7\gamma_{max}$	$\gamma_c = 0.6$
Forma geométrica irregular en planta			
irregularidad por flexibilidad excesiva de un diafragma			
Irregularidad por discontinuidad en el diafragma			
Irregularidad por reducciones geométricas en elevación			
Irregularidad por reducción brusca de rigidez lateral			

Efectos a considerar en el análisis sísmico

Los efectos referentes a la torsión sísmica que contemplan las NTC-Sismo son los que se describen a continuación.

Efectos de torsión

La excentricidad torsional, e_s , calculada en cada entrepiso, debe tomarse como la distancia entre el centro de torsión del nivel correspondiente y la línea de acción de la fuerza lateral que actúa en él.

Para fines de diseño, el momento torsionante debe tomarse, por lo menos, igual a la fuerza lateral que actúa en el nivel multiplicada por la excentricidad que para cada elemento vertical sismo-resistente resulte más desfavorable de las siguientes:

$$1.5e_s + e_a \quad \text{Ecuación 4.2.1}$$

$$e_s - e_a \quad \text{Ecuación 4.2.2}$$

Excentricidad accidental

Es aquella que se establece en las normas de diseño sismo-resistente la cual trata de considerar efectos dinámicos y otro tipo de incertidumbres como la no precisión en los procesos constructivos. Las ecuaciones para calcular su valor son similares en los códigos normativos de varios países. En las normas técnicas complementarias de la Ciudad de México su valor se considera de la siguiente ecuación, en cada dirección de análisis.

$$e_a = \left[0.05 + \frac{0.05(i-1)}{(n-1)} \right] b_i \quad \text{Ecuación 4.2.3}$$

donde b_i es la dimensión del i -ésimo piso en la dirección perpendicular a la dirección de análisis; y n , el número de pisos del sistema estructural. (NTC de Diseño por Sismo, 2023).

Espectros de diseño

Cuando se emplee el método de análisis dinámico modal espectral, las acciones sísmicas de diseño se determinarán a partir de los espectros de diseño. Los espectros de diseño tienen dos características clave: (i) consideran la peligrosidad sísmica de una región determinada, y (ii) son curvas suavizadas que no muestran las variaciones abruptas propias de los espectros de respuesta.

Reducción de fuerzas sísmicas

Para el cálculo de las fuerzas sísmicas para el análisis estático se utilizarán dos factores de reducción, el factor de reducción por comportamiento sísmico Q' y el factor de reducción por sobre-resistencia R' , los cuales dependen del nivel de desempeño. El primer factor toma en cuenta la reducción en fuerzas por efecto del comportamiento dúctil, el segundo toma en cuenta explícitamente la sobre-resistencia estructural, que se define como el cociente entre la resistencia real alcanzada por la estructura para el nivel de desempeño de interés y la resistencia nominal de diseño.

Q' se calculará como sigue:

$$Q' = \begin{cases} 1 + (Q - 1) \sqrt{\frac{1}{k} \frac{T}{T_a}}; & \text{Si } T \leq T_a \\ 1 + (Q - 1) \sqrt{\frac{1}{k}}; & \text{Si } T_a < T \leq T_b \\ 1 + (Q - 1) \sqrt{\frac{\bar{p}}{k}}; & \text{Si } T > T_b \end{cases}$$

Figura 4.2.2 Factor de reducción por comportamiento sísmico (NTC de Diseño por Sismo, 2023)

Factor de comportamiento sísmico

El factor de comportamiento sísmico (Q) es un parámetro que refleja la capacidad de una estructura para disipar energía durante un sismo. Este factor no solo depende de la ductilidad, es decir, la capacidad del edificio para deformarse sin colapsar, sino también de otros aspectos como el sistema estructural utilizado. Como el sistema estructural puede variar en diferentes direcciones dentro de un mismo edificio, es posible que se deban emplear distintos valores de Q según la dirección de análisis.

Además, los desplazamientos y deformaciones obtenidos mediante métodos de análisis estático o dinámico espectral, que usan fuerzas reducidas gracias a Q , deben ser ajustados multiplicándolos por este mismo factor. Esto asegura que se verifiquen correctamente los estados límite de servicio, las distancias mínimas entre edificios vecinos y los efectos de inestabilidad como el P-delta.

Factores de comportamiento sísmico para estructuras de concreto

En la NTC-Sismo se muestran los factores de comportamiento sísmico y los valores de distorsión límite para estructuras de concreto, estructuras compuestas (concreto y acero), estructuras de mampostería y estructuras de madera. Para el trabajo de investigación se desarrollaron modelos a base de elementos de concreto, por lo tanto, en la siguiente tabla solo se muestran las distorsiones límite para marco de concreto, donde:

γ_{SV} , es la distorsión límite correspondiente al nivel de desempeño de Seguridad de Vida y;

γ_{OI} , es la distorsión límite correspondiente al nivel de desempeño de Ocupación Inmediata.

Los marcos de concreto se refieren a marcos construidos de manera monolítica, formados por vigas y columnas conectadas en nudos rígidos. Su capacidad para resistir cargas sísmicas y su rigidez lateral dependen principalmente de la rigidez a la flexión de las vigas y columnas, así como de la rigidez al corte en las conexiones. Estos marcos pueden lograr altos niveles de ductilidad, siempre que se garantice que la falla de los elementos estructurales ocurra por flexión y no por fallas frágiles, como las causadas por corte o problemas de adherencia. Si se cumplen estas condiciones, las estructuras basadas en marcos pueden diseñarse con factores de comportamiento sísmico (Q) de hasta 4, y tolerar distorsiones entre pisos (γ_{SV}) de hasta 0.03. (NTC de Diseño por Sismo, 2023).

Tabla 4.2.2 Factores de comportamiento sísmico para marcos de concreto (NTC de Diseño por sismo, 2023).

Estructuración	Ductilidad	Condición	Q	γ_{SV}	γ_{OI}
i) Marcos	Alta	-	4.0	0.030	0.0075
	Media	-	3.0	0.020	0.0075
	Baja	-	2.0	0.015	0.0075

Distorsiones de entrepiso

La distorsión de entrepiso se refiere a la diferencia entre los desplazamientos laterales de dos pisos consecutivos, dividida entre la distancia en altura que los separa. Para su evaluación, los desplazamientos laterales se obtienen a través de un análisis que incluye tanto las fuerzas sísmicas de diseño como las fuerzas gravitacionales. Se debe considerar la mayor distorsión calculada en cualquier elemento vertical en el entrepiso, como marcos o muros.

Al calcular estas distorsiones, deben tomarse en cuenta los efectos de torsión, de segundo orden, bidireccionales, de interacción suelo-estructura y la flexibilidad de los diafragmas de piso, junto con el factor de carga. Es necesario revisar las distorsiones de manera independiente en ambas direcciones principales de análisis, considerando los niveles de desempeño establecidos en la normativa mexicana, en función del tipo de construcción.

Para el nivel de desempeño de Limitación de Daño No Estructural, se verificará que las distorsiones calculadas con el espectro elástico sin reducir no superen el valor de 0.002, a menos que los elementos no estructurales puedan soportar grandes deformaciones o estén separados de la estructura principal, en cuyo caso el límite es de 0.004. Las distorsiones debidas a la flexión global de la estructura pueden ser descontadas. Como este nivel de desempeño se refiere solo a los elementos no estructurales, se considera un estado límite de servicio, y por lo tanto no se aplican factores de carga durante el análisis (NTC de Diseño por Sismo, 2023).

Distorsiones de entrepiso para estructuras irregulares

Cuando una estructura sea clasificada como irregular por forma geométrica en planta o bien irregular por reducciones bruscas de rigidez lateral de acuerdo se reducirán en 20 por ciento las distorsiones límite γ_{max} , cuando la estructura es irregular por dos condiciones las distorsiones límite se reducen en un 30%, y en un 40% cuando se cumplen 3 o más condiciones de irregularidad.

Tipos de análisis sísmico

En las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo se consideran 3 métodos de análisis sísmico: Simplificado, Estático y Dinámico.

El análisis estructural por distintos métodos exige que la estructura cumpla con los requisitos y condiciones de regularidad, los cuales están definidos de manera implícita en los fundamentos y criterios específicos establecidos por cada método.

El método estático es el que se ocupa en el presente trabajo para la obtención de las fuerzas laterales por sismo y es el que se describe a continuación.

Método estático

Según el capítulo 6 de las NTC-Sismo 2023, de la Ciudad de México, este método podrá ser aplicado para analizar estructuras regulares de altura no mayor que 30 m, y estructuras irregulares de no más de 20 m de altura. Para edificios ubicados en la Zona A, los límites anteriores se amplían a 40 m y 30 m, respectivamente. El método estático de análisis no podrá usarse para estructuras que pertenezcan al Grupo A o que sean fuertemente irregulares

Procedimiento del método

1. Primeramente, se obtienen los valores de h_i (altura del entrepiso), w_i (las cargas lineales de cada entrepiso) y $w_i \cdot h_i$
2. Posteriormente se determinan las fuerzas cortantes, F_i . En el método estático para calcular las fuerzas cortantes a diferentes niveles de una estructura, se supondrá un conjunto de fuerzas horizontales actuando sobre cada uno de los puntos donde se supongan concentradas las masas. Cada una de estas fuerzas se tomará igual al peso de la masa que corresponde, multiplicado por el coeficiente proporcional a h_i , siendo h_i la altura de la masa en cuestión sobre el desplante (o nivel a partir del cual las deformaciones estructurales pueden ser apreciables). El coeficiente se tomará de tal manera que V_0/W_0 sea igual a $c/(Q'R')$, donde c es un coeficiente sísmico, Q' y R' son factores de reducción. La relación anterior no debe ser menor que a_0 , donde a_0 es la ordenada espectral que corresponde a $T = 0$ y c el coeficiente sísmico. (NTC de Diseños por Sismo, 2023). De acuerdo con este requisito la fuerza que actúa en el i -ésimo nivel, F_i , resulta ser:

$$F_i = \frac{c}{Q'R'} W_i h_i \frac{\sum W_i}{\sum W_i h_i} \quad \text{Ecuación 4.2.4}$$

donde:

W_i es el peso de la i -ésima masa

h_i altura de la i -ésima masa sobre el desplante

Q' es el factor de reducción por comportamiento sísmico

3. Posteriormente se aplican las fuerzas laterales al centro de masas de cada entrepiso y se analiza el modelo para finalmente obtener los desplazamientos en cada dirección del edificio.
4. En seguida, se obtienen los valores de $W_i X_i^2$ y $F_i X_i$
5. Finalmente se calcula el periodo de la estructura, T , de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum W_i X_i^2}{g \sum F_i X_i}} \quad \text{Ecuación 4.2.5}$$

Donde X_i es el desplazamiento del i -ésimo nivel, relativo al desplante en la dirección de la fuerza, "g" la aceleración de la gravedad, y las sumatorias se llevan a cabo sobre todos los niveles.

La suma de las fuerzas laterales equivale al cortante basal de la estructura, para comprobar dicho cortante se utiliza la siguiente igualdad

$$\frac{V_b}{\sum W_i} = \frac{c}{Q} \quad \text{Ecuación 4.2.6}$$

4.2.4 Normas y Especificaciones para estudios, proyectos, construcciones e instalaciones del INIFED, Volumen 4, Tomo II Diseño por Sismo

Regionalización sísmica

Además de las zonas sísmicas que consideran las NTC-Sismo, el INIFED considera 4 zonas sísmicas para la república mexicana.

De acuerdo con las Normas y Especificaciones para estudios, proyectos, construcciones e instalaciones del INIFED, la República Mexicana está dividida en zonas sísmicas según una regionalización específica. Para efectos de diseño sísmico, el territorio se clasifica en cuatro zonas. Estas zonas, denominadas A, B, C y D, corresponden a niveles de riesgo sísmico que van de menor a mayor, y se han determinado principalmente con base en la sismicidad característica de cada región (INIFED, 2022). En la figura 2.3.1 se muestra un mapa de las zonas sísmicas en México. En la tabla 2.3.1 se muestran algunos factores importantes en el diseño sísmico de las estructuras de acuerdo con el tipo de zonificación, en donde la zona D se consideran sismos muy fuertes, la zona B y C son zonas de intensidad sísmica intermedia y la zona A de escasa actividad sísmica.

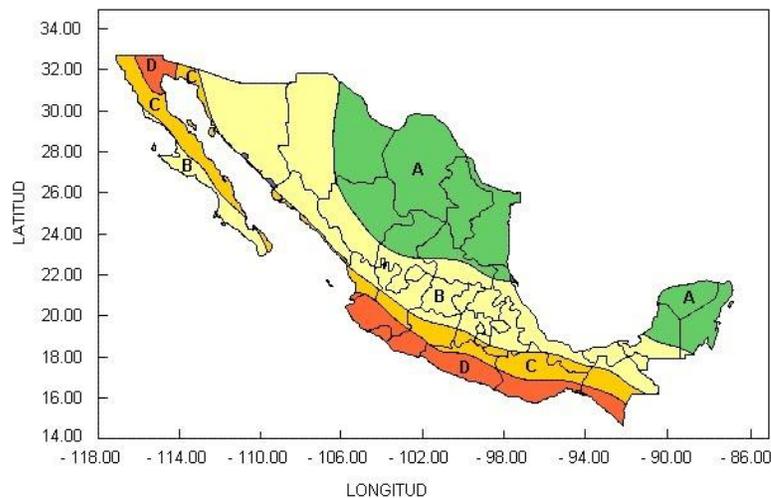


Figura 4.2.3 Regionalización sísmica de la República Mexicana (INIFED, 2022).

Determinación de parámetros dinámicos del suelo y clasificación del tipo de terreno

La relación que establece la normativa entre el periodo dominante, la velocidad de propagación de ondas de corte y el espesor es la siguiente:

$$T_s = \frac{4H_s c}{v_s Q} \quad \text{Ecuación 4.2.7}$$

En donde:

T_s = es el periodo dominante del estrato equivalente del terreno (periodo del sitio)

H_s = es el espesor total del estrato equivalente del terreno

V_s = es la velocidad efectiva de propagación de ondas de corte en el estrato

La clasificación del terreno se hace en función de la velocidad V_s , y el periodo dominante del terreno T_s , en la siguiente figura se resumen los cuatro tipos de suelo.

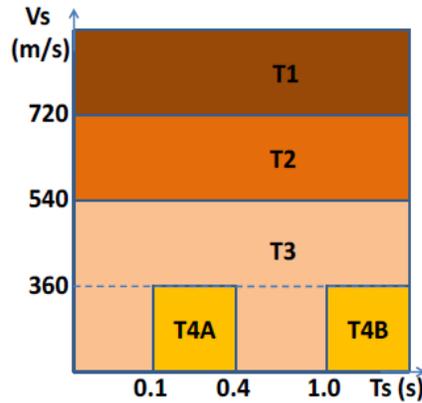


Figura 4.2.4 Carta de microzonificación sísmica (INIFED, 2022).

Tabla 4.2.3 Valores de los periodos característicos y exponentes que controlan las ramas descendientes de los espectros de diseño (INIFED, 2022)

Zona sísmica	Tipo de suelo	a_0	c	T_a	T_b	r
A	I	0.03	0.12	0.2	0.6	$\frac{1}{2}$
	II	0.06	0.24	0.3	1.5	$\frac{2}{3}$
	III	0.08	0.3	0.6	2.9	1
B	I	0.06	0.21	0.2	0.6	$\frac{1}{2}$
	II	0.12	0.45	0.3	1.5	$\frac{2}{3}$
	III	0.15	0.54	0.6	2.9	1
C	I	0.54	0.54	0	0.6	$\frac{1}{2}$
	II	0.96	0.96	0	1.4	$\frac{2}{3}$
	III	0.96	0.96	0	1.9	1
D	I	0.75	0.75	0	0.6	$\frac{1}{2}$
	II	1.29	1.29	0	1.2	$\frac{2}{3}$
	III	1.29	1.29	0	1.7	1

Espectros de diseño de estructuras del sector educativo

En el caso de estructuras destinadas al sector educativo, se consideran factores reductores para la obtención del espectro de diseño asociadas a la ductilidad, sobrerresistencia y redundancia, además de posibles ajustes por utilizar valores de amortiguamiento distintos al 5 % y por los efectos de interacción suelo–estructura.

Factor de amortiguamiento

El reglamento indica diferentes valores de amortiguamiento ζ_e en función del sistema estructural, para estructuras de concreto reforzado maneja un factor de 5%. Para este factor se tiene que $\beta = 1$ para cualquier periodo estructural T_e .

Factor de comportamiento sísmico, Q

Actualmente, la caracterización de las estructuras según su ductilidad se realiza principalmente mediante el factor de comportamiento sísmico (Q). Este factor no solo refleja la capacidad de deformación inelástica, sino que también incorpora aspectos como la configuración estructural, la degradación bajo cargas sísmicas y la capacidad adicional no contemplada por los métodos de diseño convencionales.

Al igual que en las NTC-Sismo esta normativa establece distintos factores de comportamiento sísmico para estructuras de concreto, de acero y compuestas y estructuras de mampostería. Para cada tipo de estructura maneja un factor de comportamiento máximo y una distorsión máxima permisible. Para estructuras de marcos de concretos ordinarios maneja un $Q_{m\acute{a}x} = 2$ y una distorsión máxima $\gamma_{m\acute{a}x} = 0.015$

Factor reductor por ductilidad Q'

Para fines de diseño, en estado límite de colapso se tendrá en cuenta el comportamiento inelástico de la estructura, para ello las ordenadas espectrales se dividirán por el factor de reducción por ductilidad, Q' a fin de obtener las fuerzas sísmicas reducidas. Para cualquier tipo de estructura el factor de reducción se calculará de la siguiente manera.

$$Q' = \begin{cases} 1 + (Q - 1) \sqrt{\frac{\beta T_e}{k T_b}} & \text{Si } T_e \leq T_b \\ 1 + (Q - 1) \sqrt{\frac{\beta \rho_b}{k}} & \text{Si } T_e > T_b \end{cases}$$

En donde:

Q es el factor de comportamiento sísmico

T_b es el límite superior de la meseta del espectro de diseño

T_e es el periodo estructural

k es un parámetro que controla la caída del espectro

β es el factor de amortiguamiento

ρ_b es un factor empleado para definir la variación del espectro descendente, se calcula de la siguiente manera

$$\rho_b = k + (1 - k) \left(\frac{T_b}{T_e} \right)^2 \quad \text{Ecuación 4.2.8}$$

Factor reductor por sobrerresistencia, R

En construcciones de la infraestructura física educativa la reducción por sobrerresistencia está dada por el factor R, el cual tomará un valor de 2.

Factor de redundancia, ρ

Para estructuras del sector educativo se considera un factor de redundancia $\rho = 1$

Factor de amplificación por comportamiento degradante, A_{cd}

En estructuras localizadas sobre suelos tipo II o III, y que presenten comportamiento histerético con degradación de rigidez y/o resistencia, las ordenadas del espectro de diseño deben ajustarse mediante un factor de amplificación por comportamiento degradante, denominado A_{cd}

$$A_{cd} = 0.8 + \frac{1}{2+5\left(2\frac{T_e}{T_s}-1\right)^5} \quad \text{Ecuación 4.2.9}$$

Condiciones de irregularidad

Estructuras regulares

Las estructuras se considerarán regulares si satisfacen simultáneamente las condiciones establecidas en la sección 3.3.2.1 de estructuras tipo edificios del Capítulo de Diseño por Sismo del Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) CDS-MDOC vigente.

Estructuras irregulares

Se considera irregular si la estructura no cumple con una de las condiciones de regularidad establecidas en la sección 3.3.2.2 de estructuras tipo edificios del Capítulo de Diseño por Sismo del Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) CDS-MDOC vigente.

Corrección por irregularidad

Cuando una estructura no satisfaga las condiciones de regularidad especificadas en la normativa, el factor de ductilidad Q' debe multiplicarse por el factor α a fin de obtener las fuerzas reducidas por ductilidad, pero en ningún caso Q' debe tomarse con un valor de 1. En la siguiente tabla se muestran los valores correctivos.

Tabla 4.2.4 Factor correctivo por irregularidad (INIFED,2022)

Factor correctivo α	Tipo de irregularidad
0.9	Cuando no se cumpla una condición de regularidad
0.8	Cuando no se cumplan dos o más condiciones
0.7	Estructuras fuertemente irregulares

Elección del tipo de análisis

Esta norma considera tres tipos de análisis:

- a) Método simplificado: sólo es aplicable a estructuras regulares con altura no mayor de 13 m
- b) Método estático: es aplicable a edificios regulares cuya altura sea menor o igual que 30 m y estructuras irregulares con altura no mayor de 20 m. En terreno firme, estos límites se incrementan a 40 m y 30 m, respectivamente.

Las fuerzas laterales de calculas con la siguiente ecuación

$\rho_n = \alpha_n w_n h_n$, en donde w_n es el peso de la masa del nivel n y h_n es la altura del nivel n sobre el desplante

El momento torsionante, Mo_n^t , en el entrepiso n , se tomará igual a la fuerza cortante V_n en el entrepiso multiplicada por la excentricidad de diseño, e_n^+ o e_n^- , que resulte más desfavorable para cada sistema resistente de la estructura.

- c) Método dinámico: aplicable para cualquier tipo de estructuras

4.2.5 Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad. Diseño por Sismo.

El manual presenta un enfoque probabilista para estimar el peligro sísmico en México, representado mediante curvas que indican la probabilidad de exceder ciertas intensidades sísmicas en periodos de retorno definidos. En zonas de alta sismicidad, los coeficientes sísmicos coinciden con los usados en el diseño convencional, mientras que en zonas de baja sismicidad se obtienen valores muy bajos, lo que sugiere la necesidad de incrementarlos para mejorar la seguridad estructural, si los costos lo permiten. El ajuste de estos coeficientes se basa en criterios de diseño óptimo considerando los estados límite de colapso y servicio. (Manual de Obras Civiles de CFE, 2008)

Clasificación de las estructuras

El nivel de seguridad, la exploración del subsuelo y la construcción de los espectros de diseño dependerán de la clasificación de acuerdo a su importancia y efectos que podrían ocurrir en caso de falla y por su tamaño y participación en el sector energético o industrial.

1. Clasificación de las construcciones según su destino

Tabla 4.2.5 Clasificación de estructuras según su destino (Manual de CFE, 2015)

Grupo	Descripción
A+	Son estructuras en que se requiere un grado de seguridad extrema. Su falla es inadmisibile porque, si se presenta, conduciría a la pérdida de miles de vidas humanas, a un grave daño ecológico, económico o social, o bien, impediría el desarrollo nacional o cambiaría el rumbo del país. Ejemplos: grandes presas y plantas nucleares.
A	Construcciones cuya falla estructural causaría la pérdida de un número elevado de vidas o pérdidas económicas o culturales de magnitud intensa o excepcionalmente alta, o que constituyan un peligro significativo por contener sustancias tóxicas o inflamables, así como construcciones cuyo funcionamiento sea esencial a raíz de un sismo. Tal es el caso de puentes

	principales, sistemas de abastecimiento de agua potable, subestaciones eléctricas, centrales telefónicas, estaciones de bomberos, archivos y registros públicos, monumentos, museos, hospitales, escuelas, estadios, templos, terminales de transporte, salas de espectáculos y hoteles que tengan áreas de reunión que pueden alojar un número elevado de personas, gasolineras, depósitos de sustancias inflamables o tóxicas y locales que alojen equipo especialmente costoso. A1: se relacionan con el sector energético. A2: no se relacionan con el sector energético.
B	Estructuras en que se requiere un grado de seguridad convencional. Construcciones cuya falla estructural ocasionaría pérdidas moderadas o pondría en peligro otras construcciones de este grupo o del grupo A, tales como naves industriales, locales comerciales, estructuras comunes destinadas a vivienda u oficinas, salas de espectáculos, hoteles, depósitos y estructuras urbanas o industriales no incluidas en el grupo A, así como muros de retención, bodegas ordinarias y bardas. B1: altura mayor de 13m o área mayor de 400m ² . B2: altura menor de 13m y área menor de 400m ²

2. Clasificación de construcciones según su estructuración

- Tipo 1, estructuras de edificios
- Tipo 2, Péndulo invertidos y apéndices
- Tipo3, muros de retención
- Tipo4, Chimeneas, silos y similares
- Tipo5, Tanques depósitos y similares
- Tipo 6, Estructuras industriales
- Tipo7, Puentes
- Tipo 8, Tuberías
- Tipo 10, Aislamiento sísmico y disipación de energía
- Tipo11, Torres de comunicación
- Tipo 1, Túneles
- Tipo 13, Cimentación

Espectros de diseño sísmico

Se obtendrán espectros de diseño sísmico siguiendo los enfoques probabilista y determinista, dependiendo de la importancia de la estructura.

Espectro de **respuesta probabilístico**, de este tipo se derivan dos clasificaciones.

- Espectro de Respuesta de Referencia (ER): Representa el espectro base que establece el nivel mínimo de seguridad recomendado para estructuras del Grupo B, y se obtiene mediante el programa PRODISIS. Se relaciona con el concepto de “espectro óptimo” mencionado en los comentarios del documento.
- Espectro de Respuesta para un Período de Retorno Especificado (EPR): Corresponde al espectro determinado para un período de retorno definido por normas oficiales o bases de licitación, siempre que ofrezca un nivel de seguridad igual o mayor al del ER.

Regionalización sísmica

Aquí se propone una regionalización en que se consideran cuatro zonas: dos de baja y dos de alta sismicidad. Para determinar la zona sísmica se proporciona un criterio simple basado en el valor de la aceleración máxima en roca, a_r^0 , para el nivel de referencia dado en el ER, obtenido con el programa PRODISIS

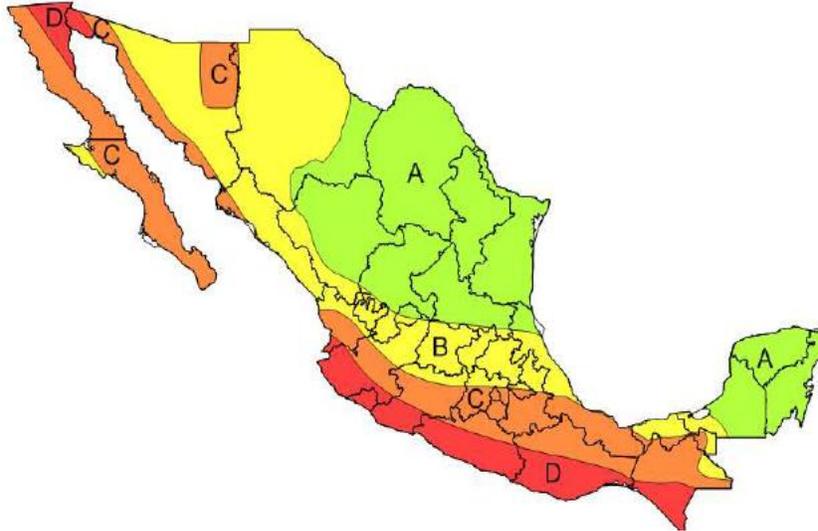


Figura 4.2.5 Zonas sísmicas según Manual de CFE (Manual de CFE, 2015).

Tabla 4.2.6 Valores para clasificar el tipo de zona (Manual de CFE, 2015)

Aceleración máxima en roca, a_r^0 ($\frac{cm}{s^2}$), correspondiente al nivel de referencia ER	Zona	Intensidad sísmica
$a_r^0 \geq 200$	D	Muy alta
$100 \leq a_r^0 < 200$	C	Alta
$50 \leq a_r^0 < 100$	B	Moderada
$a_r^0 < 50$	A	Baja

Factores para el espectro sísmico de estructuras tipo edificio

Factor de comportamiento sísmico

Tabla 4.2.7 Factores de comportamiento sísmico (Manual de CFE, 2015)

Tipo	Características
Q=4	La resistencia en todos los entrepisos es suministrada exclusivamente por marcos no contraventados de acero, concreto reforzado o compuestos de los dos materiales y Los marcos y muros de

	concreto reforzado cumplen con los requisitos que se fijan para marcos y muros dúctiles en las normas técnicas complementarias para estructuras de concreto vigentes
Q=3	La resistencia en todos los entresijos es suministrada por columnas de acero o de concreto reforzado con losas planas, por marcos rígidos de acero, por marcos de concreto reforzado, por muros de concreto o de placa de acero o compuestos de los dos materiales, por combinaciones de estos y marcos o por diafragmas de madera.
Q=2	La resistencia a fuerzas laterales es suministrada por losas planas con columnas de acero o de concreto reforzado, por marcos de acero con ductilidad reducida o provistos de contraventeo con ductilidad normal, o de concreto reforzado que no cumplan con los requisitos para ser considerados dúctiles, o muros de concreto reforzado, de placa de acero o compuestos de acero y concreto
Q=1.5	La resistencia a fuerzas laterales es suministrada en todos los entresijos por muros de mampostería de piezas huecas, confinados o con refuerzo interior, que satisfacen los requisitos de las normas técnicas para estructuras de mampostería vigente
Q=1	En estructuras cuya resistencia a fuerzas laterales es suministrada, al menos parcialmente, por elementos o materiales diferentes de los arriba especificados.

Factor de sobrerresistencia

El factor R puede diferir en las dos direcciones ortogonales en que se analiza la estructura, según sean las propiedades de ésta en dichas direcciones. Los valores de R_0 dependen del sistema estructural seleccionado, como se señala a continuación.

$R_0 = 2$, para marcos de concreto reforzado, de acero estructural o compuestos de los dos materiales diseñados con $Q = 3$ o $Q = 2$.

$R_0 = 2,5$, para marcos dúctiles de concreto reforzado, de acero estructural o compuestos de los dos materiales diseñados con $Q = 4$.

$R_0 = 3$, para estructuraciones mixtas dúctiles diseñadas con $Q = 4$.

Factor de redundancia, ρ

$\rho = 0.8$, en estructuras con al menos dos marcos o líneas de defensa paralelas en la dirección de análisis, cuando se disponga de marcos de una sola crujía o estructuraciones equivalentes (un solo muro por línea de defensa paralela, etc.).

$\rho = 1.0$, en estructuras con al menos dos marcos o líneas de defensa paralelas en la dirección de análisis y que cada marco o línea de defensa disponga de al menos dos crujías o estructuraciones equivalentes.

$\rho = 1.25$, en estructuras con al menos tres marcos o líneas de defensa paralelas en la dirección de análisis y que cada marco o línea de defensa disponga de al menos tres crujías o estructuraciones equivalentes.

Otros valores

Tabla 4.2.8 Valores de los periodos característicos y exponentes que controlan las ramas de los espectros de diseño (Manual de CFE,2015)

Zona sísmica	Tipo de terreno	Ta(s)	Tb(s)	Tc(s)	k	r
A	I	0.1	0.6	2.0	1.5	1/2
	II	0.2	1.4	2.0	1.0	2/3
	III	0.3	2.0	2.0	0.5	1
B	I	0.1	0.6	2.0	1.5	1/2
	II	0.2	1.4	2.0	1.0	2/3
	III	0.3	2.0	2.0	0.5	1
C	I	0.1	0.6	2.0	1.5	1/2
	II	0.2	1.4	2.0	1.0	2/3
	III	0.2	2.0	2.0	0.5	1
D	I	0.1	0.6	2.0	1.5	1/2
	II	0.1	1.4	2.0	1.0	2/3
	III	0.1	2.0	2.0	0.5	1

Corrección por irregularidad

En el diseño sísmico de estructuras que no satisfagan las condiciones de regularidad especificadas, el factor reductor por ductilidad, se multiplicará por el factor α indicado en la tabla 2.4.8 a fin de obtener las fuerzas sísmicas reducidas por ductilidad. Sin embargo, en ningún caso se tomará menor que la unidad.

Tabla 4.2.9 Factor para corregir irregularidad (Manual de CFE,2015)

Factor correctivo α	Tipo de irregularidad
0.9	Cuando no se cumpla una condición de irregularidad, de acuerdo con este manual
0.8	Cuando no se cumplan dos condiciones
0.7	Estructuras fuertemente irregulares

4.3 Normativa de otros países

4.3.1 Eurocódigo-8

La Comisión de las Comunidades Europeas (CCE) emprendió la tarea de desarrollar un conjunto de normas técnicas unificadas para el diseño de edificaciones y obras civiles. Inicialmente, estas normas estaban pensadas como una opción complementaria a las regulaciones existentes en cada uno de los Estados Miembros, pero con el tiempo se planteó que sustituyeran dichas reglamentaciones. Este conjunto de normas técnicas es conocido como los Eurocódigos Estructurales.

El Eurocódigo E-8 es el correspondiente a las Disposiciones para el proyecto de estructuras sismorresistente. Las consideraciones importantes que menciona la norma son las que se describen a continuación.

Tipos de estructuras

El reglamento presenta varias clasificaciones que se describen en seguida.

Tabla 4.3.1 Tipos de estructuras según Eurocódigo E-8, (AN/UNE,2022)

Tipo de sistemas	Descripción
Sistema en pórtico	Sistema estructural donde tanto las cargas verticales como laterales son principalmente resistidas por elementos espaciales interligados, y cuya, fuerza basal excede en esos elementos 65% de la fuerza total en la base de todo el sistema
Sistema en paredes	Sistema estructural cuyas acciones verticales y laterales son resistidas por paredes resistentes, y cuya, fuerza de corte basal en esos elementos es 65% mayor que la fuerza total en la base de la estructura
Sistema mixto equivalente a pórtico	Sistema mixto constituido por elementos en pórtico y paredes resistentes, cuya fuerza global de corte basal del edificio es suportada por los elementos en pórtico en más de 50%
Sistema mixto equivalente a pared	Sistema constituido por elementos en pórtico y paredes resistentes, en que un porcentaje superior a 50% del total de la fuerza de corte basal es resistida por las paredes
Sistema flexible a la torsión	Sistema en que el radio de giro de la masa de un piso excede el valor del radio de torsión en una o dos direcciones. Siendo

	<p>ejemplo, sistemas con pórticos flexibles cuyas paredes resistentes están todas colocadas en el centro de rigidez de los pisos, no siendo por lo tanto recomendable debido a no se desarrollar suficiente resistencia a la rotación.</p>
Sistema en péndulo invertido	<p>Sistema donde un porcentaje igual o superior a 50% de la masa total está concentrada en el tercio superior de la estructura, o sistemas cuya disipación de energía ocurra sobretodo en la base de un único elemento estructural. A este sistema estructural están ligados los menores valores de q, pues la suya capacidad de disipación de energía es bastante reducida.</p>

Clases de ductilidad

El reglamento contempla tres clases de ductilidad que se describen en seguida.

- Ductilidad baja o DCL: este tipo de estructuras tienen un comportamiento en el régimen elástico, la resistencia a la acción de un sismo es regida por la resistencia de los materiales estructurales. Solo se aceptan para zonas de baja sismicidad.
- Ductilidad media o DCM: corresponde a estructuras que presentan una buena respuesta en el rango inelástico y una buena disipación de energía.
- Ductilidad mejorada o DCH: corresponde a estructuras con altos niveles de plasticidad.

Métodos de análisis

En un análisis sísmico, el modelo estructural debe reflejar de la manera más precisa posible la distribución de masas y rigideces de la estructura, siendo preferible el uso de un modelo tridimensional. No obstante, la normativa europea admite que, en el caso de edificaciones con regularidad en planta, los efectos sísmicos puedan evaluarse mediante modelos en dos dimensiones aplicados en cada una de las direcciones principales. La normativa considera dos métodos basados en la teoría elástica

- Método de las fuerzas laterales
- Análisis modal por espectro de respuesta

, y dos métodos para el rango no lineal

- Análisis estático (pushover)
- Análisis dinámico (non-linear time-history)

Método de las fuerzas laterales: este método es similar al método estático de la normativa mexicana. Solo puede ser usado en estructuras que cumplen requisitos de regularidad en elevación y bajo una condición del periodo fundamental T_1

$$T_1 \leq \begin{cases} 4T_c \\ 2S \end{cases}$$

Donde:

T_1 es el periodo de referencia del tipo de sismo en consideración.

Las fuerzas laterales que se aplican en cada nivel de la estructura se obtienen de la siguiente manera.

$$F_i = F_b \frac{s_i m_i}{\sum s_j m_j} \frac{c}{Q} \quad \text{Ecuación 4.3.1}$$

Donde:

F_i es la fuerza horizontal en el piso i

F_b es la fuerza de corte basal

m_i, m_j corresponde a la masa de los pisos asociadas a las cargas verticales de la combinación sísmica

s_i, s_j son los desplazamientos de las masas m_i, m_j en el modo de vibración fundamental

Para este método, la fuerza de corte basal se determina por la siguiente expresión:

$$F_b = S_d(T_1) m \lambda \frac{c}{Q} \quad \text{Ecuación 4.3.2}$$

Donde:

$S_d(T_1)$ es el valor de la aceleración del espectro de calculo para le valor del periodo fundamental

m es la masa total del edificio arriba de las cimentaciones.

λ es el factor de corrección que asumen los valores de 0.85 en caso de edificios con más de dos pisos y un valor de 1 para $T_1 \leq 2 T_c$

El análisis modal por espectro de respuesta puede ser aplicado a cualquier tipo de edificio.

Cálculo del coeficiente de comportamiento sísmico

De manera similar a otros códigos de diseño sismorresistente, el EUROCÓDIGO-8 permite el análisis elástico de las estructuras, basándose en la reducción de las ordenadas del espectro de diseño elástico mediante la aplicación de factores de reducción.

En el EUROCÓDIGO-8, los factores de reducción de respuesta, representados por la letra "q", se aplican a los espectros elásticos de diseño para obtener las aceleraciones de diseño. Estos factores se expresan en función de dos términos.

$$q = q_0 k_w \geq 1.5 \frac{c}{Q} \quad \text{Ecuación 4.3.3}$$

El factor básico de reducción de respuesta depende del tipo de estructura predominante, la regularidad en elevación y el nivel de ductilidad que se espera que la estructura desarrolle. Existen dos niveles de ductilidad: DCM (ductilidad media) y DCH (ductilidad alta), cuyos valores se presentan de forma separada.

Tabla 4.3.2 Valores sugeridos para el factor básico de reducción de respuesta q_0 (Barbat, et al, 2005)

Tipo estructural	DCM	DCH
Sistema porticado, dual o acoplado a muros de corte	$3.0 \alpha_u / \alpha_1$	$4.5 \alpha_u / \alpha_1$
Sistema con muros de corte	3.0	$4.0 \alpha_u / \alpha_1$
Sistema torsionalmente flexible	2.0	3.0
Sistema de péndulo invertido	1.5	2.0

Efecto de regularidad estructural

En el EUROCÓDIGO-8, las estructuras con irregularidad en planta no reciben penalización en el factor básico de reducción, ya que se asigna un factor multiplicador de 1, lo que implica que no se incrementa dicho factor por resistencia o redundancia. No obstante, el código no diferencia entre los distintos tipos de irregularidad en planta, a pesar de que estos afectan de manera distinta las acciones torsionales. Por otro lado, los valores de q_0 pueden disminuirse hasta un 20 % si la estructura presenta irregularidades en elevación, dejando al criterio del proyectista el grado de reducción según la severidad de la irregularidad. Asimismo, se permite aumentar q_0 cuando se cuenta con un plan especial de calidad, aunque dicho aumento no debe superar el 20 %. (Barbat, et al., 2005)

Valores del factor K_r

Este valor se aplica según las siguientes irregularidades en la estructura

- $K_r=0.8$ cuando hay una excentricidad en la más horizontal en una cierta sección superior al 5% de la dimensión principal de la estructura.
- $K_r=0.8$ cuando existan aberturas en conductos que causen una reducción igual o superior al 30% del momento de inercia de la sección transversal
- $K_r=0.7$ cuando masas concentradas en el tercio superior de la altura, que contribuyan en un 50% o más al momento de vuelco en la base
- Cuando se presente más de una irregularidad, deberá tomarse un valor de K_r como el producto de los dos valores menores de K_r

En la siguiente tabla se muestran los factores de reducción para estructuras porticadas (cuyos elementos principales son marcos conformados por columnas y traveses) con nivel de ductilidad alto y bajo respectivamente. En las tablas las siglas CPC y SPC significan que el proyecto cuenta o no con plan de control de calidad.

Tabla 4.3.3 Factores de reducción para estructuras porticadas, con nivel de ductilidad alto (Barbat, et al., 2005).

	q_0	α_u/α_1	k_u	Factor de Reducción q							
				Regulares		Irregulares					
				SPC	CPC	en planta		en elevación		planta elevación	
				SPC	CPC	SPC	CPC	SPC	CPC		
Un solo nivel	4,50	1,10	1,00	4,95	5,94	4,50	5,40	4,13	4,95	3,75	4,50
Múltiples niveles, un solo vano	4,50	1,20	1,00	5,40	6,48	4,50	5,40	4,50	5,40	3,75	4,50
Múltiples niveles, múltiples vanos	4,50	1,30	1,00	5,85	7,02	4,50	5,40	4,88	5,85	3,75	4,50

Tabla 4.3.4 Factores de reducción para estructuras porticadas, con nivel de ductilidad bajo (Barbat, et al., 2005).

	q_0	α_u/α_1	k_u	Factor de Reducción q							
				Regulares		Irregulares					
				SPC	CPC	en planta		en elevación		planta elevación	
				SPC	CPC	SPC	CPC	SPC	CPC		
Un solo nivel	3,00	1,10	1,00	3,30	3,96	3,00	3,60	2,75	3,30	2,50	3,00
Múltiples niveles, un solo vano	3,00	1,20	1,00	3,60	4,32	3,00	3,60	3,00	3,60	2,50	3,00
Múltiples niveles, múltiples vanos	3,00	1,30	1,00	3,90	4,68	3,00	3,60	3,25	3,90	2,50	3,00

En las tablas 4.3.5 a 4.3.7 se muestran los factores de reducción para edificios con muros de cortante con nivel de ductilidad alta, baja y con falla a flexión respectivamente.

Tabla 4.3.5 Factores de reducción para estructuras con muros de cortante, con nivel de ductilidad alto (Barbat, et al., 2005)

	q_0	α_u/α_1	k_u	Factor de Reducción q							
				Regulares		Irregulares					
				SPC	CPC	en planta		en elevación		planta elevación	
				SPC	CPC	SPC	CPC	SPC	CPC		
Sólo dos muros desacoplados	4,00	1,00	1,00	4,00	4,80	4,00	4,80	3,33	4,00	3,33	4,00
Otros sistemas desacoplados de muros	4,00	1,10	1,00	4,40	5,28	4,00	4,80	3,67	4,40	3,33	4,00
Sistemas duales o acoplados a muros	4,00	1,20	1,00	4,80	5,76	4,00	4,80	4,00	4,80	3,33	4,00

Tabla 4.3.6 Factores de reducción para estructuras con muros de cortante, con nivel de ductilidad bajo (Barbat, et al., 2005)

	q_0	α_u/α_1	k_u	Factor de Reducción q							
				Regulares		Irregulares					
				SPC	CPC	en planta		en elevación		planta elevación	
				SPC	CPC	SPC	CPC	SPC	CPC		
Sólo dos muros desacoplados	4,00	1,00	0,50	2,00	2,40	2,00	2,40	1,67	2,00	1,67	2,00
Otros sistemas desacoplados de muros	4,00	1,10	0,50	2,20	2,64	2,00	2,40	1,83	2,20	1,67	2,00
Sistemas duales o acoplados a muros	4,00	1,20	0,50	2,40	2,88	2,00	2,40	2,00	2,40	1,67	2,00

Tabla 4.3.7 Factores de reducción para estructuras con muros de cortante con falla a flexión (Barbat, et al., 2005).

	q_0	α_u/α_1	k_u	Factor de Reducción q							
				Regulares		Irregulares					
				SPC	CPC	en planta		en elevación		planta elevación	
				SPC	CPC	SPC	CPC	SPC	CPC		
Sólo dos muros desacoplados	3,00	1,00	1,00	3,00	3,60	3,00	3,60	2,50	3,00	2,50	3,00
Otros sistemas desacoplados de muros	3,00	1,10	1,00	3,30	3,96	3,00	3,60	2,75	3,30	2,50	3,00
Sistemas duales o acoplados a muros	3,00	1,20	1,00	3,60	4,32	3,00	3,60	3,00	3,60	2,50	3,00

El uso de los factores de reducción depende de diversos factores como el control de diseño del proyectista, la capacidad de la estructura para disipar energía y la sobrerresistencia deseada.

4.3.2 Normativa Española NCSE-02

En un análisis sísmico, el modelo estructural debe reflejar de la manera más precisa posible la distribución de masas y rigideces de la estructura, siendo preferible el uso de un modelo tridimensional. No obstante, la normativa europea admite que, en el caso de edificaciones con regularidad en planta, los efectos sísmicos puedan evaluarse mediante modelos en dos dimensiones aplicados en cada una de las direcciones principales.

Métodos de análisis sísmico

La normativa NCSE-02 establece como método de referencia para el cálculo sísmico el análisis de la estructura mediante espectros de respuesta, fundamentado en el análisis modal. También permite el cálculo de la respuesta dinámica mediante integración numérica de las ecuaciones del movimiento. Además de estos dos procedimientos, la normativa desarrolla un método simplificado de cálculo de la respuesta sísmica máxima para los casos más usuales de edificios, cuya aplicación es adecuada para estructuras que cumplen los siguientes requisitos:

El número de plantas sobre rasante es inferior a veinte. La altura del edificio sobre rasante es inferior a sesenta metros. Existe regularidad geométrica en planta y en alzado, sin entrantes ni salientes importantes. Dispone de soportes continuos hasta cimentación, uniformemente distribuidos en planta y sin cambios bruscos en su rigidez. Dispone de regularidad mecánica en la distribución de rigideces, resistencias y masas, de modo que los centros de gravedad y de torsión de todas las plantas estén situados, aproximadamente, en el mismo vertical. La excentricidad del centro de las masas que intervienen en el cálculo sísmico respecto al de torsión es inferior al 10% de la dimensión en planta del edificio en cada una de las direcciones principales.

Factores de reducción de respuesta sísmica

La normativa sismorresistente española permite realizar análisis elásticos reduciendo los valores espectrales mediante un coeficiente de respuesta, el cual depende de la ductilidad esperada y del amortiguamiento crítico especificado para los distintos materiales estructurales.

$$\beta = v/\mu \frac{c}{Q} \quad \text{Ecuación 4.3.4}$$

Donde v es el factor de amortiguamiento y μ el coeficiente de comportamiento por ductilidad.

La normativa define valores típicos de amortiguamiento para estructuras comunes, que se usan tanto para reducir como para incrementar las ordenadas del espectro elástico. Además, incluye los valores del coeficiente de comportamiento por ductilidad. En las tablas 4.3.8 a 4.3.11 se observan los parámetros del factor de reducción para el espectro de diseño sísmico.

Tabla 4.3.8 Parámetros del factor de reducción (Barbat, et al., 2005).

Tipo de estructura	Compartimentación	Amortiguamiento (% del crítico)	Ductilidad		
			Alta	Intermedia	Baja
Estructuras de hormigón armado o acero laminado	Diáfana	4	4	3	2
	Compartimentada	5	4	3	2
Estructuras de muros de corte	Compartimentada	6	No	No	2

Tabla 4.3.9 Factores de reducción para ductilidad alta (Barbat, et al., 2005).

Tipo de estructura	Compartimentación	Ductilidad μ	Amortiguamiento γ	Multiplicador β	Factor reductor R
Estructuras de hormigón armado o acero laminado	Diáfana	4.00	1.09	0.27	3.66
	Compartimentada	5.00	1.00	0.25	4.00

Tabla 4.3.10 Factores de reducción para ductilidad intermedia (Barbat, et al., 2005).

Tipo de estructura	Compartimentación	Ductilidad μ	Amortiguamiento γ	Multiplicador β	Factor reductor R
Estructuras de hormigón armado o acero laminado	Diáfana	3.00	1.09	0.36	2.74
	Compartimentada	3.00	1.00	0.33	3.00

Tabla 4.3.11 Factores de reducción para ductilidad baja (Barbat, et al., 2005).

Tipo de estructura	Compartimentación	Ductilidad μ	Amortiguamiento γ	Multiplicador β	Factor reductor R
Estructuras de hormigón armado o acero laminado	Diáfana	2.00	1.09	0.55	1.83
	Compartimentada	2.00	1.00	0.50	2.00
Estructuras de muros de corte	Compartimentada	2.00	0.93	0.46	2.15

Desviación de piso

En la NCSE-02 se propone el uso de la ecuación:

$$u_r = (u_r)_e \mu \frac{c}{Q} \quad \text{Ecuación 4.3.5}$$

donde u_r es el desplazamiento total de diseño de un piso, $(u_r)_e$ es el desplazamiento del mismo calculado según un análisis elástico y μ el factor de ductilidad. La normativa exige calcular el posible choque entre estructuras vecinas, pero no establece límites máximos de desplazamiento relativo, lo cual dificulta garantizar la protección de los elementos no estructurales.

Torsión e irregularidades

Tanto la norma E8 como la NCSE-02 estipulan que debe incrementarse la excentricidad entre el centro de rigidez y el centro de masa para considerar los efectos de la torsión accidental. Esta puede generarse por componentes rotacionales del sismo, posibles daños estructurales, errores de cálculo o la dificultad para ubicar con precisión los centros de masa y rigidez. El incremento considerado es del 5 % de la dimensión en planta perpendicular a la dirección analizada. El momento torsor en cada nivel se representa mediante una fuerza equivalente que se incorpora a la carga sísmica de diseño del piso correspondiente.

4.4 Análisis matricial de edificios

La metodología que se desarrolla en este trabajo de investigación se basa principalmente en el análisis matricial de edificios, para la obtención de la rigidez lateral. En este apartado se describe en que consiste dicho análisis y las ventajas que ofrece.

Los métodos matriciales permiten llevar a cabo el análisis de cualquier tipo de estructura, sin importar el tipo de carga aplicada. En la mayoría de los casos, para estructuras de edificios, resulta apropiado utilizar el método de rigideces aplicado a marcos planos.

Este método consiste en un procedimiento matemático que permite calcular desplazamientos o fuerzas internas a partir de los elementos básicos que integran la matriz de rigidez de la estructura. En el caso de un marco estructural, se construyen matrices correspondientes a vigas, columnas y diagonales que lo componen.

El procedimiento implica formar la matriz de rigidez global K de toda la estructura, utilizando una ecuación que relaciona los desplazamientos y rotaciones en los nodos con las fuerzas aplicadas.

Matriz de Rigidez global de una estructura

El análisis estructural de un sistema complejo, como un edificio, se basa en las mismas hipótesis utilizadas para analizar sistemas simples, siguiendo tres principios fundamentales: continuidad, la Ley de Hooke y equilibrio. De esta manera, la relación entre las fuerzas

sísmicas $\{F\}$ y los desplazamientos $\{d\}$ en los niveles de un edificio se describe mediante la ecuación:

$$\{F\} = [K_G]\{d\} \quad \text{Ecuación 4.4.1}$$

Aquí, $[K_G]$ es la matriz de rigidez global del edificio, obtenida de manera similar a la de sistemas estructurales simples como armaduras o marcos. Este proceso implica:

a) Aplicar desplazamientos unitarios independientes en la dirección de los grados de libertad considerados.

b) Determinar las fuerzas o rigideces en todos los elementos estructurales del sistema para cada desplazamiento aplicado.

c) Proyectar las fuerzas de todos los elementos en las direcciones de los grados de libertad.

En este caso, los desplazamientos unitarios aplicados en la losa en las direcciones u , v , y θ generan deformaciones en los marcos al proyectarse sobre sus ejes. Conociendo la deformación de los marcos en cada nivel y su matriz de rigidez lateral $[K_D]$, se pueden calcular las fuerzas resultantes de estos desplazamientos unitarios.

$$\begin{bmatrix} [K_{xx}] & [K_{xy}] & [K_{x\theta}] \\ [K_{yx}] & [K_{yy}] & [K_{y\theta}] \\ [K_{\theta x}] & [K_{\theta y}] & [K_{\theta\theta}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{u\} \\ \{v\} \\ \{\theta\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{F_x\} \\ \{F_y\} \\ \{M_z\} \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 4.4.2}$$

Una vez aplicados los desplazamientos unitarios $[u, v, \theta]$ se pueden determinar las submatrices que forman la matriz de rigidez global $[K_G]$; los valores de las submatrices son los siguientes:

$$[K_{xx}] = \sum [K_D]_j \cos^2 B_j \quad \text{Ecuación 4.4.3}$$

$$[K_{yy}] = \sum [K_D]_j \sin^2 B_j \quad \text{Ecuación 4.4.4}$$

$$[K_{xy}] = \sum [K_D]_j \cos B_j \sin B_j \quad \text{Ecuación 4.4.5}$$

$$[K_{x\theta}] = \sum [K_D]_j \cos B_j r_j \quad \text{Ecuación 4.4.6}$$

$$[K_{y\theta}] = \sum [K_D]_j \sin B_j r_j \quad \text{Ecuación 4.4.7}$$

$$[K_{xx}] = \sum [K_{DT}]_j r_j^2 \quad \text{Ecuación 4.4.8}$$

$$[K_{yx}] = [K_{xy}]^T \quad \text{Ecuación 4.4.9}$$

$$[K_{\theta x}] = [K_{x\theta}]^T \quad \text{Ecuación 4.4.10}$$

$$[K_{\theta y}] = [K_{y\theta}]^T \quad \text{Ecuación 4.4.11}$$

Para obtener los elementos mecánicos de acuerdo con la relación entre fuerzas sísmicas y desplazamientos:

$$F = K_G * d \quad \text{Ecuación 4.4.12}$$

$$d = [K_G]^{-1} * F \quad \text{Ecuación 4.4.13}$$

La relación entre las fuerzas en un marco y los desplazamientos laterales de sus niveles se establece por medio de una ecuación que aplica el principio de la Ley de Hooke:

$$F = [K_D]_j * [d]_j \quad \text{Ecuación 4.4.14}$$

Una vez determinadas las fuerzas que actúan en los distintos niveles del marco, se pueden calcular las fuerzas internas de los elementos estructurales que lo componen, utilizando métodos convencionales de análisis.

Capítulo 5. Metodología

El presente capítulo aborda una metodología matricial para obtener la rigidez lateral necesaria en edificios con irregularidades en planta y diafragmas rígidos para reducir la excentricidad estática. La rigidez lateral obtenida mediante la metodología se pretende agregar mediante contraventeos convencionales con perfiles estructurales de sección IR.

El método se basa en estudios previos en donde se obtiene la rigidez lateral mediante un procedimiento matricial, principalmente el desarrollado por [Ramírez Castañeda \(2015\)](#), en donde los resultados sobre la aplicación de ecuaciones para la obtención de centro de torsión en edificios irregulares en planta fueron confiables. Otra investigación utilizó ecuaciones condensadas, obtenidas mediante un análisis matricial de edificios, para la obtención de la rigidez lateral necesaria para una escalera, los resultados obtenidos mediante la metodología fueron similares a los obtenidos en un modelo matemático ([Salazar Moreno, 2020](#)).

5.1 Formulación matricial para modelos de un nivel

Para obtener las ecuaciones para el cálculo de la rigidez lateral se utilizó un análisis matricial, específicamente el método de las rigideces.

El método implica ensamblar la matriz de rigidez global K de una estructura, utilizando una ecuación que relaciona los desplazamientos y giros, en los nodos debido a las fuerzas aplicadas. El procedimiento para desarrollar el método matricial se explica en el capítulo 2. Las ecuaciones obtenidas mediante la metodología se dividen en tres casos:

- cuando se presenta excentricidad en la coordenada "x"
- cuando se presenta excentricidad en la coordenada "y"
- cuando se presenta excentricidad en ambas coordenadas "x" y "y"

Como se mencionó anteriormente, este trabajo toma como base las ecuaciones desarrolladas por [Ramírez Castañeda](#) para la obtención del centro de torsión, dichas ecuaciones se muestran a continuación.

$$X_{CT} = \frac{-K_{\theta x}K_{xy} + K_{\theta y}K_{xx}}{K_{xx}K_{yy} - K_{xy}^2} EI \quad \text{Ecuación 5.1.1}$$

$$Y_{CT} = \frac{-K_{\theta x}K_{yy} + K_{\theta y}K_{xy}}{K_{xx}K_{yy} - K_{xy}^2} EI \quad \text{Ecuación 5.1.2}$$

A través de algunos estudios preliminares, que consistió en realizar modelos sencillos de prueba, se confirmó que cuando se trata de un entrepiso rígido, el centro de torsión de cada nivel siempre es el mismo, por lo que para el estudio de un edificio con varios niveles se puede analizar un solo nivel, pero si se trata de un edificio con entrepiso flexible el centro de masas es diferente para cada nivel.

También se pudo observar que las ecuaciones desarrolladas por [Ramírez Castañeda \(2015\)](#) para la obtención del centro de torsión, solo son aplicables para entrepisos rígidos ya que si emplea para entrepisos flexibles los resultados arrojados no son congruentes.

Durante el desarrollo de las ecuaciones, se observó que una estructura con irregularidad en planta requiere rigidez lateral en ambas direcciones principales, por lo que para ejemplificar la aplicación de las ecuaciones propuestas en situaciones donde únicamente se necesita incrementar la rigidez en una sola dirección, se emplearon plantas regulares con irregularidad en la rigidez lateral. No obstante, es importante aclarar que el caso de estudio principal, descrito previamente, corresponde a una estructura con irregularidad en planta.

5.1.1 Estructura con asimetría en la dirección “x”

Cuando una estructura tiene excentricidad en la coordenada “x” significa que hay elementos estructurales perpendiculares a dicha coordenada que están aportando mayor rigidez que todos los demás, por lo tanto, se debe agregar rigidez lateral a un marco de la estructura que esté perpendicular a dicha coordenada “x”.

Para conocer la rigidez lateral necesaria primeramente se obtiene la matriz global de la estructura, los valores de las sub-matrices se pueden determinar de la siguiente manera, en donde:

- r_{jy} es el valor de r_j del marco elegido paralelo a la dirección “y”
- K_{Dy} es la rigidez que debe tener el marco elegido paralelo a la dirección “y”

$$K_{xx} = \Sigma K_D \cos^2 \beta_j = K_{xx} EI \quad \text{Ecuación 5.1.3}$$

$$K_{xy} = \Sigma K_D \cos \beta_j * \sen \beta_j = K_{xy} EI \quad \text{Ecuación 5.1.4}$$

$$K_{yy} = \Sigma K_D \sen^2 \beta_j + K_{Dy} = (K_{yy1} + K_{Dy}) EI \quad \text{Ecuación 5.1.5}$$

$$K_{x\theta} = \Sigma K_D \cos r_j = K_{x\theta} EI \quad \text{Ecuación 5.1.6}$$

$$K_{y\theta} = \Sigma K_D \sen r_j + r_{jy} K_{Dy} = (K_{y\theta1} + r_{jy} K_{Dy}) EI \quad \text{Ecuación 5.1.7}$$

$$K_{\theta\theta} = \Sigma K_D r_j^2 + r_{jy}^2 K_{Dy} = (K_{\theta\theta1} + r_{jy}^2 K_{Dy}) EI \quad \text{Ecuación 5.1.8}$$

$$KG = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{x\theta} \\ K_{xy} & (K_{yy1} + K_{Dy}) & (K_{y\theta1} + r_{jy} K_{Dy}) \\ K_{x\theta} & (K_{y\theta1} + r_{jy} K_{Dy}) & (K_{\theta\theta1} + r_{jy}^2 K_{Dy}) \end{bmatrix} EI$$

Si se elige el centro de masas como el sistema de referencia global y si este se localiza en las coordenadas (0,0), igualando la coordenada “x” del centro de masas, CM, con la coordenada “x” del centro de torsión CT, se puede despejar K_{Dy} para conocer su valor correspondiente.

Igualando X_{CM} con X_{CT}

$$X_{CT} = \frac{-K_{\theta x} K_{xy} + K_{\theta y} K_{xx}}{K_{xx} K_{yy} - K_{xy}^2}$$

$$0 = \frac{-K_{x\theta} K_{xy} + (K_{y\theta 1} + r_{jy} K_{Dy})(K_{xx})}{(K_{xx})(K_{yy1} + K_{Dy}) - K_{xy}^2}$$

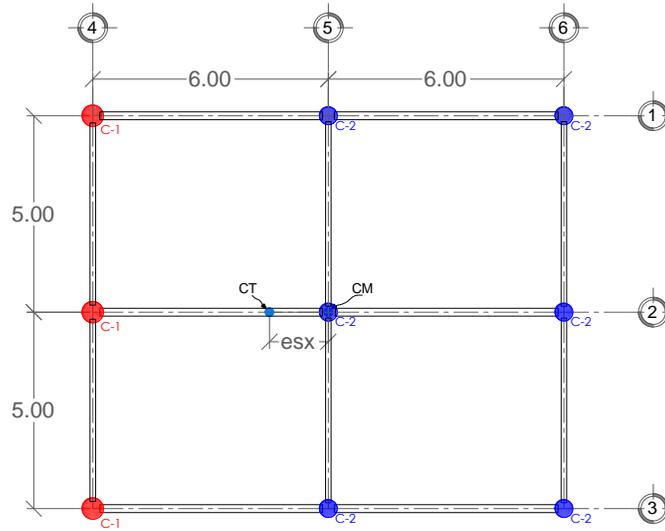
$$-K_{x\theta} K_{xy} + K_{y\theta 1} K_{xx} + r_{jy} K_{Dy} K_{xx} = 0$$

Simplificando la ecuación

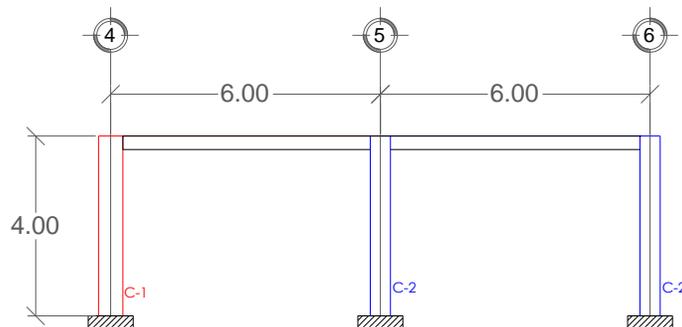
$$K_{Dy} = \frac{K_{x\theta} K_{xy} - K_{y\theta 1} K_{xx}}{r_{jy} K_{xx}}$$

Ecuación 5.1.9

Ejemplo de aplicación



Vista en planta



Vista en elevación

Figura 5.1.1 Ejemplo de excentricidad estática en "x" (elaboración propia).

De acuerdo con el ejemplo mostrado en la figura 5.1.1, es evidente que debido a la presencia de columnas con mayor diámetro en el eje 4, el centro de torsión se inclina más hacia la izquierda. Para disminuir la distancia entre el centro de torsión (CT) y el centro de masas (CM) se deben añadir mayor rigidez en el eje 6 de la estructura.

Para poder implementar la ecuación anteriormente obtenida se siguió el siguiente procedimiento.

- 1. Obtención la rigidez lateral de cada marco:** para ello se aplica un desplazamiento unitario en cada nivel y las fuerzas generadas son iguales a $\frac{12}{H^3}EI$ en cada columna. Los valores del módulo de elasticidad (E) y de la inercia (I) se consideraron como valores constantes. La columna C1 se consideró con el doble de inercia de la columna C2.

Marco 1,2 y 3

$$K_{D1} = K_{D2} = K_{D3} = \frac{12(2)}{4^3} + 2 \frac{12}{4^3} = 0.750 EI$$

Marco 4

$$K_{D4} = 3 \frac{12(2)}{4^3} = 1.125 EI$$

Marco 5 y 6

$$K_{D5} = K_{D6} = 3 \frac{12}{4^3} = 0.563 EI$$

- 2. Obtención de la matriz de rigidez global:** es necesario obtener los valores de cada una de las sub-matrices que para este caso específico son valores escalares ya que es una estructura de un solo nivel. Para este ejemplo se considera que el centro de masas se localiza en las coordenadas 0,0, CM= (0,0), a partir de ello se obtuvieron las coordenadas de cada marco de la estructura, las cuales se observan en la siguiente tabla.

Tabla 5.1.1 Valores de la rigidez lateral, ejemplo con excentricidad en "x" (elaboración propia)

Marco	x	y	CosBj	SenBj	rj	KD
1	-6	5	1	0	-5	0.750
2	-6	0	1	0	0	0.750
3	-6	-5	1	0	5	0.750
4	-6	-5	0	1	-6	1.125
5	0	-5	0	1	0	0.563
6	6	-5	0	1	6	0.563

Utilizando las ecuaciones 4.4.2 a 4.4.8, del capítulo anterior se obtienen los valores de las submatrices, posteriormente se obtendrá de nuevo la matriz de rigidez global pero ahora dejando como incógnita la rigidez lateral KD , del marco al cual se le agregará rigidez lateral para modificar el centro de torsión de la estructura, la diferencia entre la rigidez lateral que se debe agregar y la rigidez lateral que posee el marco es el resultado

de la rigidez que deben aportar los contraventeos para disminuir la excentricidad estática.

De esta manera le valor de cada submatriz es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 K_{xx} &= \Sigma K_D \cos^2 \beta_j = 2.250 EI \\
 K_{xy} &= \Sigma K_D \cos \beta_j * \sen \beta_j = 0.000 \\
 K_{yy} &= \Sigma K_D \sen^2 \beta_j = 2.250 EI \\
 K_{x\theta} &= \Sigma K_D \cos r_j = 0.000 EI \\
 K_{y\theta} &= \Sigma K_D \sen r_j = -3.375 EI \\
 K_{\theta\theta} &= \Sigma K_D r_j^2 = 98.250 EI
 \end{aligned}$$

La matriz de rigidez global queda de la siguiente manera:

$$KG = \begin{bmatrix} 2.250 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 2.250 & -3.375 \\ 0.000 & -3.375 & 98.250 \end{bmatrix} EI$$

3. Obtención del centro de torsión: como se mencionó anteriormente, el método se basa en las ecuaciones desarrolladas por **Ramírez Castañeda (2015)** para la obtención del centro de torsión, utilizando las ecuaciones 5.1.1 y 5.1.2

De esta manera el centro de torsión de la estructura es:

$$X_{CT} = \frac{-(0 * 0) + (-3.375 * 2.25)}{(2.25 * 2.25) - 0^2} = -1.50$$

Ecuación 5.1.10

$$Y_{CT} = \frac{-(-0 * 2.25) + (-3.375 * 0)}{(2.25 * 2.25) - 0^2} = 0.00$$

Ecuación 5.1.11

$$X_{CM} = 0; Y_{CM} = 0$$

Se identifica que el centro de torsión, CT= (-1.5,0) no está en el mismo punto donde se localiza el centro de masas, CM= (0,0), por lo que existe una excentricidad estática. Se observa que la coordenada en Y_{CT} si coincide con la coordenada Y_{CM} del centro de masas, pero pasa lo contrario con la coordenada en X_{CT} y X_{CM}.

Para poder corregir la excentricidad se propone agregar más rigidez en el marco no.6, se ha elegido este marco porque al saber que el centro de torsión se concentra en el lado izquierdo de la estructura, vista en planta, es entendible que se debe agregar rigidez del lado contrario, además se ha elegido el marco no.6 por ser el más alejado del centro de

torsión, esto permite que el brazo de palanca sea mayor y que por lo tanto la rigidez necesaria para corregir el centro de torsión sea la mínima posible.

Partiendo de la explicación anterior, ahora se desarrolla el mismo ejemplo, pero dejando como incógnita K_{D6} con la finalidad de obtener el valor de la rigidez necesaria en el marco 6 para que la excentricidad sea casi nula.

4. Obtención de la rigidez lateral dejando como incógnita un marco de la estructura:
Las rigideces de cada marco son las mismas a excepción del marco no.6

$$K_{D6} = K_{D6} \text{ (incógnita)}$$

5. Obtención de la nueva matriz de rigidez global: utilizando las ecuaciones 5.1.3 a 5.1.8, se obtienen los valores de la matriz de rigidez global, y son los siguientes:

$$K_{xx} = \Sigma K_D \cos^2 \beta_j = 3(0.75) = 2.250 EI$$

$$K_{xy} = \Sigma K_D \cos \beta_j * \text{sen} \beta_j = 0.000 EI$$

$$K_{yy} = \Sigma K_D \text{sen}^2 \beta_j = 1.125 + 0.5625 + K_{D6} = (1.688 + K_{D6}) EI$$

$$K_{x\theta} = \Sigma K_D \cos r_j = (-5 * 0.75) + (-10 * 0.75) = 0.000 EI$$

$$K_{y\theta} = \Sigma K_D \text{sen} r_j = (0.5625 * 6) + (0.5625 * 12) = (-6.750 + 12K_{D6}) EI$$

$$K_{\theta\theta} = \Sigma K_D r_j^2 = (25 * 0.75) + (100 * 0.75) + (36 * 0.5625) + (144 * K_{D6}) \\ = (78 + 144 K_{D6}) EI$$

6. Obtención de la rigidez lateral para disminuir la excentricidad estática:

Sustituyendo los valores anteriores en la ecuación 5.1.9

$$K_{Dy} = \frac{K_{x\theta} K_{xy} - K_{y\theta} K_{xx}}{r_j K_{xx}}$$

$$K_{D6} = \frac{-(6.750 + 12K_{D6})(2.25)}{6(2.25)}$$

Resolviendo

$$-13.5 K_{D6} = -15.1875$$

$$K_{D6} = \frac{-15.187}{-13.5} = 1.125 EI \quad \text{Ecuación 5.1.12}$$

La rigidez que deben aportar los contraventeos es la diferencia entre la rigidez lateral que debe tener el marco No.6 y la rigidez que tiene actualmente.

$$K_{CTV} = 1.125 EI - 0.5625 EI = 0.5625 EI \quad \text{Ecuación 5.1.13}$$

5.1.2 Estructura con asimetría en la dirección “y”

Cuando una estructura tiene excentricidad en la coordenada “y”, es similar al caso anterior, es decir, hay elementos de la estructura que están aportando mucha más rigidez lateral que todos los demás, pero estos se localizan en los marcos perpendiculares a dicha coordenada “y”.

Los valores de las sub-matrices se pueden determinar de la siguiente manera, en donde:

- R_{j_x} es el valor de r_j del marco elegido en la dirección “x”
- K_{D_x} es la rigidez que debe tener el marco elegido en la dirección “x”

$$K_{xx} = \Sigma K_D \cos^2 \beta_j = (K_{xx1} + K_{D_x}) EI \quad \text{Ecuación 5.1.14}$$

$$K_{xy} = \Sigma K_D \cos \beta_j * \operatorname{sen} \beta_j = K_{xy} EI \quad \text{Ecuación 5.1.15}$$

$$K_{yy} = \Sigma K_D \operatorname{sen}^2 \beta_j + K_{D_y} = K_{yy} EI \quad \text{Ecuación 5.1.16}$$

$$K_{x\theta} = \Sigma K_D \cos r_j = (K_{x\theta1} + r_{j_x} K_{D_x}) EI \quad \text{Ecuación 5.1.17}$$

$$K_{y\theta} = \Sigma K_D \operatorname{sen} r_j + r_{j_y} K_{D_y} = K_{y\theta} EI \quad \text{Ecuación 5.1.18}$$

$$K_{\theta\theta} = \Sigma K_D r_j^2 + r_{j_y}^2 K_{D_y} = (K_{\theta\theta1} + r_{j_x}^2 K_{D_x}) EI \quad \text{Ecuación 5.1.19}$$

$$KG = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{x\theta} \\ K_{xy} & (K_{yy1} + K_{D_y}) & (K_{y\theta1} + r_{j_y} K_{D_y}) \\ K_{x\theta} & (K_{y\theta1} + r_{j_y} K_{D_y}) & (K_{\theta\theta1} + r_{j_x}^2 K_{D_x}) \end{bmatrix} EI$$

Si se elige el centro de masas como el sistema de referencia global y si este se localiza en las coordenadas (0,0), igualando la coordenada “y” del CM con la coordenada “y” del CT, se puede despejar K_{D_x} para conocer su valor correspondiente.

Igualando Y_{CM} con Y_{CT}

$$Y_{CT} = \frac{-K_{\theta_x} K_{yy} + K_{\theta_y} K_{xy}}{K_{xx} K_{yy} - K_{xy}^2}$$

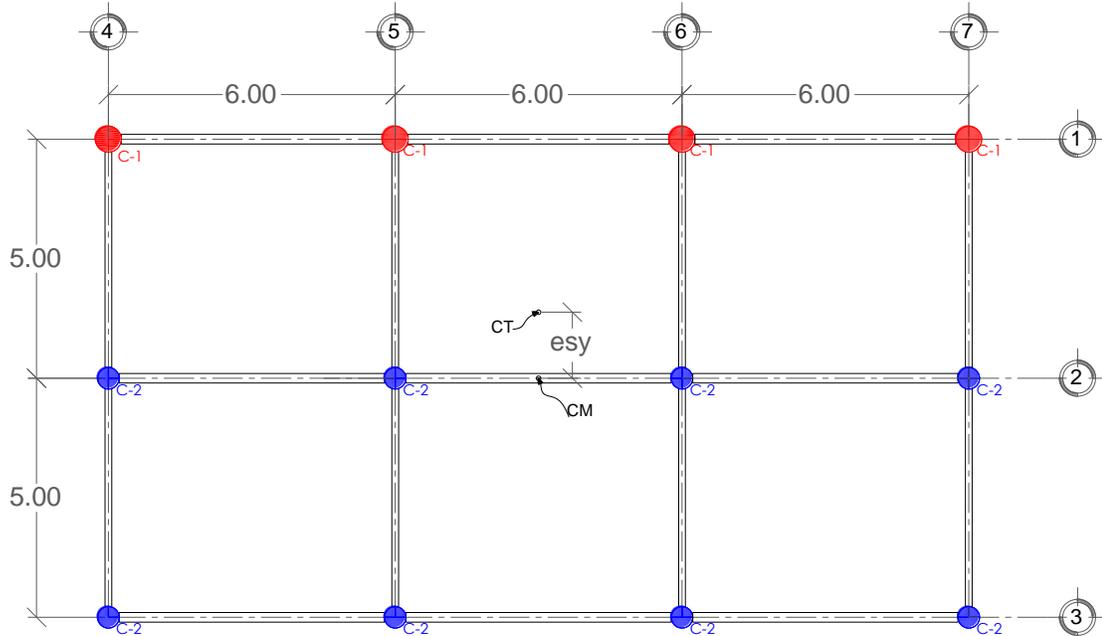
$$0 = \frac{-(K_{x\theta1} + r_{j_x} K_{D_x}) (K_{yy}) + K_{y\theta} K_{xy}}{(K_{xx1} + K_{D_x})(K_{yy}) - K_{xy}^2}$$

$$-K_{x\theta1} K_{yy} - r_{j_x} K_{D_x} K_{yy} + K_{y\theta} K_{xy} = 0$$

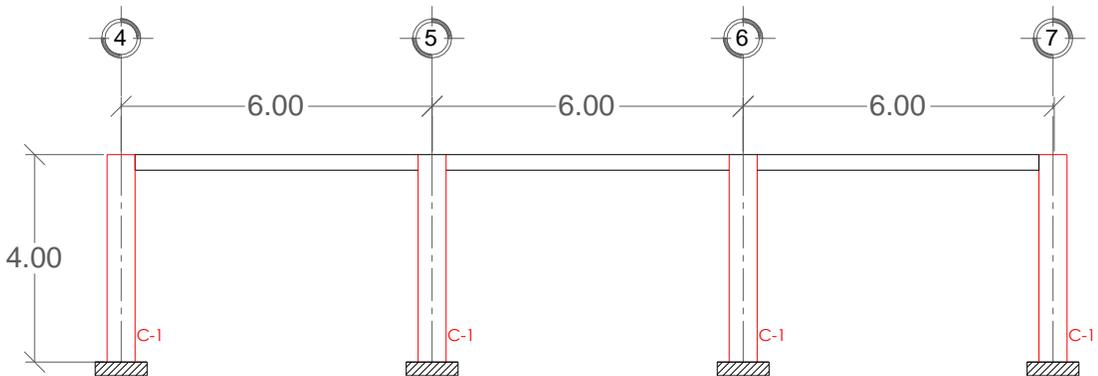
Simplificando la ecuación

$$K_{D_x} = \frac{-K_{x\theta1} K_{yy} + K_{y\theta} K_{xy}}{r_{j_x} K_{yy}} \quad \text{Ecuación 5.1.20}$$

Ejemplo de aplicación



Vista en planta



Vista en elevación

Figura 5.1.2 Ejemplo de excentricidad estática en "y" (elaboración propia).

Para poder implementar la ecuación desarrollada para este caso, se siguieron los mismos pasos que el ejemplo anterior. Los valores del módulo de elasticidad (E) y de la inercia (I) se consideraron como valores constantes, la columna C1 se consideró con el doble de inercia de la columna C2. En la figura 5.1.2 se observan las características del ejemplo de aplicación.

3. Obtención la rigidez lateral de cada marco:

Marco 1

$$K_{D1} = 4 \frac{12(2)}{4^3} = 1.125 EI$$

Marco 2 y 3

$$K_{D2} = K_{D3} = 4 \frac{12}{4^3} = 0.750 EI$$

Marco 4,5,6 y 7

$$K_{D4} = \frac{12(2)}{4^3} + 2 \frac{12}{4^3} = 0.750 EI$$

7. Obtención de la matriz de rigidez global: de igual manera que el ejemplo anterior, para este ejemplo se considera que el centro de masas se localiza en las coordenadas 0,0, CM= (0,0), a partir de ello se obtuvieron las coordenadas de cada marco de la estructura que se observan a continuación.

Tabla 5.1.2 Valores de la rigidez lateral, ejemplo con excentricidad en "y" (elaboración propia)

Marco	x	y	CosBj	SenBj	rj	KD
1	-9	5	1	0	-5	1.125
2	-9	0	1	0	0	0.750
3	-9	-5	1	0	5	0.750
4	-9	5	0	1	-9	0.750
5	-3	5	0	1	-3	0.750
6	3	5	0	1	3	0.750
7	9	5	0	1	9	0.750

Los valores que cada submatriz son los siguientes:

$$K_{xx} = \Sigma K_D \cos^2 \beta_j = 2.625 EI$$

$$K_{xy} = \Sigma K_D \cos \beta_j * \sen \beta_j = 0.000$$

$$K_{yy} = \Sigma K_D \sen^2 \beta_j = 3.000 EI$$

$$K_{x\theta} = \Sigma K_D \cos r_j = -1.875 EI$$

$$K_{y\theta} = \Sigma K_D \sen r_j = 0.000 EI$$

$$K_{\theta\theta} = \Sigma K_D r_j^2 = 181.875 EI$$

La matriz de rigidez global queda de la siguiente manera:

$$KG = \begin{bmatrix} 2.625 & 0.000 & -1.875 \\ 0.000 & 3.000 & 0.000 \\ -1.875 & 0.000 & 181.875 \end{bmatrix} EI$$

8. Obtención del centro de torsión: se utilizaron las ecuaciones desarrolladas por **Ramírez Castañeda (2015)** para la obtención del centro de torsión. De esta manera el centro de torsión de la estructura es:

$$X_{CT} = \frac{-(-1.875 * 0.000) + (0.000 * 2.625)}{(2.625 * 3.000) - 0.000^2} = 0.000$$

Ecuación 5.1.21

$$Y_{CT} = \frac{-(-1.875 * 3.000) + (0.000 * 0.000)}{(2.625 * 3.000) - 0.000^2} = 0.714$$

Ecuación 5.1.22

Se identifica que el centro de torsión, CT= (0,0.714) no está en el mismo punto donde se localiza el centro de masas, CM= (0,0). Se observa que la coordenada en X_{CT} si coincide con la coordenada X_{CM} del centro de masas, pero pasa lo contrario con la coordenada en Y_{CT} y Y_{CM} .

Para poder corregir la excentricidad se propone agregar más rigidez en el marco no.3, ahora se desarrolla el mismo ejemplo, pero dejando como incógnita K_{D3} con la finalidad de obtener el valor de la rigidez necesaria en el marco 6 para que la excentricidad sea casi nula.

9. Obtención de la rigidez lateral dejando como incógnita un marco de la estructura: Las rigideces de cada marco son las mismas a excepción del marco no.3

$$K_{D3} = K_{D3} \text{ (incógnita)}$$

10. Obtención de la nueva matriz de rigidez global: utilizando las ecuaciones 5.1.14 a 5.1.19, se obtienen los valores de cada submatriz, y son los siguientes:

$$K_{xx} = \Sigma K_D \cos^2 \beta_j = (1.875 + K_{D3}) EI$$

$$K_{xy} = \Sigma K_D \cos \beta_j * \sen \beta_j = 0.000 EI$$

$$K_{yy} = \Sigma K_D \sen^2 \beta_j + K_{Dy} = 3.000 EI$$

$$K_{x\theta} = \Sigma K_D \cos r_j = (-5.625 + 5K_3) EI$$

$$K_{y\theta} = \Sigma K_D \sen r_j + r_{jy} K_{Dy} = 0.000 EI$$

$$K_{\theta\theta} = \Sigma K_D r_j^2 + r_{jy}^2 K_{Dy} = (1.63.125 + 25K_{D3}) EI$$

11. Obtención de la rigidez lateral para disminuir la excentricidad estática: sustituyendo los valores anteriores en la ecuación 5.1.20 para obtener la rigidez lateral

la cual permita que el centro de torsión, CT se localice casi en el mismo lugar que el centro de masas, CM, se obtiene lo siguiente:

$$K_{Dx} = \frac{-K_{x\theta} K_{yy} + K_{y\theta} K_{xy}}{rj_x K_{yy}}$$

$$K_{D3} = \frac{-(-5.625)(3.000)}{5.000(3.000)}$$

Resolviendo

$$15 K_{D3} = 16.875$$

$$K_{D3} = \frac{16.875}{15} = 1.125 EI \quad \text{Ecuación 5.1.23}$$

La rigidez que deben aportar los contraventeos es la diferencia entre la rigidez lateral que debe tener el marco No.3 y la rigidez que tiene actualmente.

$$K_{CTV} = 1.125 EI - 0.750 EI = 0.375 EI \quad \text{Ecuación 5.1.24}$$

5.1.3 Estructura con asimetría en ambas direcciones, “x” y “y”

Cuando se requiere agregar rigidez a dos marcos de la estructura, uno para corregir la excentricidad en la dirección “x” y otro para la dirección “y” significa en las dos direcciones principales de la estructura hay elementos que están aportando mayor rigidez lateral que todos los demás o que debido a la forma irregular en planta de la estructura la distribución de los elementos que aportan rigidez lateral (columnas) genera una excentricidad estática, aunque todos los elementos sean iguales.

Los valores de las sub-matrices se pueden determinar de la siguiente manera, en donde:

- rj_x es el valor de rj del marco elegido en la dirección “x”
- rj_y es el valor de rj del marco elegido en la dirección “y”
- K_{Dx} es la rigidez que debe tener el marco elegido en la dirección “x”
- K_{Dy} es la rigidez que debe tener el marco elegido en la dirección “y”

$$K_{xx} = \Sigma K_D \cos^2 \beta_j + K_{Dx} = (K_{xx1} + K_{Dx}) EI \quad \text{Ecuación 5.1.25}$$

$$K_{xy} = \Sigma K_D \cos \beta_j * \text{sen} \beta_j = K_{xy} EI \quad \text{Ecuación 5.1.26}$$

$$K_{yy} = \Sigma K_D \text{sen}^2 \beta_j + K_{Dy} = (K_{yy1} + K_{Dy}) EI \quad \text{Ecuación 5.1.27}$$

$$K_{x\theta} = \Sigma K_D \cos rj + rj_x K_{Dx} = (K_{x\theta 1} + rj_x K_{Dx}) EI \quad \text{Ecuación 5.1.28}$$

$$K_{y\theta} = \Sigma K_D \operatorname{sen} rj + rj_y K_{Dy} = (K_{y\theta 1} + rj_y K_{Dy}) EI \quad \text{Ecuación 5.1.29}$$

$$K_{\theta\theta} = \Sigma K_D rj^2 + rj_x^2 K_{Dx} + rj_y^2 K_{Dy}$$

$$K_{\theta\theta} = (K_{\theta\theta 1} + rj_x^2 K_{Dx} + rj_y^2 K_{Dy}) EI \quad \text{Ecuación 5.1.30}$$

Si se elige el centro de masas como el sistema de referencia global y si este se localiza en las coordenadas (0,0) igualando el CM con el CT, se pueden despejar las incógnitas K_{Dx} y K_{Dy} para conocer sus valores correspondientes.

Igualando X_{CM} con X_{CT}

$$X_{CT} = \frac{-K_{\theta x} K_{xy} + K_{\theta y} K_{xx}}{K_{xx} K_{yy} - K_{xy}^2}$$

$$0 = \frac{-(K_{x\theta 1} + rj_x K_{Dx})(K_{xy}) + (K_{y\theta 1} + rj_y K_{Dy})(K_{xx1} + K_{Dx})}{(K_{xx1} + K_{Dx})(K_{yy1} + K_{Dy}) - K_{xy}^2}$$

$$-K_{x\theta 1} K_{xy} - rj_x K_{Dx} K_{xy} + K_{y\theta 1} K_{xx1} + rj_y K_{Dy} K_{xx1} + K_{y\theta 1} K_{Dx} + rj_y K_{Dy} K_{Dx} = 0$$

Simplificando la ecuación

$$K_{Dy} = \frac{K_{Dx}(rj_x K_{xy} - K_{y\theta 1}) + K_{x\theta 1} K_{xy} - K_{y\theta 1} K_{xx1}}{rj_y K_{Dx} + rj_y K_{xx1}} \quad \text{Ecuación 5.1.31}$$

Igualando Y_{CM} con Y_{CT}

$$Y_{CT} = \frac{-K_{\theta x} K_{yy} + K_{\theta y} K_{xy}}{K_{xx} K_{yy} - K_{xy}^2}$$

$$0 = \frac{-(K_{x\theta 1} + rj_x K_{Dx})(K_{yy1} + K_{Dy}) + (K_{y\theta 1} + rj_y K_{Dy})(K_{xy})}{(K_{xx1} + K_{Dx})(K_{yy1} + K_{Dy}) - K_{xy}^2}$$

$$-(K_{x\theta 1} + rj_x K_{Dx})(K_{yy1} + K_{Dy}) + (K_{y\theta 1} + rj_y K_{Dy})(K_{xy}) = 0$$

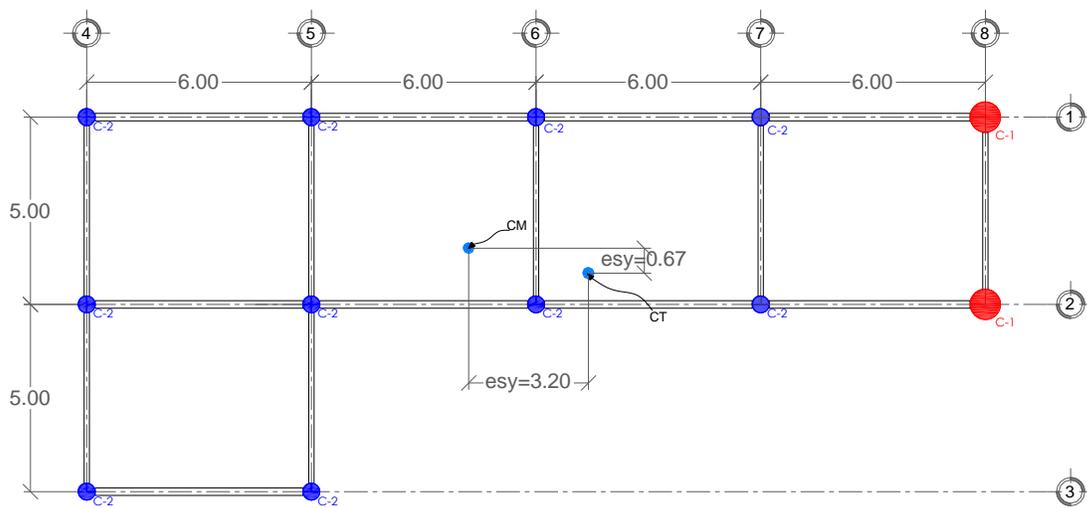
$$-K_{x\theta 1} K_{yy1} - rj_x K_{Dx} K_{yy1} - K_{x\theta 1} K_{Dy} - rj_x K_{Dx} K_{Dy} + K_{y\theta 1} K_{xy} + rj_y K_{Dy} K_{xy} = 0$$

Simplificando la ecuación:

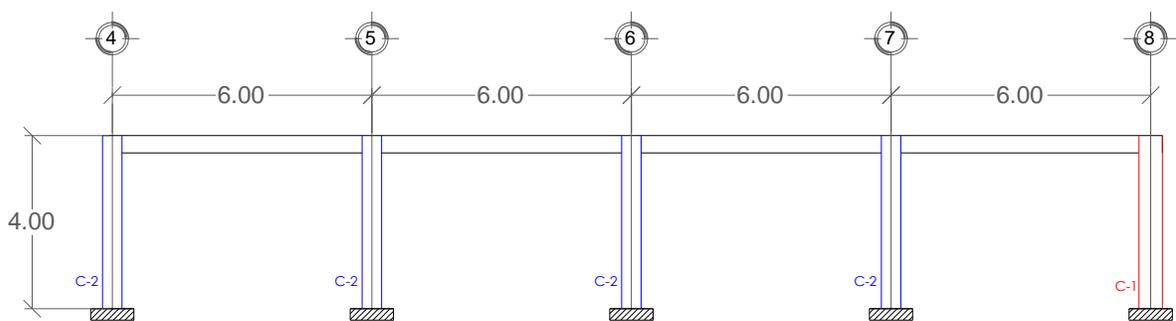
$$K_{Dy} = \frac{rj_x K_{Dx} K_{yy1} + K_{x\theta1} K_{yy1} - K_{y\theta1} K_{xy}}{rj_y K_{xy} - K_{x\theta1} - rj_x K_{Dx}} \quad \text{Ecuación 5.1.32}$$

Igualando los resultados de las ecuaciones 5.1.31 y 5.1.32 podemos obtener la rigidez del marco en la dirección "x" K_{Dx} , para ello se debe de despejar dicha incógnita una vez sustituidos los valores de las submatrices.

Ejemplo de aplicación



Vista en planta



Vista en elevación

Figura 5.1.3 Ejemplo de excentricidad estática en las dos direcciones de edificio (elaboración propia).

Para implementar la ecuación desarrollada se siguieron los mismos pasos que los ejemplos anteriores. Los valores del módulo de elasticidad (E) y de la inercia (I) se consideraron como valores constantes, la columna C1 se consideró con el triple de inercia

de la columna C2. En la figura 5.1.3 se muestra la vista en planta y en elevación de este ejemplo de aplicación.

1. Obtención la rigidez lateral de cada marco:

Los valores de la rigidez lateral de cada marco se obtuvieron de la misma manera que los dos ejemplos anteriores.

2. Obtención de la matriz de rigidez global: de igual manera, para este ejemplo se considera que el centro de masas se localiza en las coordenadas 0,0, CM= (0,0), a partir de ello se obtuvieron las coordenadas de cada marco de la estructura, dichas coordenadas se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5.1.3 Valores de la rigidez lateral, ejemplo con excentricidad en "x" y en "y" (elaboración propia)

MARCO	Xi	Yi	COS	SEN	RJ	KD
1	-10.2	3.5	1	0	-3.50	1.313
2	-10.2	-1.5	1	0	1.50	1.313
3	-10.2	-6.5	1	0	6.50	0.750
4	-10.2	3.5	0	1	-10.20	1.688
5	-4.2	3.5	0	1	-4.20	0.563
6	1.8	3.5	0	1	1.80	0.375
7	7.8	3.5	0	1	7.80	0.375
8	13.8	3.5	0	1	13.80	0.375

Los valores de las submatrices son los siguientes:

$$K_{xx} = \Sigma K_D \cos^2 \beta_j = 3.375 EI$$

$$K_{xy} = \Sigma K_D \cos \beta_j * \sen \beta_j = 0.000$$

$$K_{yy} = \Sigma K_D \sen^2 \beta_j = 3.375 EI$$

$$K_{x\theta} = \Sigma K_D \cos r_j = 2.250 EI$$

$$K_{y\theta} = \Sigma K_D \sen r_j = -10.800 EI$$

$$K_{\theta\theta} = \Sigma K_D r_j^2 = 331.654 EI$$

La matriz de rigidez global queda de la siguiente manera:

$$KG = \begin{bmatrix} 3.375 & 0.000 & 2.250 \\ 0.000 & 3.375 & -10.800 \\ 2.250 & -10.800 & 331.654 \end{bmatrix} EI$$

3. Obtención del centro de torsión: utilizando las ecuaciones desarrolladas por **Ramírez Castañeda (2015)** se obtiene el centro de torsión.

$$X_{CT} = \frac{-(2.250 * 0.000) + (-10.800 * 3.375)}{(3.375 * 3.375) - 0.000^2} = -3.200$$

Ecuación 5.1.33

$$Y_{CT} = \frac{-(2.250 * 3.375) + (-10.800 * 0.000)}{(3.375 * 3.375) - 0.000^2} = -0.667$$

Ecuación 5.1.34

Se identifica que el centro de torsión, CT= (-3.200,-0.667) no está en el mismo punto donde se localiza el centro de masas, CM= (0,0).

Para poder corregir la excentricidad se propone agregar más rigidez en el marco no.1, y marco no.8, ahora se desarrolla el mismo ejemplo, pero dejando como incógnita K_{D1} y K_{D8} con la finalidad de obtener el valor de la rigidez necesaria en el marco 1 y 8 para que la excentricidad sea casi nula.

- 4. Obtención de la rigidez lateral dejando como incógnita dos marcos de la estructura:** Las rigideces de cada marco son las mismas a excepción del marco no.1 y no.8

$$K_{D1} = K_{D1} \text{ (incógnita)}$$

$$K_{D8} = K_{D8} \text{ (incógnita)}$$

- 5. Obtención de la nueva matriz de rigidez global:** utilizando las ecuaciones 5.1.25 a 5.1.30, se obtienen los valores de cada submatriz de rigidez global, y son los siguientes:

$$K_{xx} = \Sigma K_D \cos^2 \beta_j + K_{Dx} = (2.063 + K_{D1}) EI$$

$$K_{xy} = \Sigma K_D \cos \beta_j * \sen \beta_j = 0.000 EI$$

$$K_{yy} = \Sigma K_D \sen^2 \beta_j + K_{Dy} = (3.000 + K_{D8}) EI$$

$$K_{x\theta} = \Sigma K_D \cos r_j + r_{jx} K_{Dx} = (6.844 - 3.500 K_{D1}) EI$$

$$K_{y\theta} = \Sigma K_D \sen r_j + r_{jy} K_{Dy} = (-15.975 + 13.800 K_{D8}) EI$$

$$K_{\theta\theta} = (K_{\theta\theta 1} + r_{jx}^2 K_{Dx} + r_{jy}^2 K_{Dy}) EI = 244.161 + 12.25 K_{D1} + 190.44 K_{D8}$$

- 6. Obtención de la rigidez lateral para disminuir la excentricidad estática:** sustituyendo los valores anteriores en las ecuaciones 5.1.31 y 5.1.32 para obtener la rigidez lateral la cual permita que el centro de torsión, CT se localice casi en el mismo lugar que el centro de masas, CM, se obtiene lo siguiente:

$$K_{Dy} = \frac{K_{Dx}(r_{jx} K_{xy} - K_{y\theta 1}) + K_{x\theta 1} K_{xy} - K_{y\theta 1} K_{xx 1}}{r_{jy} K_{Dx} + r_{jy} K_{xx 1}}$$

$$K_{D8} = \frac{K_{D1}(13.8 * 0 - (-15.975)) + (6.844 * 0) - (-15.975 * 2.063)}{13.8K_{D1} + (13.8 * 2.063)}$$

Simplificando

$$K_{D8} = \frac{15.975K_{D1} + 32.956}{13.8K_{D1} + 28.469} \quad \text{Ecuación 5.1.35}$$

$$K_{Dy} = \frac{rj_x K_{Dx} K_{yy1} + K_{x\theta1} K_{yy1} - K_{y\theta1} K_{xy}}{rj_y K_{xy} - K_{x\theta1} - rj_x K_{Dx}}$$

$$K_{D8} = \frac{K_{D1}(13.8 * 3) + (6.844 * 3.000) - (-15.975 * 0)}{(-3.5 * 0) - 6.844 - (-3.500K_{D1})}$$

Simplificando

$$K_{D8} = \frac{41.4K_{D1} + 20.532}{3.500K_{D1} - 6.844} \quad \text{Ecuación 5.1.36}$$

Igualando ambas ecuaciones

$$K_{D8} = K_{D8}$$

$$\frac{15.975K_{D1} + 32.956}{13.8K_{D1} + 28.469} = \frac{41.4K_{D1} + 20.532}{3.500K_{D1} - 6.844}$$

Resolviendo

$$K_{D1} = 1.955 \quad \text{Ecuación 5.1.37}$$

Para obtener el valor de K_{D8} se sustituye en valor de K_{D1} en la ecuación 5.1.35

$$K_{D8} = \frac{15.975(1.955) + 32.956}{13.8(1.955) + 28.469} = 1.158 EI$$

Ecuación 5.1.38

La rigidez que deben aportar los contraventeos en el marco no.1 es la siguiente:

$$K_{CTVX} = 1.955 - 1.313 = 0.642 EI \quad \text{Ecuación 5.1.39}$$

Para el marco no.8 la rigidez que deben aportar los contraventeos es la siguiente:

$$K_{CTVY} = 1.158 - 0.375 = 0.783 EI \quad \text{Ecuación 5.1.40}$$

Capítulo 6. Casos de estudio

Para poder validar de mejor manera la eficacia de la metodología explicada en el capítulo anterior, se analizan tres modelos con forma geométrica en “L” de 1,5 y 10 niveles para los cuales se obtuvo la rigidez lateral necesaria para hacer coincidir su centro de torsión con el centro de masas, se obtuvieron las fuerzas laterales mediante el método estático para el análisis sísmico y se elaboró un modelo con ayuda del programa SAP2000.

6.1 Modelo de 1 nivel

A continuación, se describen las características generales del primer caso de estudio, dichas características son las mismas a considerar para los tres casos, tales como: tipo de material, localización y zona sísmica.

Se realizarán dos modelos para cada caso de estudio, uno sin considerar contraventeos y otro con contraventeos para la adición de rigidez lateral en los marcos más convenientes de la estructura. En ambos modelos la variable que se compara es la torsión sísmica, para lo cual se obtuvieron las distorsiones, excentricidades en los entrepisos y los desplazamientos laterales en cada nivel.

Localización

Para el análisis sísmico se eligió una de las regiones con mayor peligro sísmico en el país: la ciudad de Acapulco, Guerrero, ubicada en la zona sísmica tipo D, donde los sismos son frecuentes y de alta intensidad, según el reglamento del INIFED. Cabe mencionar que la selección de esta zona o de cualquier otra no condiciona los resultados del estudio, ya que el objetivo principal del trabajo es desarrollar una metodología orientada a mejorar el comportamiento estructural frente a acciones torsionales en edificios irregulares.

En este sentido, la magnitud de las fuerzas sísmicas no representa un parámetro determinante que altere los resultados obtenidos, puesto que el método propuesto en este trabajo no depende del tamaño de dichas fuerzas, sino de la diferencia que se genera en la respuesta estructural entre un edificio con alta excentricidad estática y uno en la que ésta se ha disminuido lo más posible debido a la adición de elementos de rigidez como los contraventeos, particularmente en lo que respecta a la reducción de la excentricidad estática. Por lo tanto, si la metodología logra reducir dicha excentricidad, podrá considerarse aplicable en edificaciones localizadas en cualquier región, independientemente de su nivel de demanda sísmica.

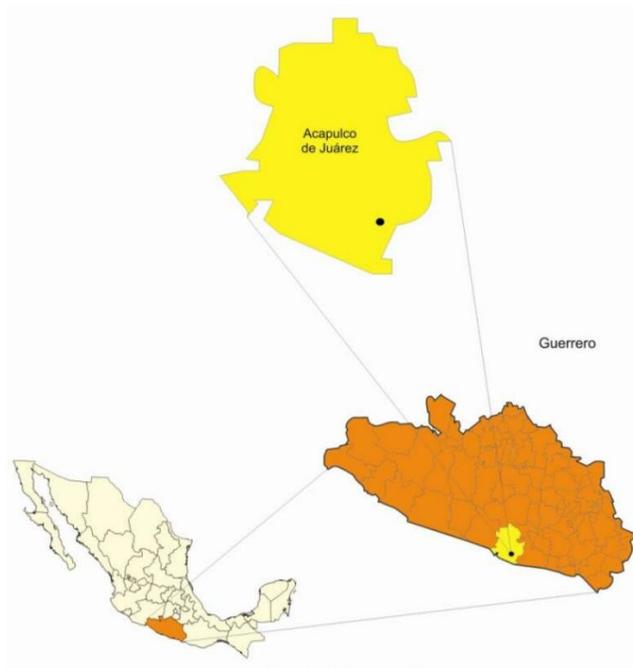


Figura 6.1.1 Localización geográfica de Acapulco, Guerrero (Niño-Gutiérrez, y Rodríguez, 2010).

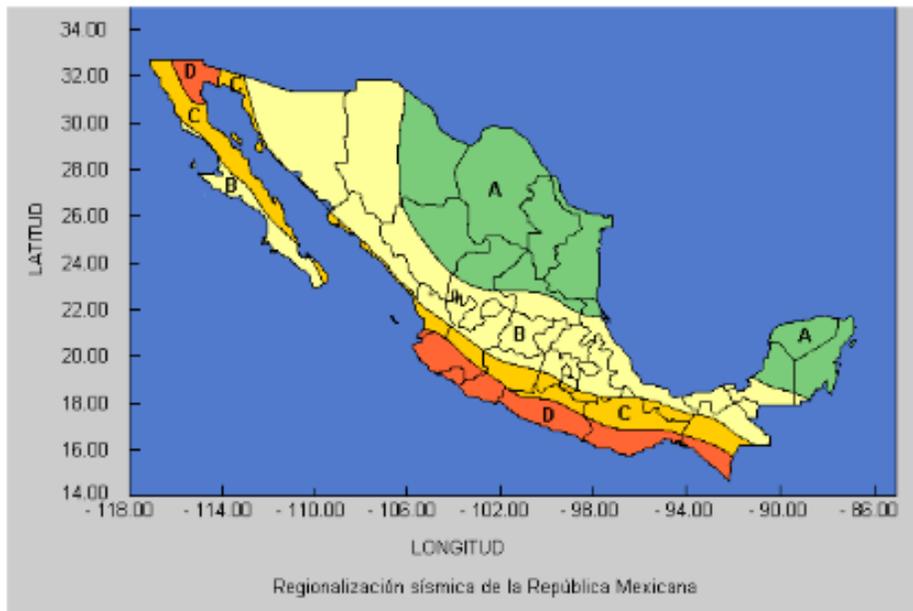


Figura 6.1.2 Regiones sísmicas de la República Mexicana (Delgado-Anguiano y Ledesma-Rivera,2016)

Descripción de la geometría

Como se mencionó en los capítulos anteriores, la metodología se basa en el estudio de edificios irregulares en planta, por lo que para los tres casos de estudio presenta una planta con forma geométrica en “L” (asimétrica).

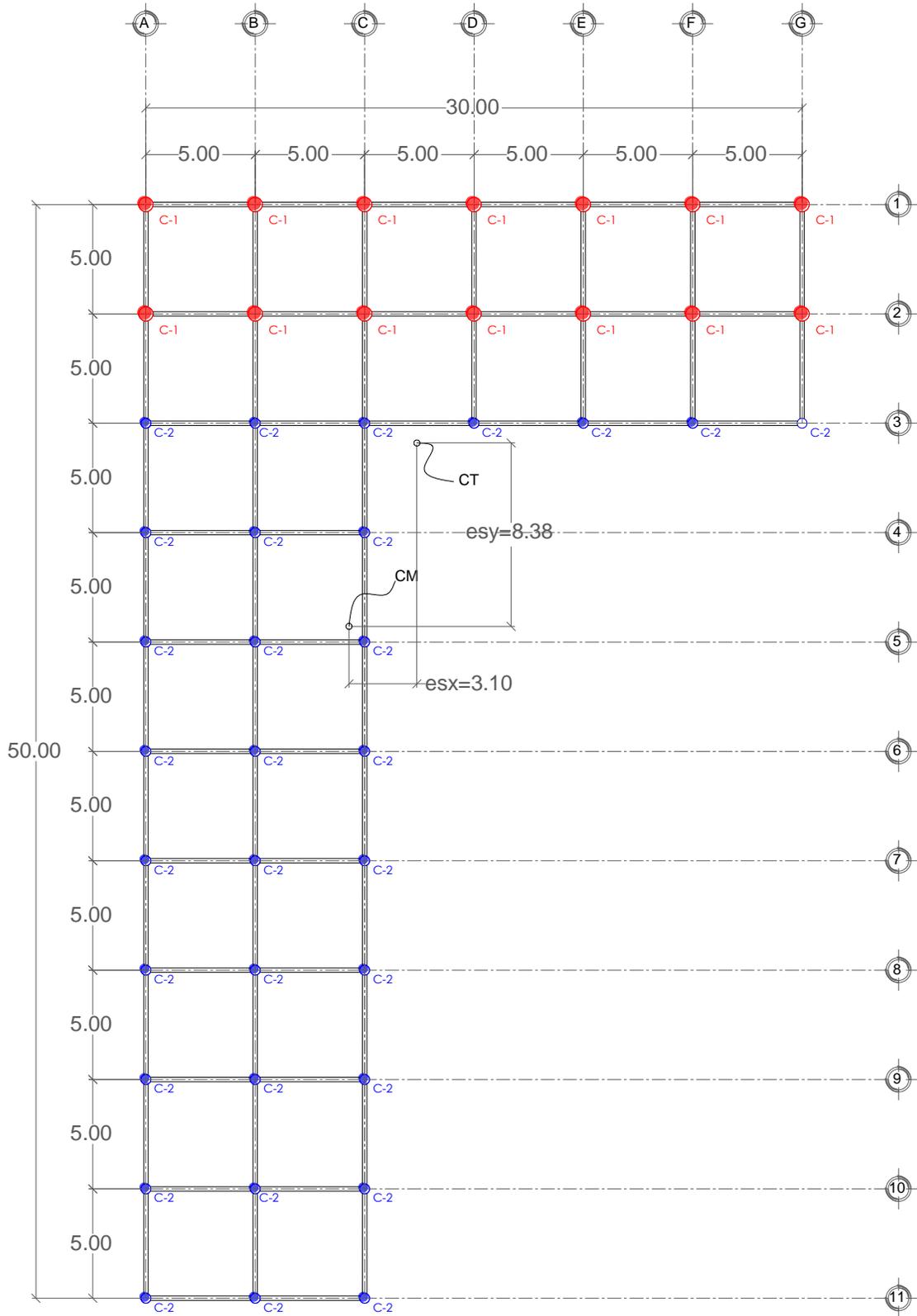


Figura.6.1.3 Planta tipo para los modelos con 1 y 5 niveles (elaboración propia).

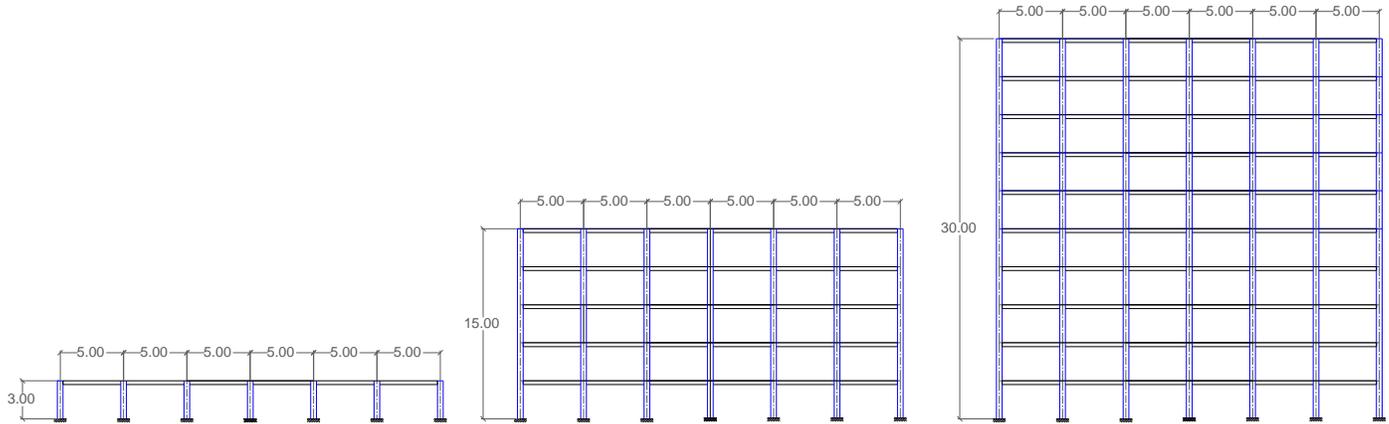


Figura 6.1.4 Vista en elevación de los 3 casos de estudio (elaboración propia).

Materiales utilizados

Para todos los elementos estructurales se consideró un concreto tipo 1 con una resistencia a la compresión $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ y cuyo módulo de elasticidad es igual a $221,359.436 \text{ kg/cm}^2$. Se eligió un concreto con resistencia de 250 kg/cm^2 . ya que la normativa indica que para elementos estructurales en general se puede ocupar dicha cantidad de resistencia (NTC de Diseño por Sismo, 2023).

Características de los elementos estructurales

Columnas: Para la estructura se eligieron columnas circulares con un diámetro de 45 cm (C2) y 65cm (C1). Se eligieron secciones circulares ya que antes cargas sísmicas, las cuales aparecen en todas las direcciones, las columnas circulares tienen la propiedad de resistir lo mismo en todas sus direcciones.

Trabes: las trabes son de sección rectangular de 25cm de base y 50 cm de peralte, para los tres casos de estudio se consideraron las mismas secciones en trabes.

Losa maciza: se consideró un **diafragma rígido**, es decir el modelo se analizó contemplando que los grados de libertad de los nodos, de cada entrepiso, se acoplan en uno solo, gracias a un elemento estructural capaz de rigidizar el entrepiso en cada nivel, que en este caso es una losa maciza con un peralte de 12 cm.

Cimentación: en el programa de SAP2000 no se modela la cimentación, pero se considera una base rígida por lo que en el modelo las columnas están empotradas en su base.

Uso de la estructura y cargas en los entresijos

Se consideró uso habitacional para todos los entresijos, con losa maciza. Para asignar las cargas correspondientes se elaboró un análisis de cargas en donde se contemplan las acciones vivas y muertas que recibe la estructura, así como cargas adicionales que se deben agregar según la normativa mexicana de 2023. Los análisis de cargas para losas de entresijos y azotea se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 6.1.1 Análisis de carga para entresijos (elaboración propia).

LOSA MACIZA DE ENTRESIJO			h(cm)=12	
		Peso Volumétrico (Kg/m3)	Espesor (m)	Peso (Kg/m2)
Losa		2400	0.12	288
Firme de mortero		1900	0.025	47.5
Acabado de Yeso		1200	0.02	24
Loseta cerámica				35
Carga por muros divisorios				50
Carga Adicional (NTC)				40
Carga Muerta				484.5
Carga viva máxima				190
Carga viva reducida				100
Carga de servicio				674.50
Carga última (1.3CM+1.5CV)				895.85

Tabla 6.1.2 Análisis de cargas para losa de azotea (elaboración propia).

LOSA MACIZA DE AZOTEA			h(cm)=12	
		(Kg/m3)	(m)	(Kg/m2)
Losa		2400	0.12	288
Firme de mortero		1900	0.025	47.5
Acabado de Yeso		1200	0.02	24
Impermeabilizante				30
Relleno para pendiente		1000	0.08	80
Carga Adicional (NTC)				40
Carga Muerta				509.50
Carga viva máxima				100
Carga viva reducida				70
Carga de servicio				609.50
Carga última ((1.3CM+1.5CV)				802.35

Software utilizado

Para la etapa de dibujo se ocupó el programa de AutoCAD en su versión 2022, ya que mediante este software se realizó de manera práctica un modelo sencillo donde se mostraron las barras que conforman la estructura, en el desarrollo de la metodología se nombra como “esquema de la estructura”.

Para la etapa de modelado se hizo uso de SAP2000 versión 16, gracias la interfaz con la que cuenta permite el análisis y diseño de los elementos estructurales en un solo modelo.

Para la obtención del espectro de respuesta, del lugar de estudio se ocupó PRODISIS v4.1, este es un software permite la obtención detallada del espectro de respuesta de un lugar en específico de México.

Para la obtención de la rigidez y los cálculos matemáticos necesarios en el desarrollo de la metodología, se utilizó Excel de la paquetería de Microsoft Office.

6.1.1 Obtención de la rigidez lateral para disminuir la excentricidad estática

La obtención de la rigidez lateral se obtuvo mediante las ecuaciones desarrolladas en la metodología, expuestas en el capítulo anterior. Los pasos a seguir para obtener la rigidez lateral son los que se explican a continuación. El centro de masas se considera ubicado en el punto (0,0), a partir de ello se obtienen las coordenadas de cada marco de la estructura.

- 1. Obtención de la matriz de rigidez global:** los valores de la posición de cada marco de la estructura son los que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 6.1.3 Valores de la rigidez lateral para el primer caso de estudio (elaboración propia)

MARCO	X_i	Y_i	COS	SEN	RJ	KD
1	-9.2857	19.29	1	0	-19.29	60344.39
2	-9.2857	14.29	1	0	-14.29	60344.39
3	-9.2857	9.29	1	0	-9.29	13862.24
4	-9.2857	4.29	1	0	-4.29	5940.96
5	-9.2857	-0.71	1	0	0.71	5940.96
6	-9.2857	-5.71	1	0	5.71	5940.96
7	-9.2857	-10.71	1	0	10.71	5940.96
8	-9.2857	-15.71	1	0	15.71	5940.96
9	-9.2857	-20.71	1	0	20.71	5940.96
10	-9.2857	-25.71	1	0	25.71	5940.96
11	-9.2857	-30.71	1	0	30.71	5940.96
A	-9.2857	19.2857	0	1	-9.29	35064.14
B	-4.2857	19.29	0	1	-4.29	35064.14
C	0.7143	19.29	0	1	0.71	35064.14
D	5.7143	19.29	0	1	5.71	19221.57
E	10.7143	19.29	0	1	10.71	19221.57
F	15.7143	19.29	0	1	15.71	19221.57
G	20.7143	19.29	0	1	20.71	19221.57

Los valores de las submatrices son los siguientes:

$$K_{xx} = \Sigma K_D \cos^2 \beta_j = 182,078.710$$

$$K_{xy} = \Sigma K_D \cos \beta_j * \operatorname{sen} \beta_j = 0.000$$

$$K_{yy} = \Sigma K_D \operatorname{sen}^2 \beta_j = 182,078.710$$

$$K_{x\theta} = \Sigma K_D \cos r_j = -1,526,521.050$$

$$K_{y\theta} = \Sigma K_D \operatorname{sen} r_j = 565,175.463$$

$$K_{\theta\theta} = \Sigma K_D r_j^2 = 70,005,695.581$$

La matriz de rigidez global queda de la siguiente manera:

$$KG = \begin{bmatrix} 182,078.710 & 0.000 & -1,526,521.050 \\ 0.000 & 182,078.710 & 565,175.463 \\ -1,526,521.050 & 565,175.463 & 70,005,695.581 \end{bmatrix}$$

2. Obtención del centro de torsión: utilizando las ecuaciones desarrolladas por **Ramírez Castañeda (2015)** se obtiene el centro de torsión.

$$X_{CT} = 3.104 \quad \text{Ecuación 6.1.1}$$

$$Y_{CT} = 8.384 \quad \text{Ecuación 6.1.2}$$

La excentricidad estática es:

Excentricidad en “x”	0-(3.104) = -3.104
Excentricidad en “y”	0-8.384 = -8.384

Se identifica que el centro de torsión, CT= (4.499,12.875) no está en el mismo punto donde se localiza el centro de masas, CM= (0,0).

Para poder corregir la excentricidad se propone agregar más rigidez lateral en el marco no.11, y marco “A”, ahora se desarrolla el mismo ejemplo, pero dejando como incógnita K_{D11} y K_{DA} con la finalidad de obtener el valor de la rigidez necesaria en el marco 11 y A para que la excentricidad sea casi nula.

3. Obtención de la rigidez lateral dejando como incógnita dos marcos de la estructura: Las rigideces de cada marco son las mismas a excepción del marco no.11 y A

$$K_{D11} = K_{D11} \text{ (incógnita)}$$

$$K_{DA} = K_{DA} \text{ (incógnita)}$$

4. Obtención de la nueva matriz de rigidez global, los valores de cada submatriz de rigidez global son los siguientes:

$$K_{xx} = \Sigma K_D \cos^2 \beta_j + K_{Dx} = (176,137.749 + K_{D11})$$

$$K_{xy} = \Sigma K_D \cos \beta_j * \text{sen} \beta_j = 0.000$$

$$K_{yy} = \Sigma K_D \text{sen}^2 \beta_j + K_{Dy} = (147,014.573 + K_{DA})$$

$$K_{x\theta} = \Sigma K_D \cos r_j + r_{jx} K_{Dx} = (-1,708,993.521 + 30.71 K_{D11})$$

$$K_{y\theta} = \Sigma K_D \text{sen} r_j + r_{jy} K_{Dy} = (890,770.529 - 9.29 K_{DA})$$

$$K_{\theta\theta} = (K_{\theta\theta 1} + r_{jx}^2 K_{Dx} + r_{jy}^2 K_{Dy}) EI = 61,377,803.277 + 943.104 K_{D11} + 86.304 K_{DA}$$

5. Obtención de la rigidez lateral para disminuir la excentricidad estática: sustituyendo los valores anteriores en las ecuaciones 3.1.29 y 3.1.30, del capítulo referente a la metodología, se obtiene lo siguiente:

$$K_{Dy} = \frac{K_{Dx}(r_{jx}K_{xy} - K_{y\theta 1}) + K_{x\theta 1}K_{xy} - K_{y\theta 1}K_{xx1}}{r_{jy}K_{Dx} + r_{jy}K_{xx1}}$$

$$K_{DA} =$$

$$\frac{K_{D11}(30.71 * 0 - 890,770.529) + (-1,708,993.521 * 0) - (890,770.529 * 176,137.749)}{-9.29 K_{D11} + (-9.29 * 176,137.749)}$$

Simplificando la ecuación

$$K_{DA} = \frac{-890,770.529 K_{D11} - 1.569 \times 10^{11}}{-9.29 K_{D11} - 1,635,562.296}$$

Ecuación 6.1.3

$$K_{Dy} = \frac{r_{jx}K_{Dx}K_{yy1} + K_{x\theta 1}K_{yy1} - K_{y\theta 1}K_{xy}}{r_{jy}K_{xy} - K_{x\theta 1} - r_{jx}K_{Dx}}$$

$$K_{D11} = \frac{K_{D11}(30.71 * 147,014.573) + (-1,708,993.521 * 147,014.573) - (890,770.529 * 0)}{(-9.29 * 0) - (-1,708,993.521) - (30.71 K_{D11})}$$

Simplificando la ecuación

$$K_{DA} = \frac{4,515,449.686 K_{D11} - 2.512 \times 10^{11}}{-30.71 K_{D11} + 1,708,993.521}$$

Ecuación 6.1.4

Igualando ambas ecuaciones, 6.1.3 y 6.1.4

$$K_{DA} = K_{DA}$$

$$\frac{-890,770.529K_{D11} - 1.569 \times 10^{11}}{-9.29K_{D11} - 1,635,562.296} = \frac{4,515,449.686 K_{D11} - 2.512 \times 10^{11}}{-30.71K_{D11} + 1,708,993.521}$$

Resolviendo

$$K_{D11} = 55,644.700 \quad \text{Ecuación 6.1.5}$$

Para obtener el valor de K_{DA} se sustituye en valor de K_{D11} en la ecuación 4.1.3

$$K_{DA} = \frac{-890,770.529(62,184.200) - 1.569 \times 10^{11}}{-9.29(62,184.200) - 1,635,562.296} = 95,929.281 \quad \text{Ecuación 6.1.6}$$

La rigidez que deben aportar los contraventeos en el marco no.11 es la siguiente:

$$K_{CTVX} = 55,644.700 - 5,949.961 = 49,703.739 \quad \text{Ecuación 6.1.7}$$

Para el marco no.8 la rigidez que deben aportar los contraventeos es:

$$K_{CTVY} = 95,929.281 - 35,064.138 = 60,865.144 \quad \text{Ecuación 6.1.8}$$

Una vez identificada la cantidad de rigidez necesaria para disminuir la excentricidad en el edificio se realizó el modelo computacional sin contraventeos, posteriormente se realizó una copia de dicho modelo y se adicionaron los contraventeos.

6.1.2 Modelo computacional

Para cada caso de estudio se siguió el mismo proceso para elaborar el modelo computacional, que se muestra en el siguiente esquema.

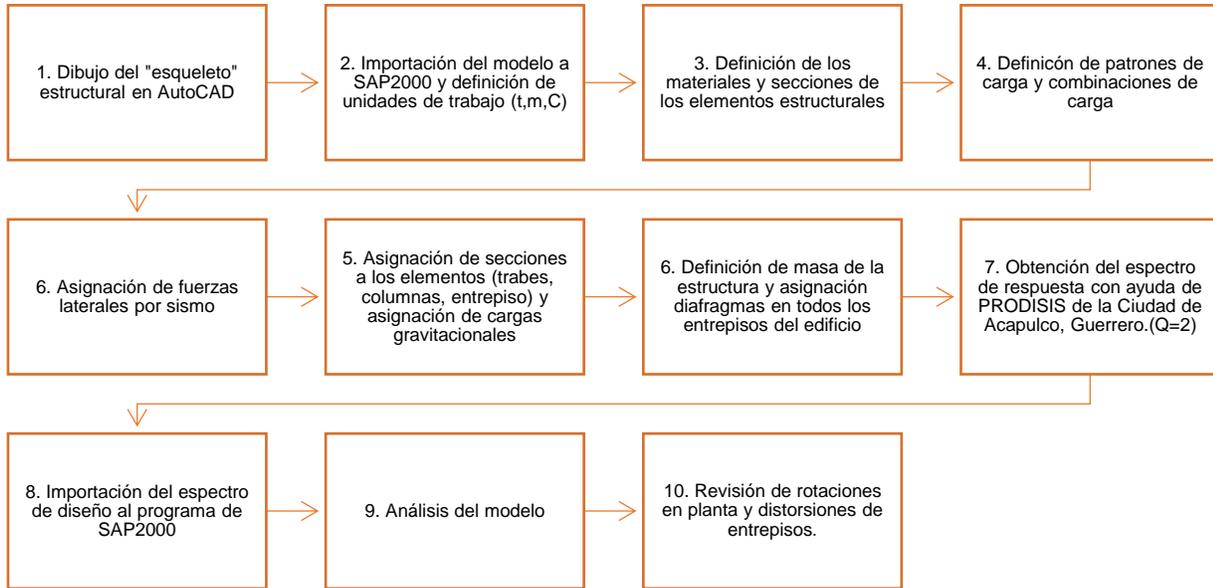


Figura 6.1.5 Pasos a seguir para el modelado de los casos de estudio (elaboración propia).

1. Dibujo del esquema de la estructura

En AutoCAD se realizó el dibujo de la geometría de la estructura solo mediante líneas, ya que si se utilizan polilíneas el programa de SAP2000 no lo reconoce.

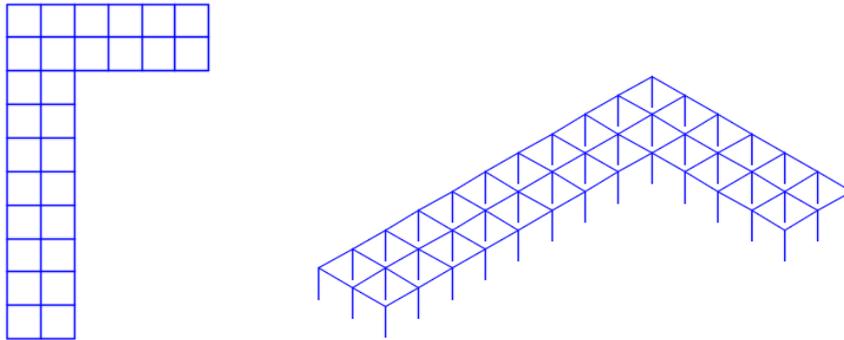


Figura 6.1.6 Dibujo del esquema para modelo de 1 nivel (elaboración propia).

2. Importación del modelo a SAP2000 y definición de unidades de trabajo

El esquema dibujado en AutoCAD se guardó en formato .dxf y se importó al programa de SAP2000

Las unidades de trabajo definidas fueron toneladas, metros y grados centígrados (Ton,m,C)

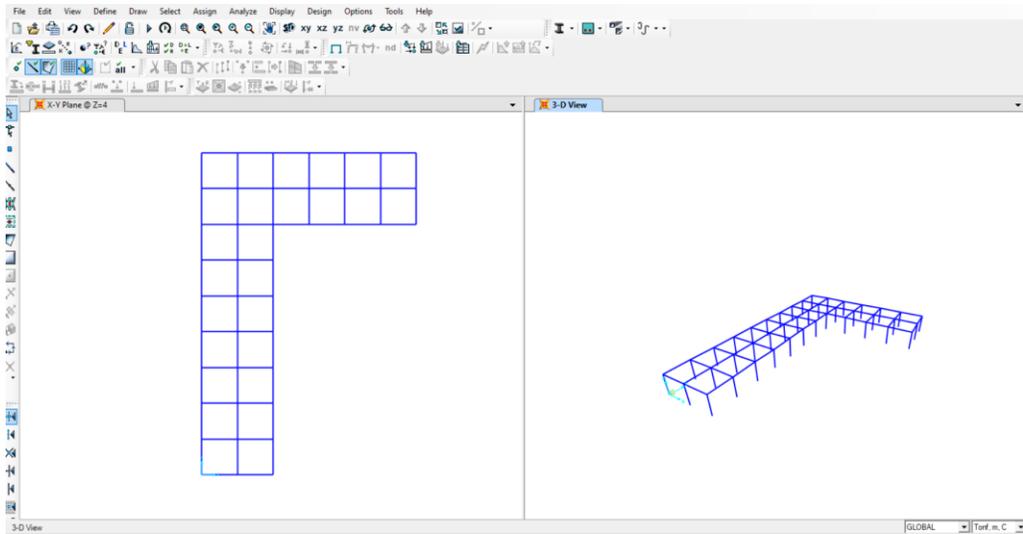


Figura 6.1.7 Importación del modelo a SAP2000 (elaboración propia).

3. Definición de materiales y secciones de los elementos estructurales

Para los materiales se definió un concreto de 250, columnas circulares de 45cm (C2) y 65cm (C1) de diámetro y traveses de 25x50cm. Las cargas de la losa de entrepiso se asignaron a las traveses mediante la correspondiente distribución de áreas tributarias.

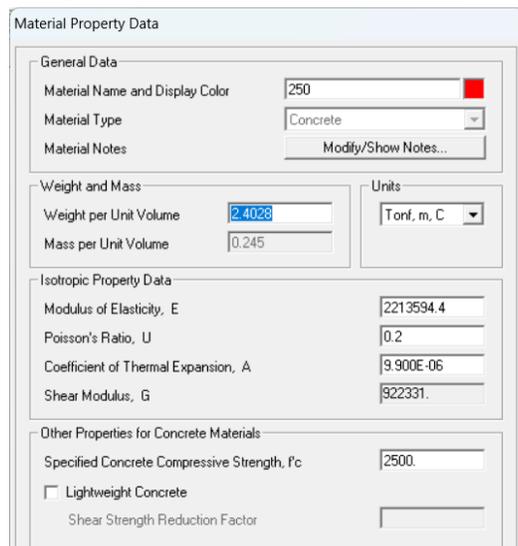


Figura 6.1.8 Definición del concreto $f'c=250$ (elaboración propia).

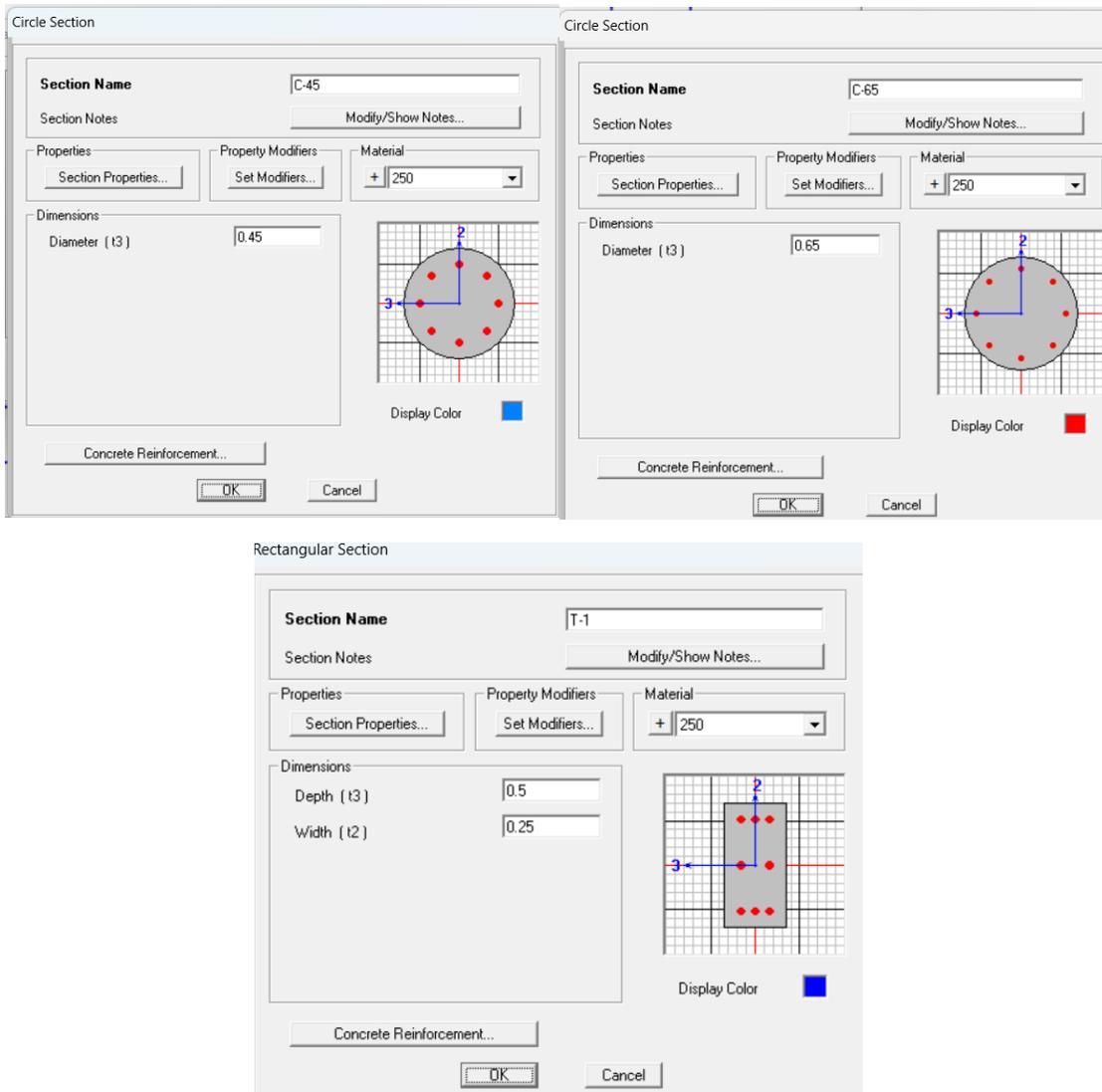


Figura 6.1.9 Creación de secciones para los elementos estructurales (elaboración propia).

4. Definición de patrones de carga y combinaciones de carga

De igual manera en la pestaña “definir” del programa SAP2000 se definen los patrones de carga a utilizar en el análisis, los cuales son: carga viva (LIVE), carga muerta (DEAD), carga viva accidental (LIVE AC), Sismo en “x” y en “y” (SX DINÁMICO, SX ESTÁTICO, SY DINÁMICO, SY ESTÁTICO).

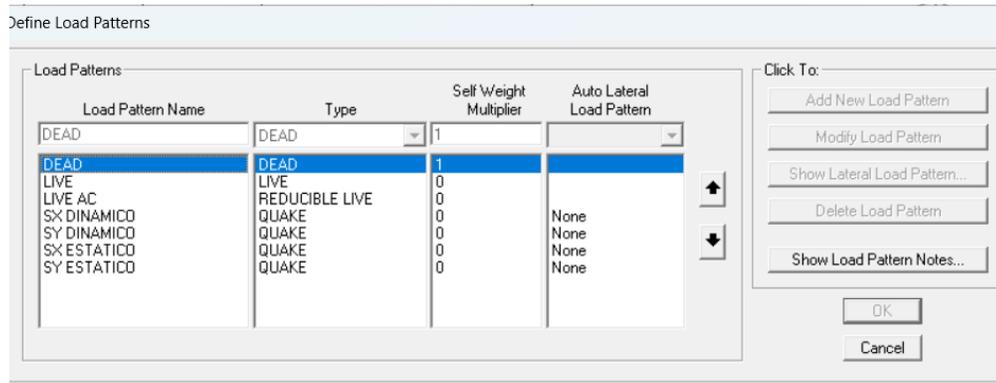


Figura 6.1.10 Creación de patrones de carga (elaboración propia).

En la misma pestaña, “definir”, se realizaron las combinaciones de carga para las cargas gravitacionales, las cuales fueron carga última (CU) y carga de servicio (CS).

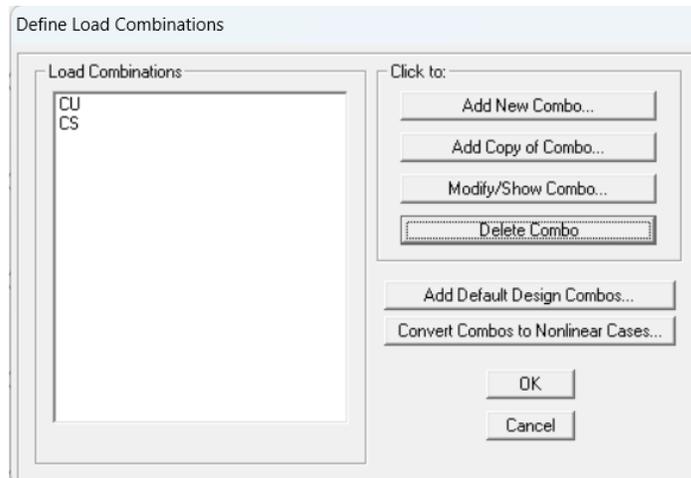


Figura 6.1.11 Combinaciones de carga (elaboración propia).

5. Asignación de secciones y cargas gravitacionales

Después de definir los parámetros de diseño se asignaron las secciones correspondientes a las columnas y traveses, para ello se seleccionaron los elementos y posteriormente se eligió la sección correspondiente en la ventana de “asignar”.

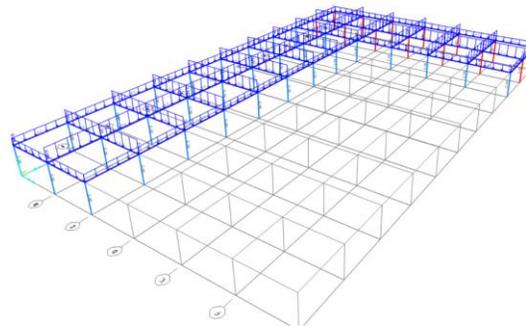


Figura 6.1.12 Asignación de cargas a las traveses y definición de masa (elaboración propia).

6. Asignación de diafragmas en cada nivel de la estructura

En seguida, se asignaron diafragmas a cada entrepiso para poder considerar un entrepiso rígido en cada nivel del edificio. Primeramente, se seleccionaron los elementos de cada nivel, es decir, solo se seleccionaron las traveses, una vez seleccionadas en la pestaña “asignar” se eligió la opción de “joint”, luego “constraints”, y en la ventana emergente se crea un “constrain” para cada nivel de la estructura de tipo “diaphragm”.

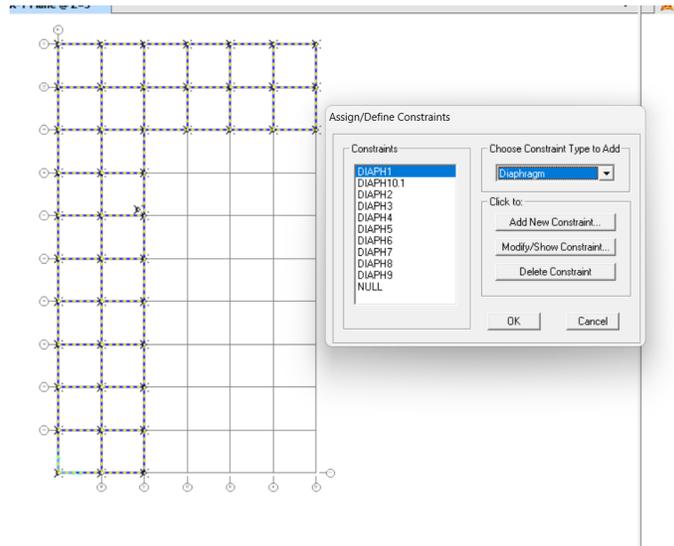


Figura 6.1.13 Asignación de diafragmas a los entrepisos del edificio (elaboración propia).

7. Asignación de fuerzas laterales por sismo

Las fuerzas laterales que se asignaron a los tres casos de estudio se obtuvieron mediante el método estático, las ecuaciones para obtener dichas fuerzas son las que se mencionan en el capítulo 2, en el apartado correspondiente al método estático. Las fuerzas laterales obtenidas para para el modelo de 1 nivel son las siguientes

En el desarrollo de los cálculos se consideraron los siguientes factores sísmicos, los cuales dependen del tipo de suelo, de la zona sísmica, del material de construcción, del número de marcos en la estructura y del nivel de importancia. La definición de cada factor se especifica en el glosario del proyecto.

c =0.406	k=1.5	k1=1.25
Q=2	Q'=2	k2=0
Tc=2	P=1.49	R=2.188
Ta=0.1	R0=1.75	R'=2.188, para nivel
Tb=0.5	P=1.49	de seguridad de
r=1/2	R0=1.75	vida.

Valores de fuerzas laterales para el modelo sin contraventeos

La fuerza lateral obtenida para cada dirección de análisis es el valor correspondiente a F_i . Después de asignar las fuerzas laterales se obtuvo el espectro de respuesta.

Los valores de las fuerzas laterales cambiaron al agregar los contraventeos. Son los que se muestran en las siguientes tablas.

8. Obtención del espectro de respuesta para el análisis sísmico

Para representar de manera muy precisa los efectos que tendrá la estructura de acuerdo al lugar en donde se ubica, que para este caso fue la ciudad de Acapulco, Guerrero, se obtuvo un espectro de respuesta para conocer las aceleraciones máximas del suelo en un periodo de tiempo. Para ello se utilizó el programa de PRODISIS, se eligió este programa porque permite obtener los espectros de respuesta de todo el país a diferencia del SACIID, el cual solo se utiliza para obtener espectros de respuesta de la Ciudad de México. Además, considera los parámetros necesarios para obtener un espectro de respuesta acorde al sitio y zona sísmica en dónde se encuentra. (Pérez Rocha, 2023).

A continuación, se enlistan los pasos a seguir para obtener el espectro de respuesta de Acapulco de Juárez.

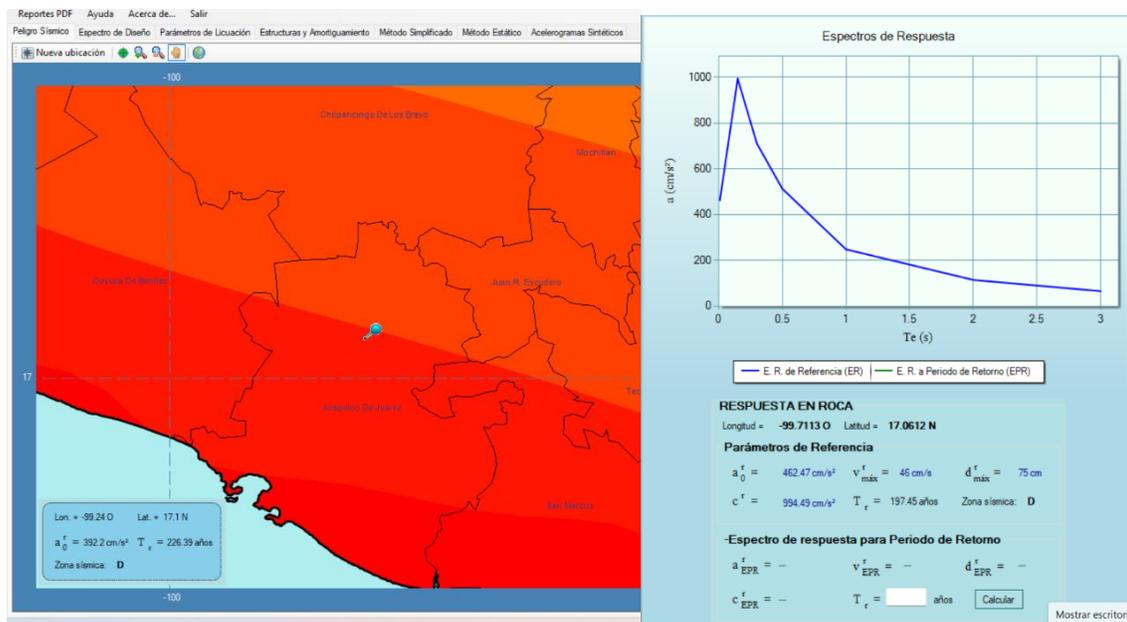


Figura 6.1.14 Obtención del espectro de respuesta con PRODISIS (elaboración propia).

Se introdujeron los factores sísmicos al PRODISIS, dichos factores que se consideraron se especifican a continuación:

- $Q=2$, según las **NTC-Sismo** las estructuras con ductilidad baja tienen un factor de 2.
- $R=2$, Factor de sobre-resistencia. Según las **NTC-Sismo** el factor de sobre-resistencia para estructuras con Q menor a 3 debe ser de 1.75 pero en el programa de PRODISIS el valor mínimo que se puede asignar es de 2.

- $\rho=1.25$, Factor de corrección por hiperestaticidad, según las **NTC-Sismo** se considera 1.25 para los sistemas estructurales duales que tengan tres o más crujeas resistentes a sismo en las dos direcciones de análisis.
- $\alpha=0.9$, factor por irregularidad, si solo tiene un tipo de irregularidad se utiliza un factor de reducción de 0.9.

Es importante mencionar que el espectro de respuesta se obtuvo suponiendo que la estructura del edificio se encuentra desplantada sobre suelo rocoso, es decir, no se considera una amplificación dinámica por efectos de sitio.

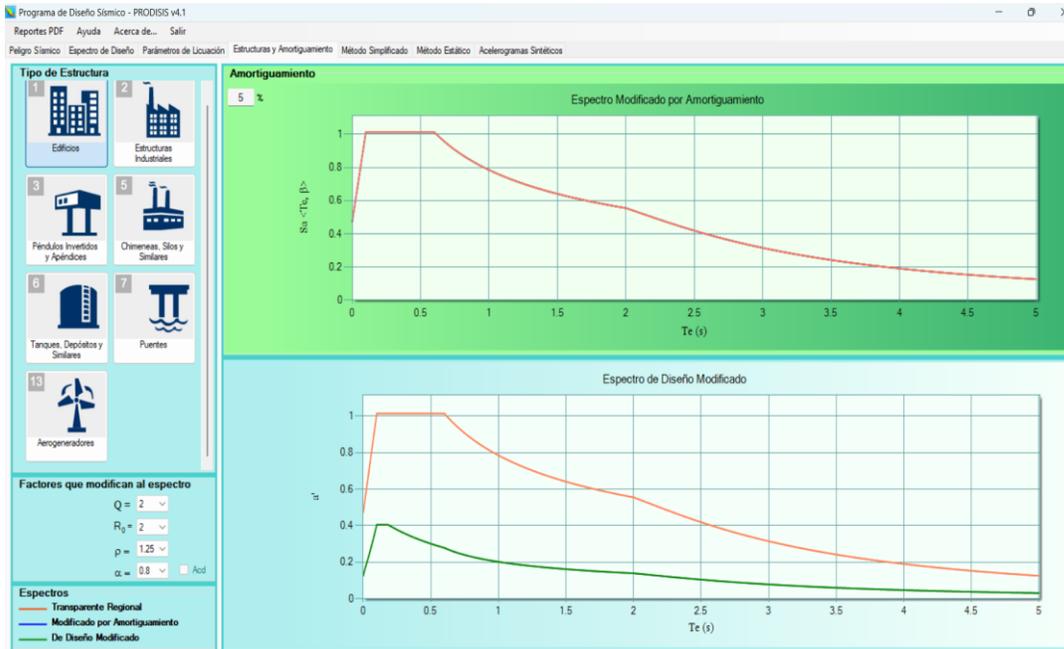


Figura 6.1.15 Obtención de los valores del espectro de diseño (elaboración propia).

9. Exportación del espectro de respuesta a SAP2000

Una vez obtenido el espectro de diseño modificado por los factores o parámetros sísmicos, se exportaron los datos del espectro a una hoja de archivo de texto (.txt)

T (seg)	Sa (1/g)
0	0.157197
0.01	0.193303
0.02	0.221217
0.03	0.248528
0.04	0.275832
0.05	0.303336
0.06	0.331141
0.07	0.359305
0.08	0.387867
0.09	0.416861

Figura 6.1.16 Exportación de datos a Excel (elaboración propia).

Dichos datos se importaron al programa de SAP2000, para ello, en la pestaña de “definir” se elige “functions”, luego “Response spectrum” y después “from file” para importar desde un archivo de texto (los valores obtenidos de PRODISIS se deben de guardar en un archivo de texto). En la ventana emergente se debe elegir “period vs value”. De esta manera se está asegurando que en la estructura se simulen las vibraciones del suelo del lugar que se eligió.

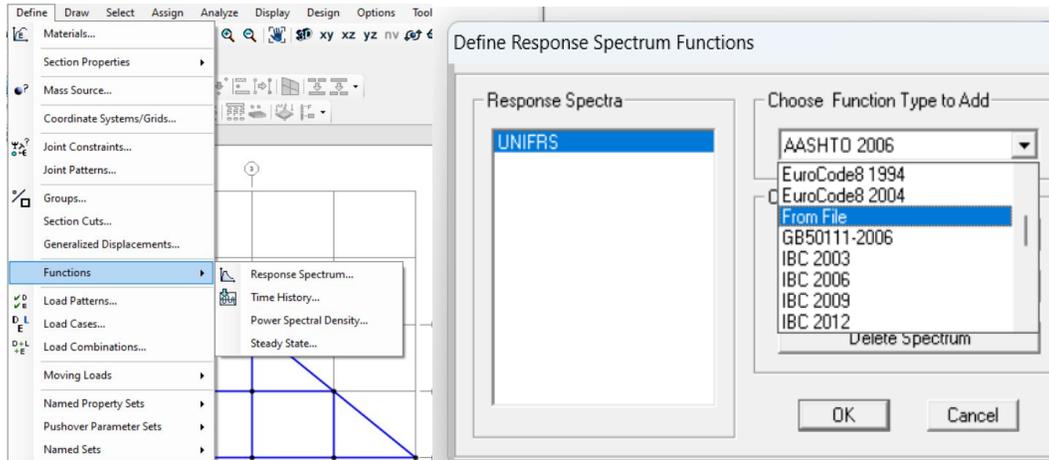


Figura 6.1.17 Importación del espectro de diseño (elaboración propia).

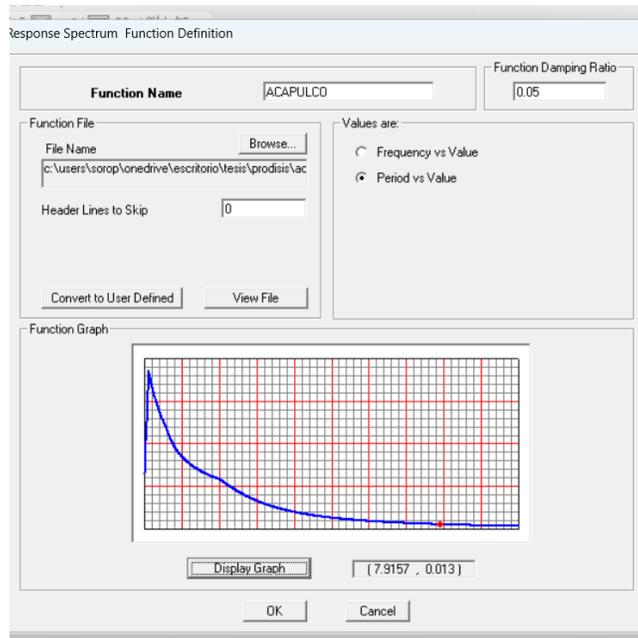


Figura 6.1.18 Configuración para la obtención de la gráfica del espectro de diseño (elaboración propia).

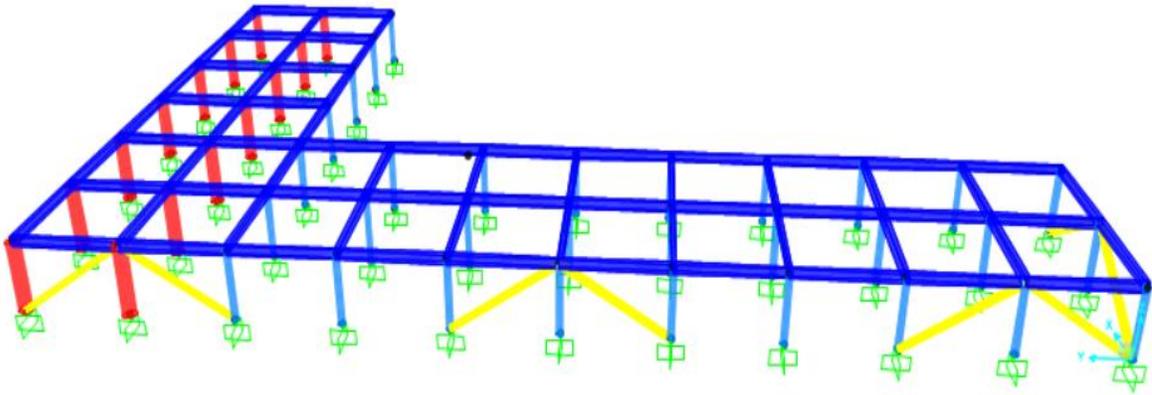


Figura 6.1.19 Vista 3D del modelo con 1 nivel con contraventeos (elaboración propia).

10. Revisión de rotaciones en planta y distorsiones de entrepisos

Una vez analizado cada caso de estudio, uno con contraventeos y otro sin contraventeos, se revisaron las rotaciones en planta, los desplazamientos laterales y las distorsiones de entrepiso de acuerdo con la NTC-Sismo.

6.2 Modelo de 5 niveles

Las características del caso de estudio son las mismas que se consideraron para el modelo de 1 nivel, solamente cambia el número de niveles.

6.2.1 Obtención de la rigidez lateral para disminuir la excentricidad estática

En el principio de este capítulo se mencionó que de acuerdo a diversas pruebas realizadas, el centro de torsión para un edificio como N número de niveles siempre será el mismo que el obtenido para un edificio de 1 nivel, siempre y cuando la geometría y las características de los elementos sean los mismos y que sobre todo se cumpla la condición de diafragma rígido, de esta manera el centro de torsión que se consideró en cada nivel del modelo con 5 pisos, fue el mismo que se obtuvo para el modelo de 1 nivel. La excentricidad estática también es la misma que se obtuvo para el primer caso de estudio.

$$X_{CT} = 3.104$$

$$Y_{CT} = 8.384$$

De manera similar, la rigidez que deben aportar los contraventeos en cada nivel de la estructura es la misma que se obtuvo en el primer caso de estudio.

4.2.1 Modelo computacional

Así mismo los pasos para realizar el modelo computacional fueron iguales a los que se siguieron para el modelo computacional de 1 nivel, la diferencia es que el “esqueleto” de la estructura para este caso consistió en 5 niveles.

Los valores de las fuerzas laterales para el análisis sísmico que se aplicaron en cada nivel de la estructura, obtenidas por el método estático, se muestran a continuación.

Valores de fuerzas laterales para el modelo sin contraventeos

Tabla 6.2.1 Fuerzas laterales por sismo en dirección "x", para modelo de 5 niveles (elaboración propia)

Sismo en dirección X								
Nivel	hi(m)	wi(ton)	wi*hi	Fi(ton)	Vi(ton)	xi(m)	Wi*xi^2	Fi*Xi
1	3	649.30	1947.90	20.661	206.61	0.0063	0.026	0.13
2	6	649.30	3895.81	41.323	185.95	0.0171	0.190	0.71
3	9	649.30	5843.71	61.984	144.63	0.0276	0.495	1.71
4	12	649.30	7791.61	82.646	82.65	0.0358	0.832	2.96
5	15	603.80	9057.02	96.068	96.07	0.0411	1.020	3.95
		3201.01	28536.05	302.68			2.56	9.45
					T=	1.044	Variación=	
					T(dinámico)=	1.044	0.00	
					Vb=	302.68	ton	

Tabla 6.2.2 Fuerzas laterales por sismo en la dirección "y", para el modelo de 5 niveles (elaboración propia)

Sismo en dirección Y								
Nivel	hi(m)	wi(ton)	wi*hi	Fi(ton)	Vi(ton)	xi(m)	Wi*xi^2	Fi*Xi
1	3	649.30	1947.90354	20.66	206.61	0.0056	0.020	0.12
2	6	649.30	3895.80708	41.32	185.95	0.0155	0.156	0.64
3	9	649.30	5843.71062	61.98	144.63	0.0251	0.409	1.56
4	12	649.30	7791.61416	82.65	82.65	0.0326	0.690	2.69
5	15	603.80	9057.0177	96.07	96.07	0.0375	0.849	3.60
		3201.01	28536.05	302.68			2.12	8.61
					T=	0.997	Variación=	
					T(dinámico)=	1.044	-0.05	
					Vb=	302.68	ton	

Valores de fuerzas laterales para el modelo con contraventeos

Los valores de las fuerzas laterales cambian debido a que, al agregar contraventeos el peso de la estructura se modifica, así como el periodo fundamental de vibrar

Tabla 6.2.3 Fuerzas laterales por sismo en la dirección "x", para el modelo de 5 niveles con CTV (elaboración propia)

Sismo en dirección X								
Nivel	hi(m)	wi(ton)	wi*hi	Fi(ton)	Vi(ton)	xi(m)	Wi*xi^2	Fi*Xi
1	3	649.66	1948.97	20.809	208.09	0.0048	0.015	0.10
2	6	649.66	3897.95	41.618	187.28	0.0143	0.133	0.60
3	9	649.66	5846.92	62.427	145.66	0.0222	0.320	1.39
4	12	649.66	7795.90	83.235	83.24	0.0293	0.558	2.44
5	15	604.16	9062.37	96.757	96.76	0.0335	0.678	3.24
		3202.79	28552.11	304.85			1.70	7.76
						T=	0.940	Variación=
						T(dinámico)=	0.909	0.03
						Vb=	304.85	ton

Tabla 6.2.4 Fuerzas laterales por sismo en la dirección "y", para el modelo de 5 niveles con CTV (elaboración propia)

Sismo en dirección Y								
Nivel	hi(m)	wi(ton)	wi*hi	Fi(ton)	Vi(ton)	xi(m)	Wi*xi^2	Fi*Xi
1	3	649.66	1948.97394	20.809	208.09	0.0045	0.013	0.09
2	6	649.66	3897.94788	41.618	187.28	0.0129	0.108	0.54
3	9	649.66	5846.92182	62.427	145.66	0.0200	0.260	1.25
4	12	649.66	7795.89576	83.235	83.24	0.0261	0.443	2.17
5	15	604.16	9062.3697	96.757	96.76	0.0295	0.526	2.85
		3202.79	28552.11	304.85			1.35	6.91
						T=	0.887	Variación=
						T(dinámico)=	0.909	-0.02
						Vb=	304.85	ton

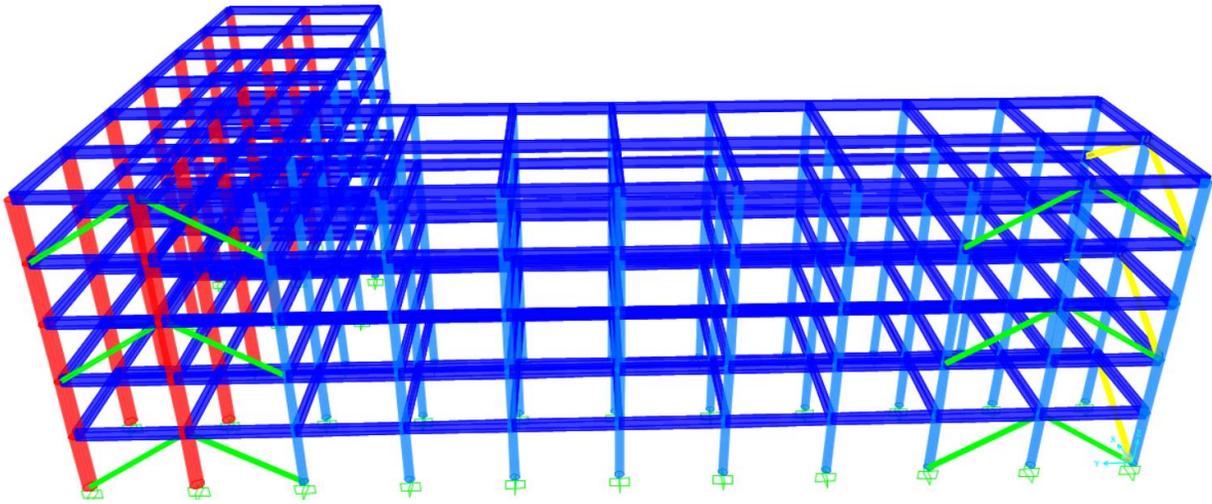


Figura 6.2.1 Vista 3D del modelo con 5 niveles con contraventeos (elaboración propia).

6.3 Modelo de 10 niveles

Las características de los materiales, la geometría, el uso de la estructura y la zona sísmica de estudio son las mismas que se usaron en los dos casos de estudio anteriores, a excepción de las secciones de los elementos estructurales. Para el modelo de 10 niveles se usaron columnas de 75cm(C-2) y 90cm (C-1) de diámetro, traveses de 35cmx60cm y losa maciza de 15cm. En la siguiente figura se observa la planta estructural de este caso de estudio.

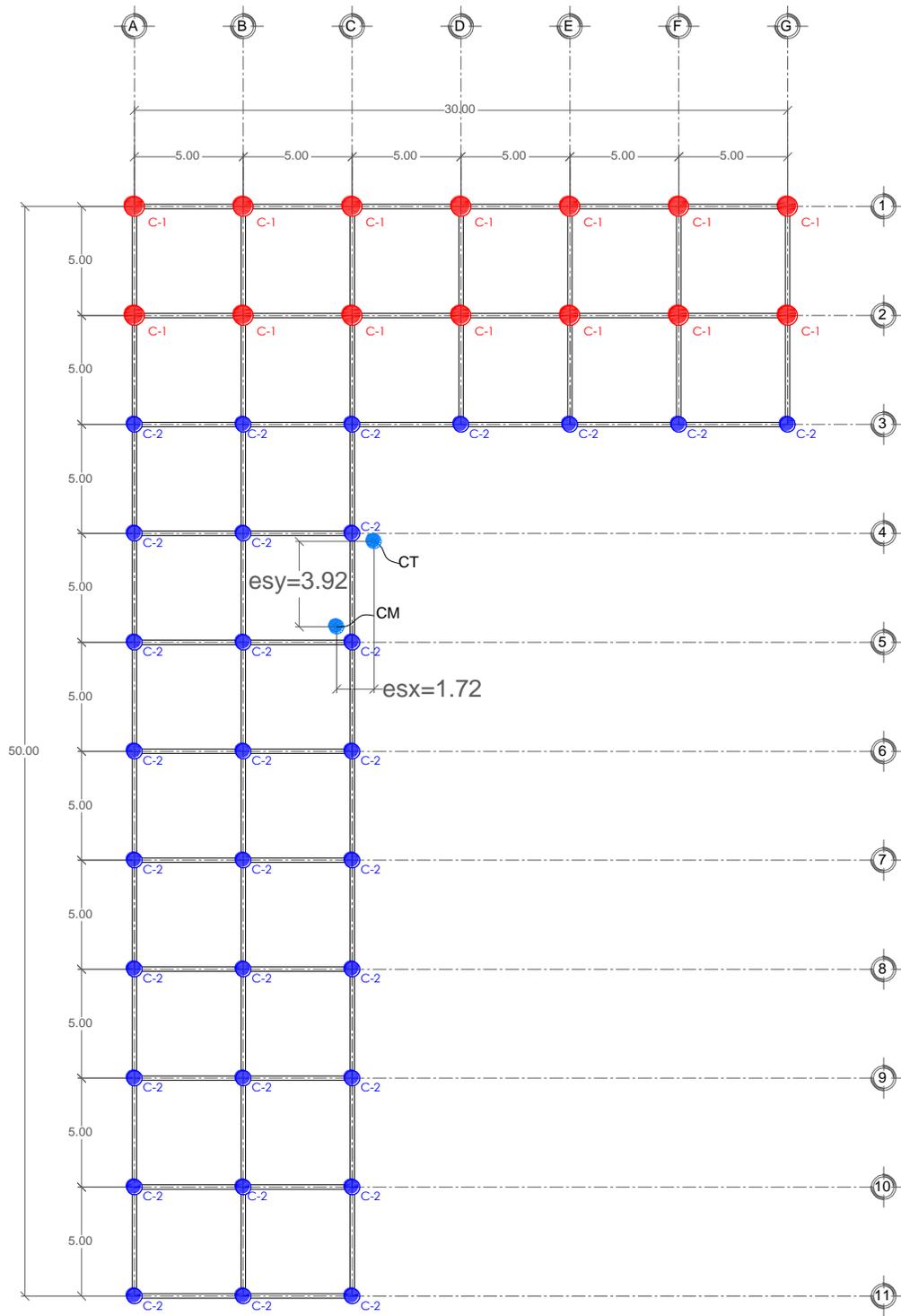


Figura 6.3.1 Planta estructural para el modelo de 10 niveles (elaboración propia).

6.3.1 Obtención de la rigidez lateral para disminuir la excentricidad estática

El centro de torsión que se consideró en cada nivel, para el modelo de 10 pisos, se obtuvo siguiendo el mismo procedimiento que se realizó en el primer caso de estudio. El proceso para obtener el centro de torsión y la rigidez para disminuir la excentricidad estática de describe a continuación.

- 1. Obtención de la matriz de rigidez global:** los valores de la posición de cada marco de la estructura son los que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 6.3.1 Valores de la rigidez lateral para el primer caso de estudio (elaboración propia).

MARCO	Xi	Yi	COS	SEN	RJ	KD
1	-9.2857	19.29	1	0	-19.29	221795.89
2	-9.2857	14.29	1	0	-14.29	221795.89
3	-9.2857	9.29	1	0	-9.29	106961.75
4	-9.2857	4.29	1	0	-4.29	45840.75
5	-9.2857	-0.71	1	0	0.71	45840.75
6	-9.2857	-5.71	1	0	5.71	45840.75
7	-9.2857	-10.71	1	0	10.71	45840.75
8	-9.2857	-15.71	1	0	15.71	45840.75
9	-9.2857	-20.71	1	0	20.71	45840.75
10	-9.2857	-25.71	1	0	25.71	45840.75
11	-9.2857	-30.71	1	0	30.71	45840.752
A	-9.2857	19.2857	0	1	-9.29	200892.509
B	-4.2857	19.29	0	1	-4.29	200892.51
C	0.7143	19.29	0	1	0.71	200892.51
D	5.7143	19.29	0	1	5.71	78650.51
E	10.7143	19.29	0	1	10.71	78650.51
F	15.7143	19.29	0	1	15.71	78650.51
G	20.7143	19.29	0	1	20.71	78650.51

Los valores de las submatrices son los siguientes:

$$K_{xx} = \Sigma K_D \cos^2 \beta_j = 917,279.550$$

$$K_{xy} = \Sigma K_D \cos \beta_j * \sen \beta_j = 0.000$$

$$K_{yy} = \Sigma K_D \sen^2 \beta_j = 917,279.550$$

$$K_{x\theta} = \Sigma K_D \cos r_j = -3,593,185.826$$

$$K_{y\theta} = \Sigma K_D \sen r_j = 1,574,350.411$$

$$K_{\theta\theta} = \Sigma K_D r_j^2 = 335,031,633.926$$

La matriz de rigidez global queda de la siguiente manera:

$$KG = \begin{bmatrix} 917,279.550 & 0.000 & -3,593,185.826 \\ 0.000 & 917,279.550 & 1,574,350.411 \\ -3,593,185.826 & 1,574,350.411 & 335,031,633.926 \end{bmatrix}$$

- 2. Obtención del centro de torsión:** utilizando las ecuaciones desarrolladas por **Ramírez Castañeda (2015)** se obtiene el centro de torsión.

$$X_{CT} = 1.716 \quad \text{Ecuación 6.3.1}$$

$$Y_{CT} = 3.917 \quad \text{Ecuación 6.3.2}$$

La excentricidad estática es:

Excentricidad en "x"	0-(1.716) = -1.716
Excentricidad en "y"	0-3.917 = -3.917

Se identifica que el centro de torsión, CT= (4.499,12.875) no está en el mismo punto donde se localiza el centro de masas, CM= (0,0).

Para poder corregir la excentricidad se propone agregar más rigidez lateral en el marco no.11, y marco "A", ahora se desarrolla el mismo ejemplo, pero dejando como incógnita K_{D11} y K_{DA} con la finalidad de obtener el valor de la rigidez necesaria en el marco 11 y A para que la excentricidad sea casi nula.

- 3. Obtención de la rigidez lateral dejando como incógnita dos marcos de la estructura:** Las rigideces de cada marco son las mismas a excepción del marco no.11 y A

$$K_{D11} = K_{D11} \text{ (incógnita)}$$

$$K_{DA} = K_{DA} \text{ (incógnita)}$$

- 4. Obtención de la nueva matriz de rigidez global,** los valores de cada submatriz de rigidez global son los siguientes:

$$K_{xx} = \Sigma K_D \cos^2 \beta_j + K_{Dx} = (871,438.798 + K_{D11})$$

$$K_{xy} = \Sigma K_D \cos \beta_j * \sen \beta_j = 0.000$$

$$K_{yy} = \Sigma K_D \sen^2 \beta_j + K_{Dy} = (716,387.041 + K_{DA})$$

$$K_{x\theta} = \Sigma K_D \cos r_j + r_{jx} K_{Dx} = (-5,001,152.421 + 30.71 K_{D11})$$

$$K_{y\theta} = \Sigma K_D \sen r_j + r_{jy} K_{Dy} = (3,439,777.986 - 9.29 K_{DA})$$

$$K_{\theta\theta} = (K_{\theta\theta 1} + +r_{jx}^2 K_{Dx} + r_{jy}^2 K_{Dy})EI = 274,465,124.722 + 943.104 K_{D11} + 86.304 K_{DA}$$

- 5. Obtención de la rigidez lateral para disminuir la excentricidad estática:** sustituyendo los valores anteriores en las ecuaciones 3.1.29 y 3.1.30, del capítulo referente a la metodología, se obtiene lo siguiente:

$$K_{Dy} = \frac{K_{Dx}(rj_x K_{xy} - K_{y\theta 1}) + K_{x\theta 1} K_{xy} - K_{y\theta 1} K_{xx1}}{rj_y K_{Dx} + rj_y K_{xx1}}$$

$$K_{DA} =$$

$$\frac{K_{D11}(30.71 * 0 - 3,439,777.986) + (-5,001,152.421 * 0) - (3,439,777.986 * 871,438.798)}{-9.29K_{D11} + (-9.29 * 871,438.798)}$$

Simplificando la ecuación

$$K_{DA} = \frac{-3,439,777.986K_{D11} - 29.97x10^{11}}{-9.29K_{D11} - 8,091,919.251}$$

Ecuación 6.3.3

$$K_{Dy} = \frac{rj_x K_{Dx} K_{yy1} + K_{x\theta 1} K_{yy1} - K_{y\theta 1} K_{xy}}{rj_y K_{xy} - K_{x\theta 1} - rj_x K_{Dx}}$$

$$K_{D11} = \frac{K_{D11}(30.71 * 716,387.04) + (-5,001,152.421 * 716,387.04) - (3,439,777.986 * 0)}{(-9.29 * 0) - (-5,001,152.421) - (30.71K_{D11})}$$

Simplificando la ecuación

$$K_{DA} = \frac{22,003,326.479 K_{D11} - 35.827x10^{11}}{-30.71K_{D11} + 5,001,152.421}$$

Ecuación 6.3.4

Igualando ambas ecuaciones, 6.3.3 y 6.3.4

$$K_{DA} = K_{DA}$$

$$\frac{-3,439,777.986K_{D11} - 29.97x10^{11}}{-9.29K_{D11} - 8,091,919.251} = \frac{22,003,326.479 K_{D11} - 35.827x10^{11}}{-30.71K_{D11} + 5,001,152.421}$$

Resolviendo

$$K_{D11} = 162,828.685$$

Ecuación 6.3.5

Para obtener el valor de K_{DA} se sustituye en valor de K_{D11} en la ecuación 4.1.3

$$K_{DA} = \frac{-3,439,777.986(162,828.685) - 29.97x10^{11}}{-9.29(162,828.685) - 8,091,919.251} = 370,438.199$$

Ecuación 6.3.6

La rigidez que deben aportar los contraventeos en el marco no.11 es la siguiente:

$$K_{CTVX} = 162,828.685 - 45,840.752 = 116,987.933 \quad \text{Ecuación 6.3.7}$$

Para el marco no.8 la rigidez que deben aportar los contraventeos es:

$$K_{CTVY} = 370,438.199 - 200,892.509 = 169,545.690 \quad \text{Ecuación 6.3.8}$$

6.3.2 Modelo computacional

El procedimiento para realizar el modelo computacional es el mismo que se realizó para los dos casos anteriores, la diferencia es que el "esquema" de la estructura consistió en 10 niveles.

Para el modelo con 10 niveles, a pesar de que las NTC-Sismo indican que el método estático solo se puede utilizar para edificaciones irregulares de hasta 20m de altura, se utilizó el método solo para comparar los resultados de las distorsiones, puesto que la finalidad del proyecto solo se basa en el análisis y no en el diseño de los elementos estructurales.

Los valores de las fuerzas laterales que se aplicaron en cada nivel de la estructura, obtenidas por el método estático, se muestran a continuación.

Valores de fuerzas laterales para el modelo sin contraventeos

Tabla 6.3.2 Fuerzas laterales por sismo en la dirección "x", para el modelo de 10 niveles (elaboración propia)

Sismo en dirección X								
Nivel	hi(m)	wi(ton)	wi*hi	Fi(ton)	Vi(ton)	xi(m)	Wi*xi^2	Fi*Xi
1	3	867.12	2601.36	18.536	185.36	0.0060	0.031	0.11
2	6	867.12	5202.72	37.072	166.83	0.0186	0.300	0.69
3	9	867.12	7804.08	55.608	129.75	0.0333	0.962	1.85
4	12	867.12	10405.44	74.145	74.14	0.0483	2.023	3.58
5	15	867.12	13006.80	92.681	92.68	0.0625	3.387	5.79
6	18	867.12	15608.16	111.217	111.22	0.0754	4.930	8.39
7	21	867.12	18209.52	129.753	129.75	0.0865	6.488	11.22
8	24	867.12	20810.88	148.289	148.29	0.0956	7.925	14.18
9	27	867.12	23412.24	166.825	166.83	0.1024	9.092	17.08
10	30	821.62	24648.60	175.635	175.63	0.1073	9.460	18.85
		8625.70	141709.82	1009.761			44.60	81.74
				$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum Wi * Xi^2}{g \sum FiXi}}$	T=	1.482	Variación=	
					T(dinámico)=	1.452	0.03	
					Vb=	1009.76	ton	

Tabla 6.3.3 Fuerzas laterales por sismo en la dirección "y", para el modelo de 10 niveles (elaboración propia)

Sismo en dirección Y								
Nivel	hi(m)	wi(ton)	wi*hi	Fi(ton)	Vi(ton)	xi(m)	Wi*xi^2	Fi*Xi
1	3	867.12	2601.36033	18.536	185.36	0.0056	0.027	0.10
2	6	867.12	5202.72066	37.072	166.83	0.0170	0.251	0.63
3	9	867.12	7804.08099	55.608	129.75	0.0304	0.801	1.69
4	12	867.12	10405.4413	74.145	74.14	0.0438	1.664	3.25
5	15	867.12	13006.8017	92.681	92.68	0.0566	2.778	5.25
6	18	867.12	15608.162	111.217	111.22	0.0680	4.010	7.56
7	21	867.12	18209.5223	129.753	129.75	0.0778	5.249	10.09
8	24	867.12	20810.8826	148.289	148.29	0.0858	6.383	12.72
9	27	867.12	23412.243	166.825	166.83	0.0917	7.292	15.30
10	30	821.62	24648.6033	175.635	175.63	0.0957	7.525	16.81
		8625.70	141709.82	1009.761			35.98	73.40
					T=	1.404	Variación=	1.404
					T(dinámico)=	1.452	-0.05	1.452
					Vb=	1009.76	ton	1009.76

Valores de fuerzas laterales para el modelo con contraventeos

Los valores de las fuerzas laterales cambian debido a que, al agregar contraventeos el peso de la estructura se modifica, así como el periodo fundamental de vibrar.

Tabla 6.3.4 Fuerzas laterales por sismo en la dirección "x", para el modelo de 10 niveles con CTV (elaboración propia)

Sismo en dirección X								
Nivel	hi(m)	wi(ton)	wi*hi	Fi(ton)	Vi(ton)	xi(m)	Wi*xi^2	Fi*Xi
1	3	867.61	2602.83	18.577	185.77	0.0053	0.024	0.10
2	6	867.61	5205.67	37.154	167.19	0.0161	0.225	0.60
3	9	867.61	7808.50	55.730	130.04	0.0287	0.715	1.60
4	12	867.61	10411.33	74.307	74.31	0.0415	1.494	3.08
5	15	867.61	13014.16	92.884	92.88	0.0537	2.502	4.99
6	18	867.61	15617.00	111.461	111.46	0.0647	3.632	7.21
7	21	867.61	18219.83	130.038	130.04	0.0743	4.790	9.66
8	24	867.61	20822.66	148.615	148.61	0.0821	5.848	12.20
9	27	867.61	23425.49	167.191	167.19	0.0881	6.734	14.73
10	30	822.11	24663.33	176.026	176.03	0.0923	7.004	16.25
		8630.61	141790.79	1011.983			32.97	70.42
					T=	1.373	Variación=	
					T(dinámico)=	1.349	0.02	
					Vb=	1011.98	ton	

Tabla 6.3.5 Fuerzas laterales por sismo en la dirección “y”, para el modelo de 10 niveles con CTV (elaboración propia)

Sismo en dirección Y								
Nivel	hi(m)	w_i(ton)	w_i*h_i	F_i(ton)	V_i(ton)	x_i(m)	W_i*x_i²	F_i*X_i
1	3	2602.83255	18.577	185.77	0.005	0.022	0.09	2602.83255
2	6	5205.6651	37.154	167.19	0.015	0.195	0.56	5205.6651
3	9	7808.49765	55.730	130.04	0.0265	0.609	1.48	7808.49765
4	12	10411.3302	74.307	74.31	0.0381	1.259	2.83	10411.3302
5	15	13014.1628	92.884	92.88	0.049	2.083	4.55	13014.1628
6	18	15616.9953	111.461	111.46	0.0587	2.990	6.54	15616.9953
7	21	18219.8279	130.038	130.04	0.0672	3.918	8.74	18219.8279
8	24	20822.6604	148.615	148.61	0.074	4.751	11.00	20822.6604
9	27	23425.493	167.191	167.19	0.079	5.415	13.21	23425.493
10	30	24663.3255	176.026	176.03	0.0826	5.609	14.54	24663.3255
		141790.79	1011.98			26.85	63.54	141790.79
					T=	1.304	Variación=	
					T(dinámico)=	1.349	-0.045	
					V_b=	1011.983	ton	

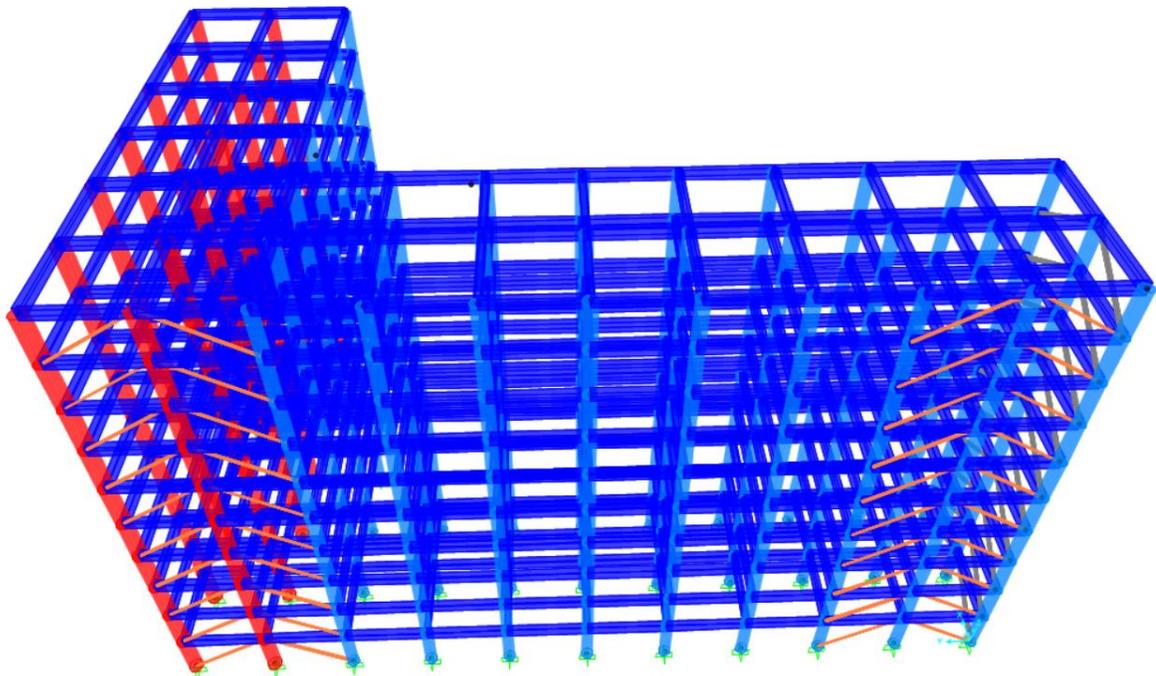


Figura 6.3.2 Vista 3D del modelo con 10 niveles con contraventeos (elaboración propia).

Capítulo 7. Resultados.

La investigación se ha enfocado en un edificio con planta con geometría en “L”, el cual, debido a su forma asimétrica, presenta una fuerte excentricidad entre el centro de masas y el centro de rigidez, generando así torsión al someterse a un evento sísmico. A continuación, se presentan y analizan los resultados obtenidos de los tres casos de estudio.

Los datos que se compararon fueron: el centro de torsión, los desplazamientos y las distorsiones en la estructura.

7.1 Comparación de los centros de torsión de los modelos sin y con contraventeos

Modelo de 1 nivel

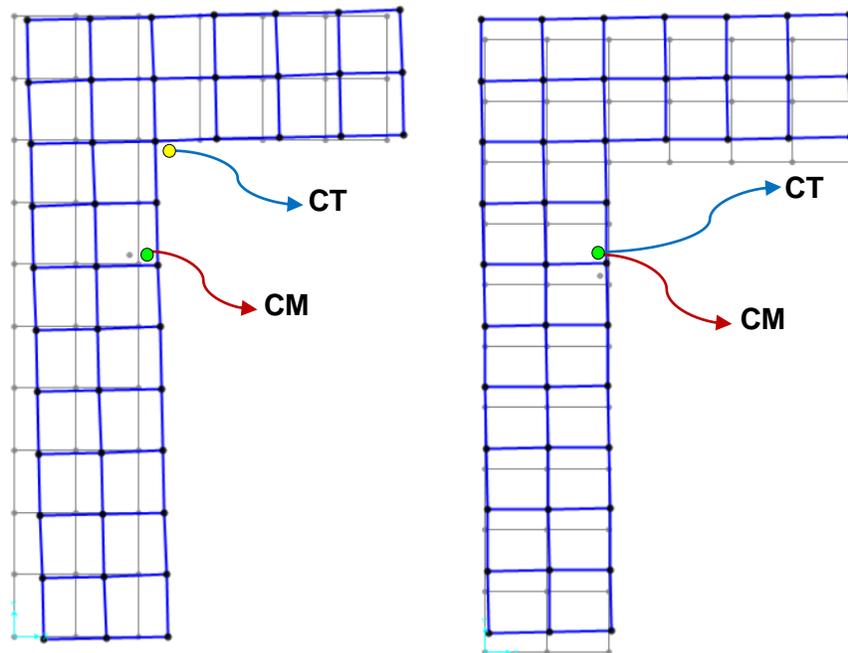


Figura 7.1.1 Comparación de los centros de torsión del modelo de 1 nivel (elaboración propia)

Modelo de 5 niveles

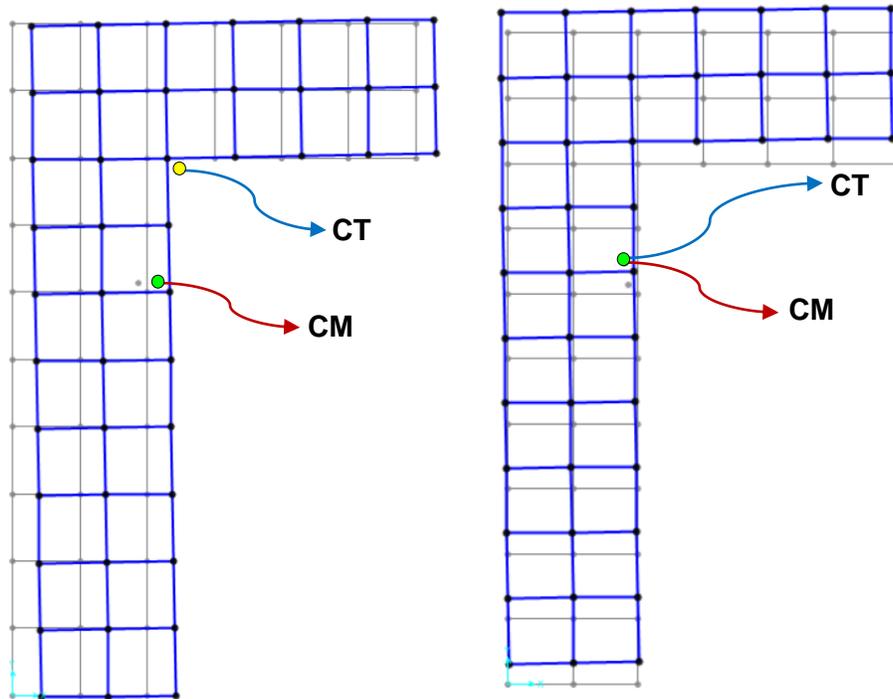


Figura 7.1.2 Comparación de los centros de torsión del modelo de 5 niveles (elaboración propia)

Modelo de 10 niveles

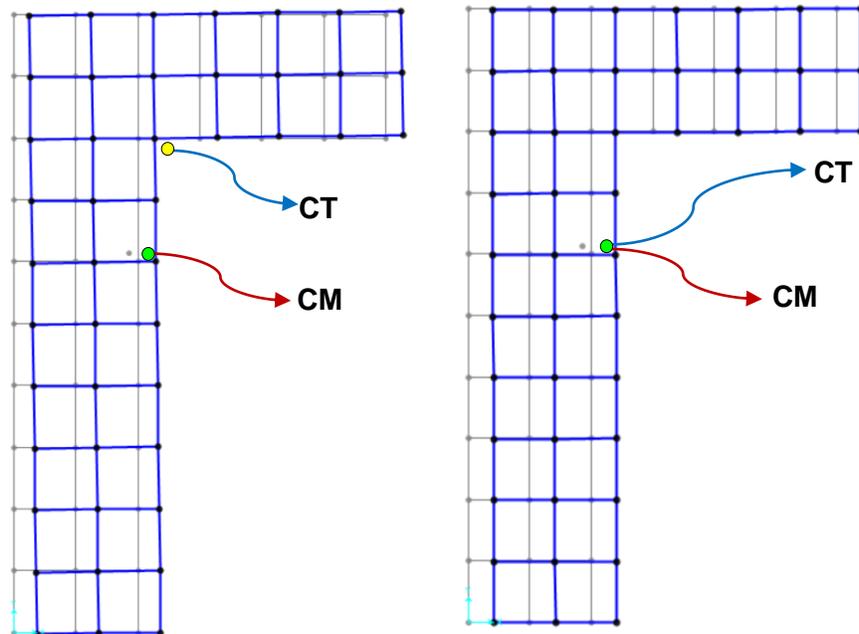


Figura 7.1.3 Comparación de los centros de torsión del modelo de 10 niveles (elaboración propia)

7.1.1 Vistas en planta de las rotaciones en cada dirección donde se aplicó el sismo

Modelo de 1 nivel sin contraventeos

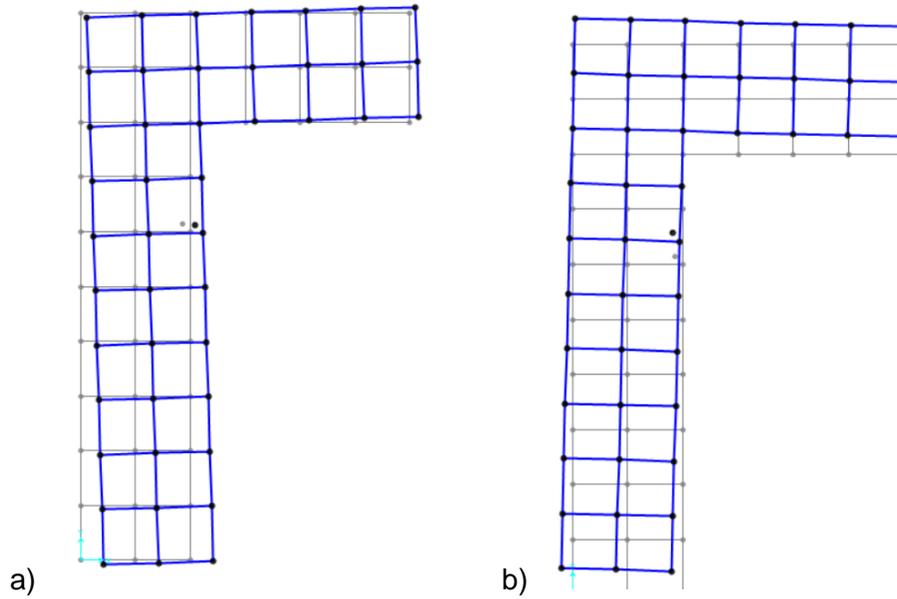


Figura 7.1.4 Modelo de 1 nivel sin contraventeos, a) sismo en dirección "x", b) sismo en dirección "y" (elaboración propia)

Modelo de 1 nivel con contraventeos

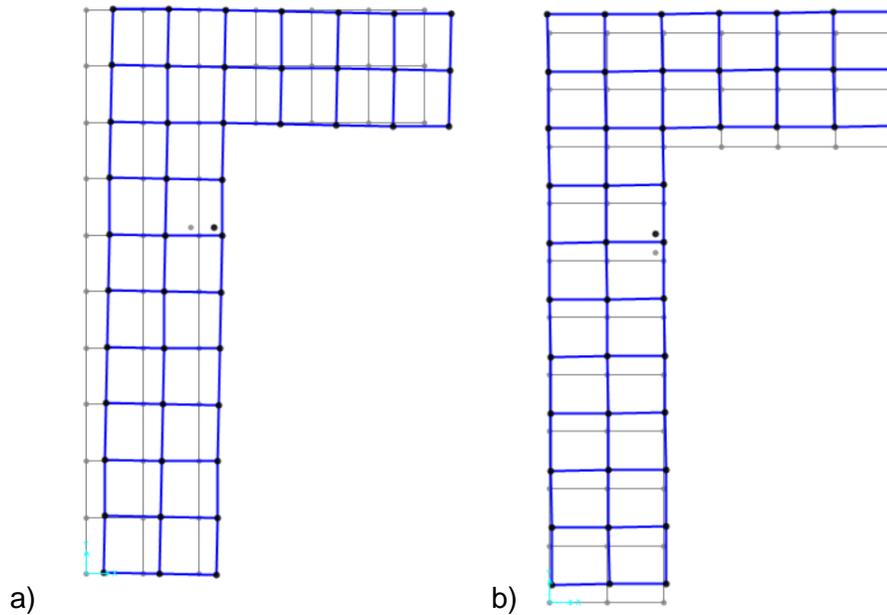


Figura 7.1.5 Modelo de 1 nivel con contraventeos, a) sismo en dirección "x" (elaboración propia), b) sismo en dirección "y"

Modelos de 5 niveles sin contraventeos

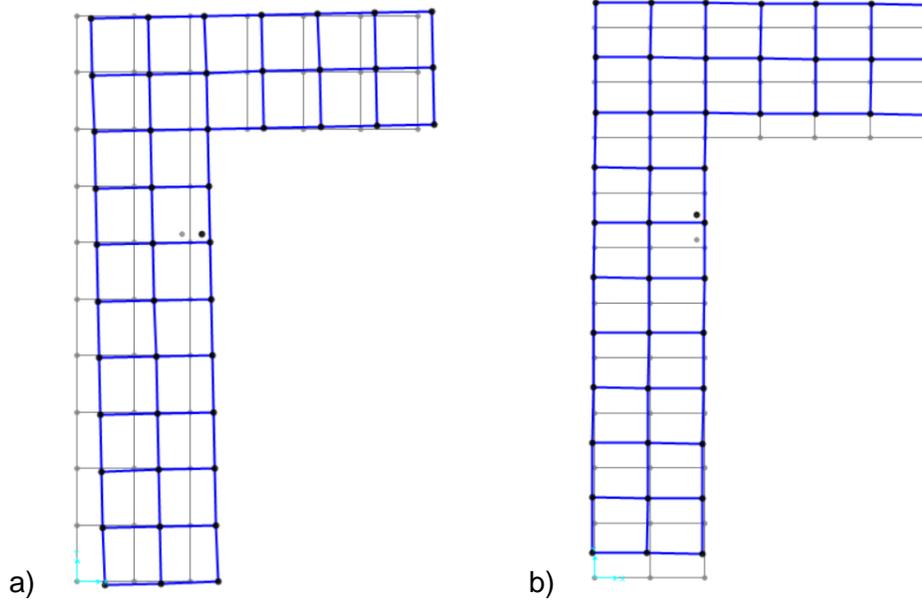


Figura 7.1.6 Modelo de 4 niveles sin contraventeos, a) sismo en dirección "x", b) sismo en dirección "y" (elaboración propia).

Modelos de 5 niveles con contraventeos

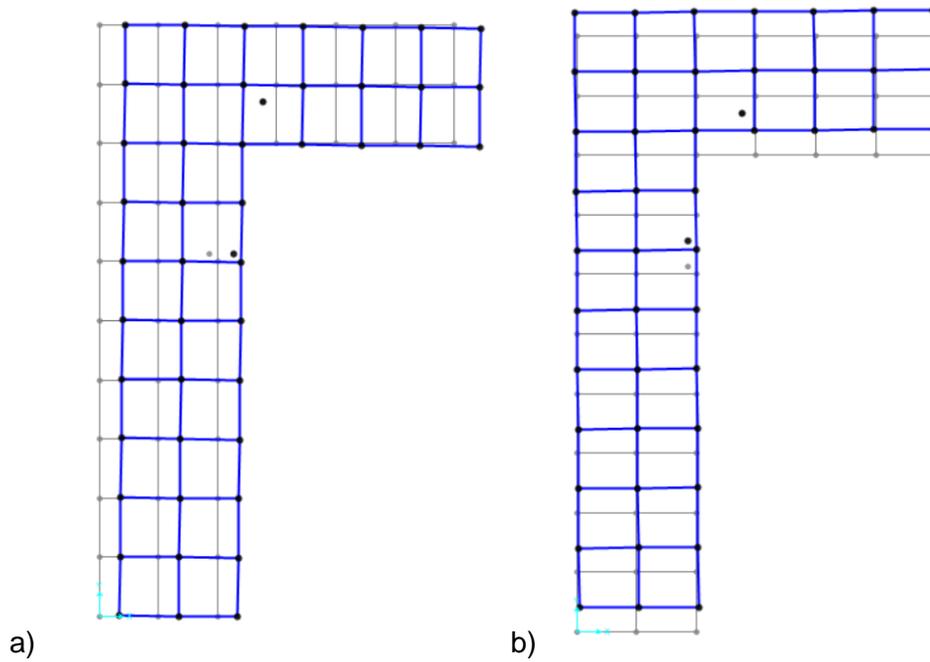


Figura 7.1.7 Modelo de 4 niveles con contraventeos, a) sismo en dirección "x", b) sismo en dirección "y" (elaboración propia)

Modelos de 10 niveles sin contraventeos

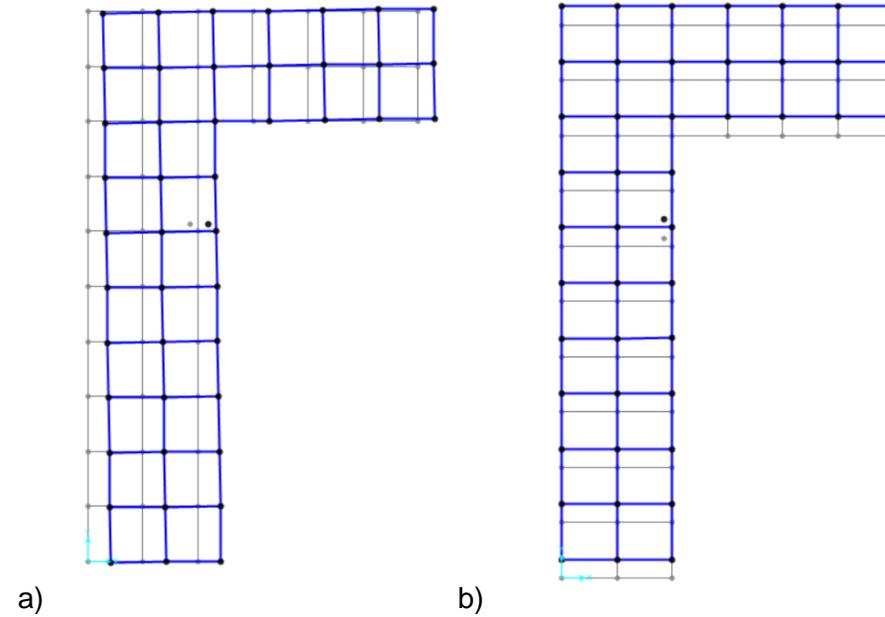


Figura 7.1.8 Modelo de 10 niveles sin contraventeos, a) sismo en dirección "x", b) sismo en dirección "y" (elaboración propia)

Modelos de 10 niveles con contraventeos

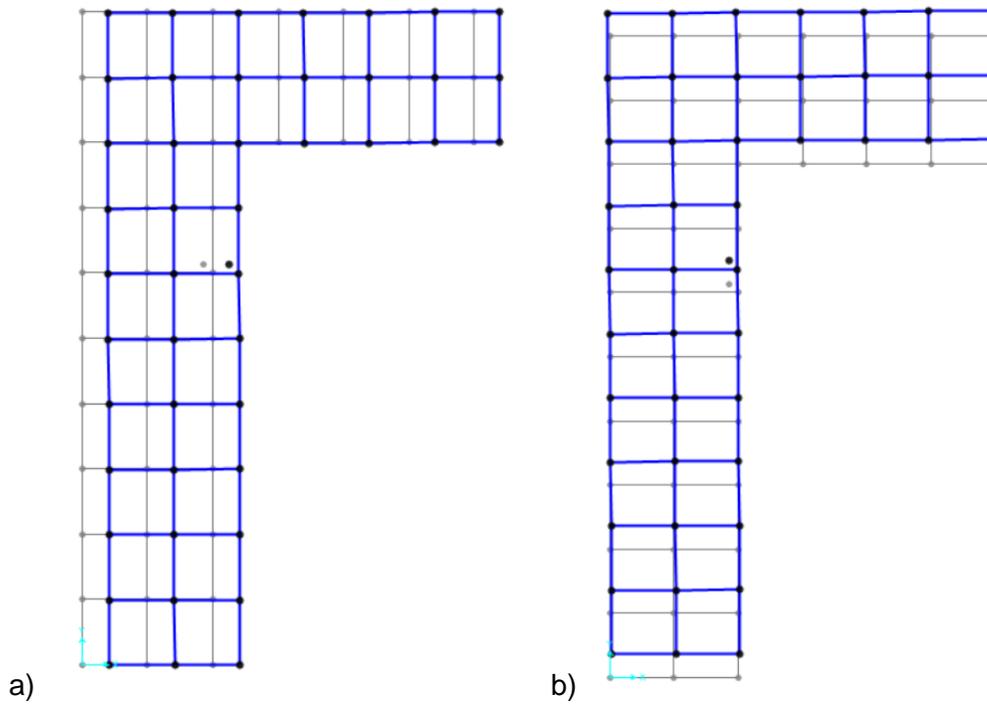


Figura 7.1.9 Modelo de 10 niveles con contraventeos, a) sismo en dirección "x", b) sismo en dirección "y" (elaboración propia)

7.2 Desplazamientos y distorsiones

Además de obtener algunos parámetros sísmicos de la estructura, se graficaron las distorsiones y desplazamientos máximos de cada modelo, para cada dirección en la que se aplicaron fuerzas sísmicas, en dirección "x" y en dirección "y". Con base a los resultados, se observa que los desplazamientos en modelos con contraventeos reducen hasta 38% en dirección "x" y hasta en un 29% en dirección "y", en comparación con los modelos sin contraventeos. Estos resultados son similares a los obtenidos por Arias Lizárraga (2023), en donde se obtuvieron distorsiones de entrepisos 50% menores en modelos donde se ocuparon contraventeos en comparación a los modelos donde no se utilizaron contraventeos.

En las siguientes graficas se observan los resultados de las distorsiones de entrepisos en cada modelo realizado, así como los desplazamientos máximos.

Modelo de 1 nivel

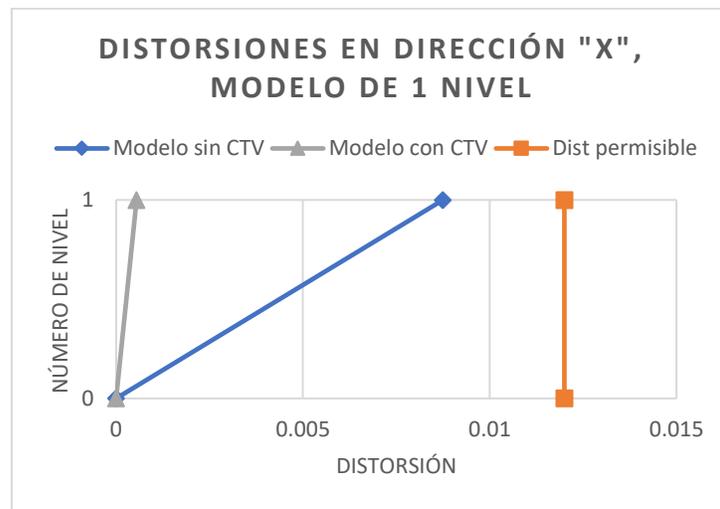


Figura 7.2.1 Distorsiones de entrepiso en dirección "X", modelo con 1 nivel (elaboración propia).

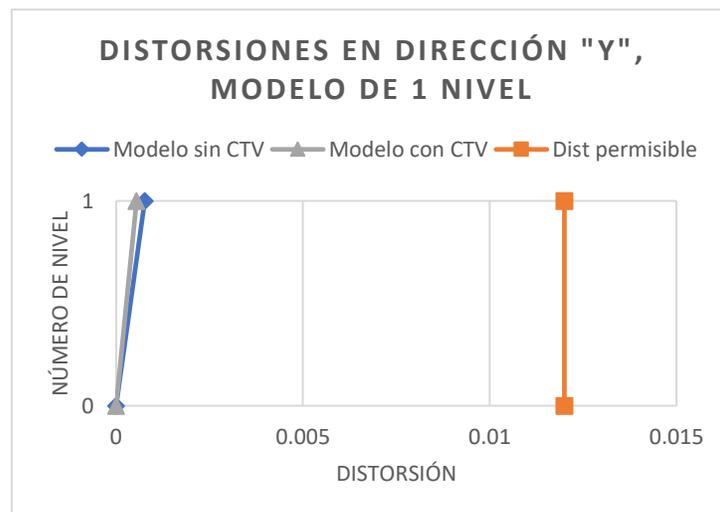


Figura 7.2.2 Distorsiones de entrepiso en dirección "Y", modelo con 1 nivel (elaboración propia).

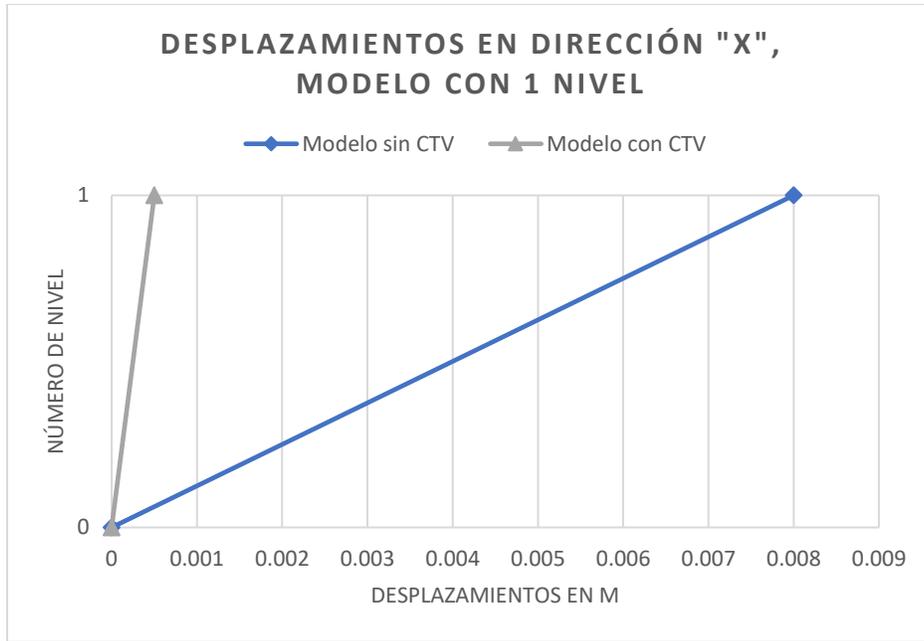


Figura 7.2.3 Desplazamientos en dirección "X", modelo con 1 nivel (elaboración propia).

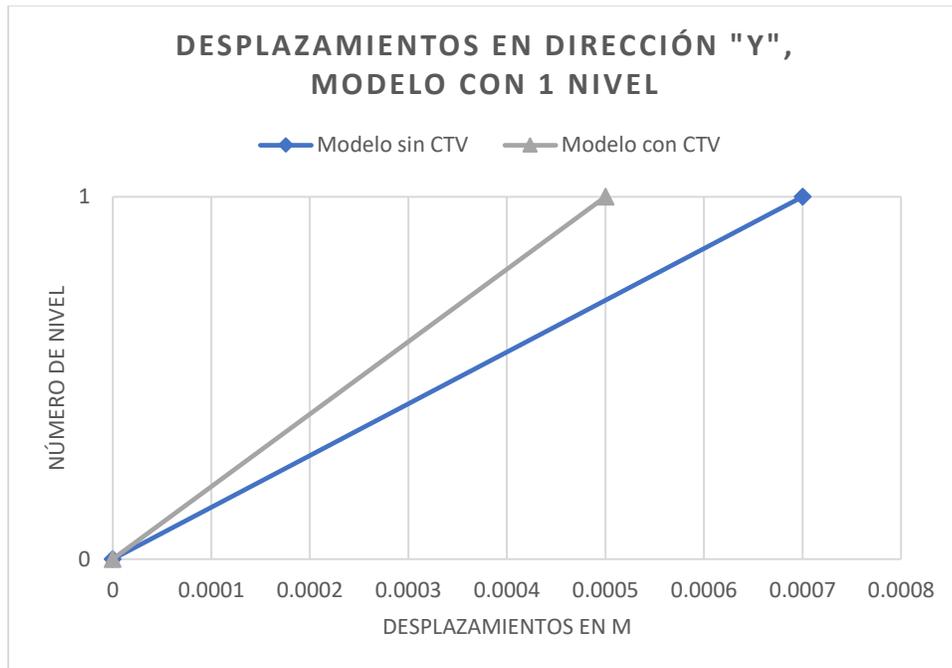


Figura 7.2.4 Desplazamientos en dirección "Y", modelo con 1 nivel (elaboración propia).

Modelo con 5 niveles

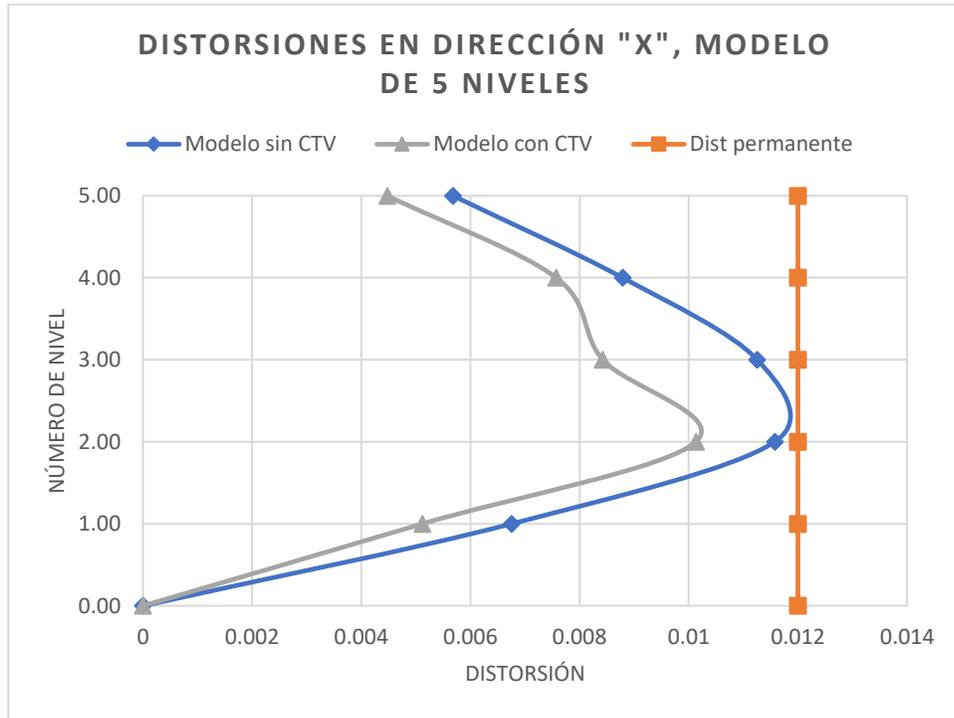


Figura 7.2.5 Distorsiones de entrepiso en dirección "X", modelo con 5 niveles (elaboración propia).

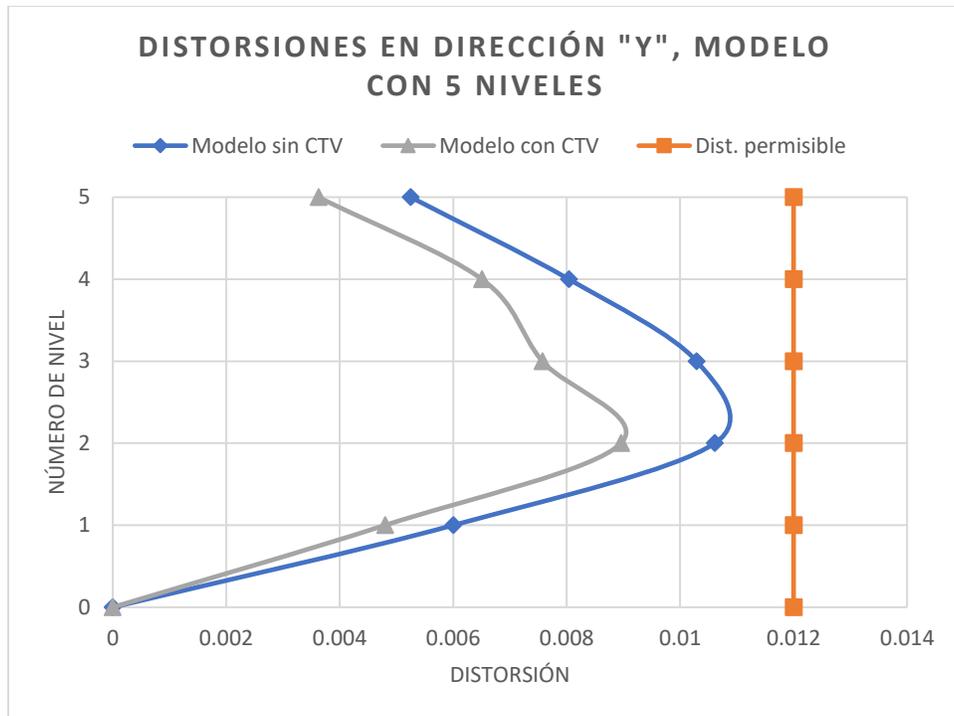


Figura 7.2.6 Distorsiones de entrepiso en dirección "Y", modelo con 5 niveles (elaboración propia).

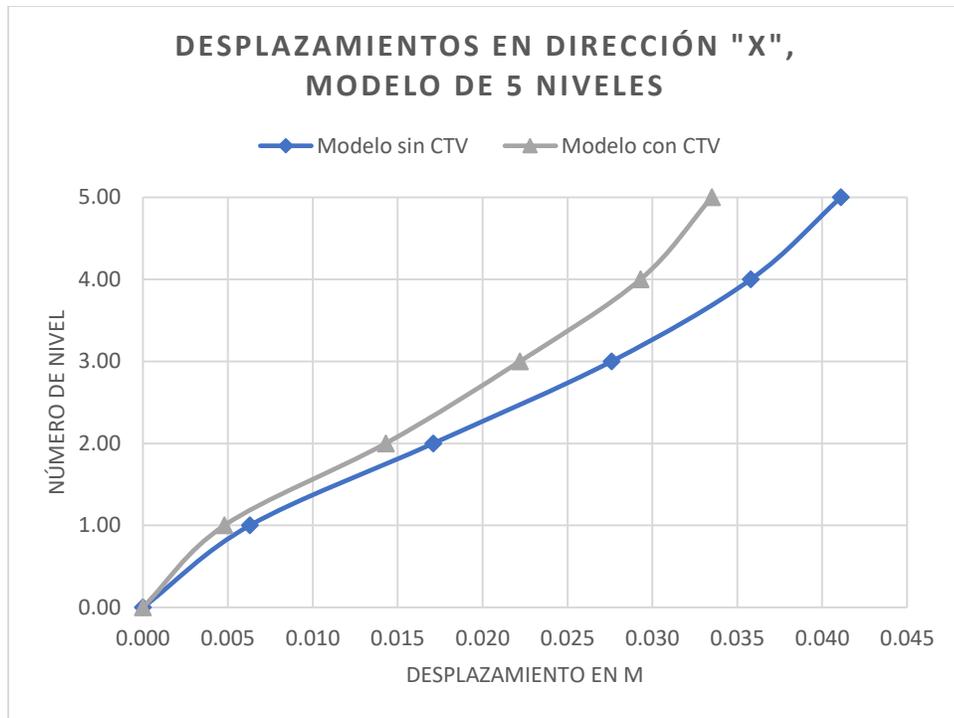


Figura 7.2.7 Desplazamientos en dirección "X", modelo con 4 niveles (elaboración propia).

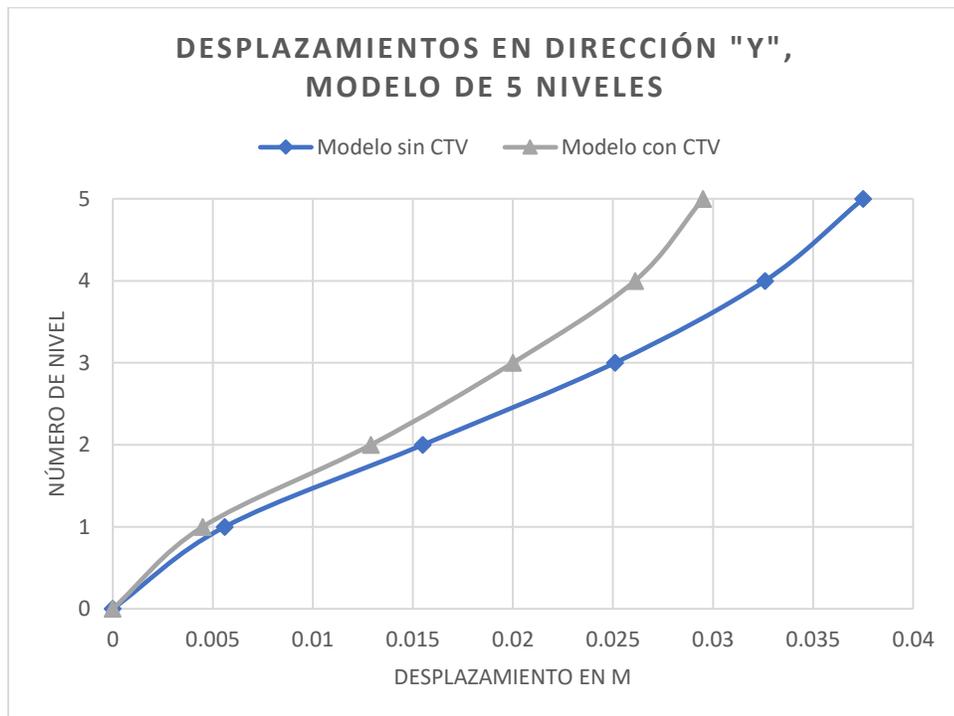


Figura 7.2.8 Desplazamientos en dirección "Y", modelo con 4 niveles (elaboración propia).

Modelo con 10 niveles

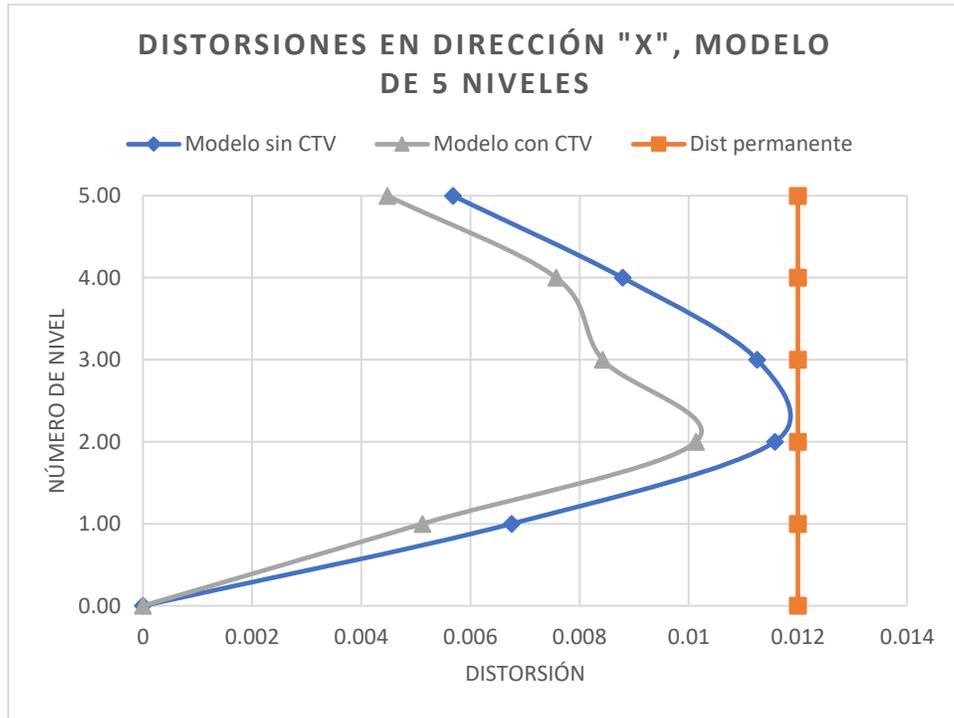


Figura 7.2.9 Distorsiones de entrepiso en dirección "X", modelo con 10 niveles (elaboración propia)

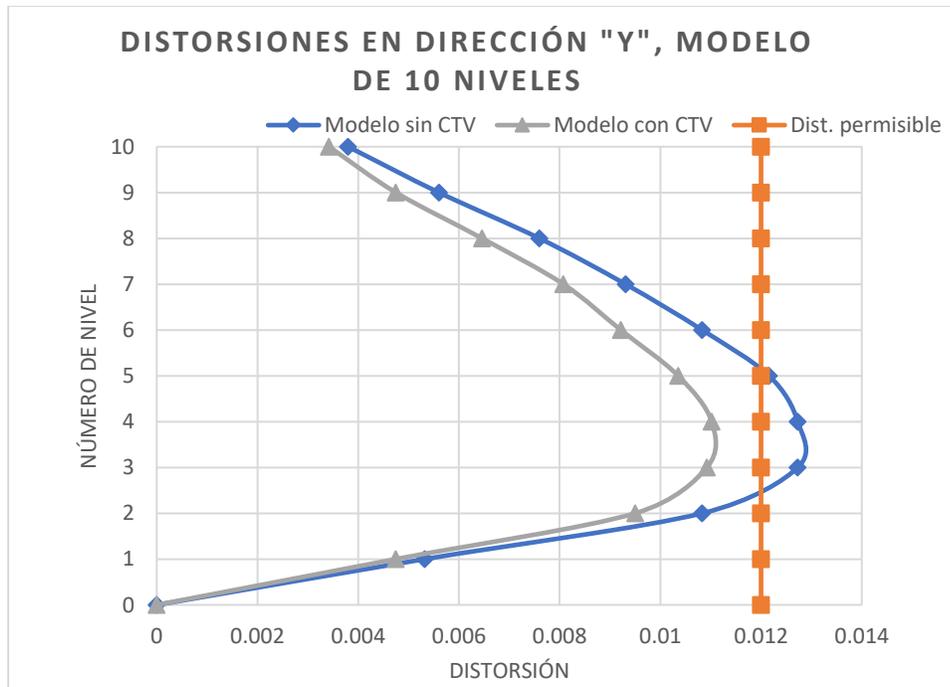


Figura 7.2.10 Distorsiones de entrepiso en dirección "Y", modelo con 10 niveles (elaboración propia)

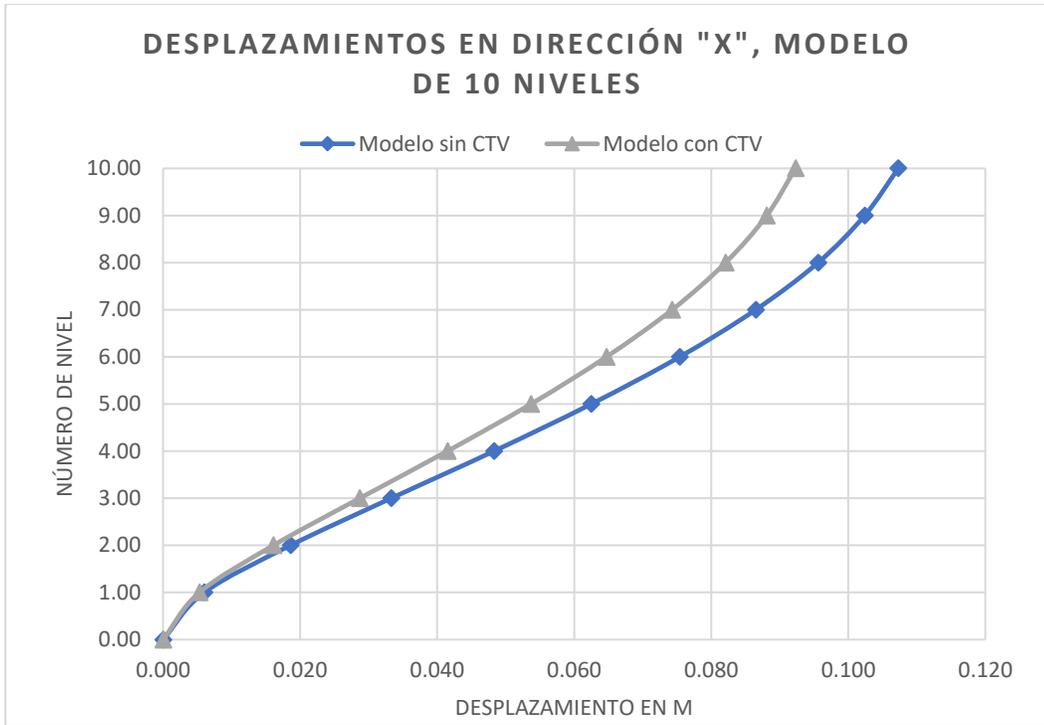


Figura 7.2.11 Desplazamientos en dirección "X", modelo con 10 niveles (elaboración propia)

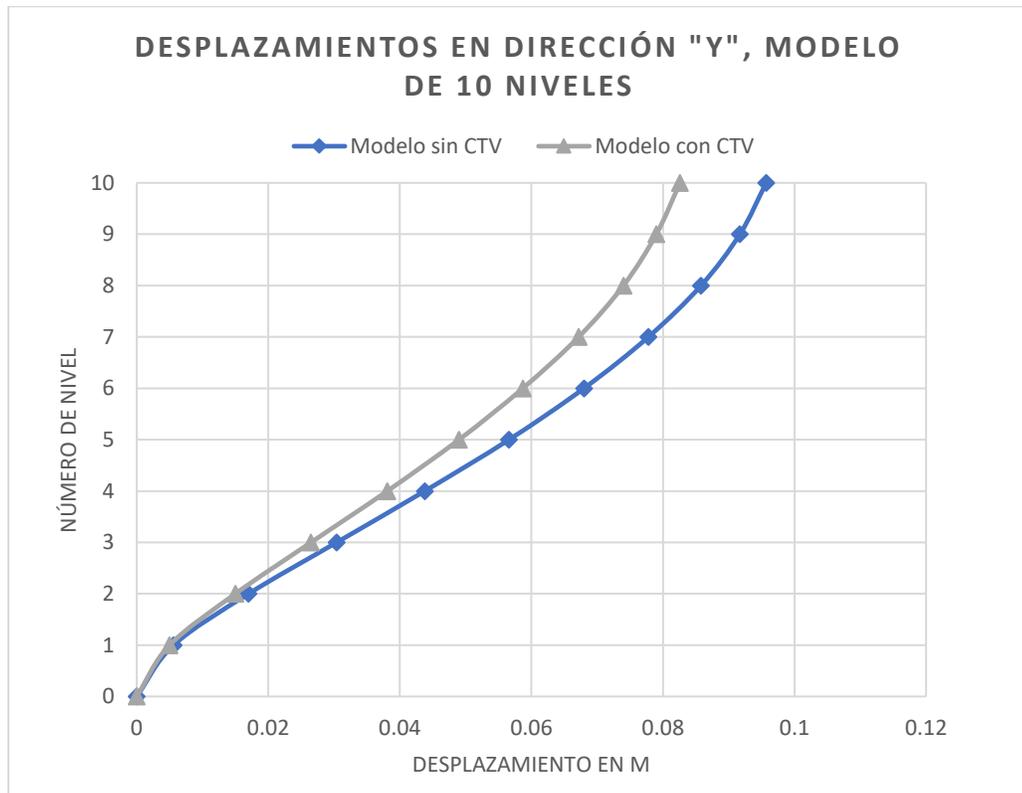


Figura 7.2.12 Desplazamientos en dirección "Y", modelo con 10 niveles (elaboración propia)

La comparación de estos modelos permitió observar que los desplazamientos laterales redujeron significativamente en los modelos con contraventeos, disminuyendo hasta en un 38% en dirección "x" y hasta en un 29% en la dirección "y", respecto a los modelos sin rigidez adicional. Es importante mencionar que se deben elegir de manera inteligente los marcos en dónde es necesario agregar rigidez lateral, primeramente, identificando el centro de masas y posteriormente el centro de torsión.

Al utilizar contraventeos en configuración en "V invertida" con perfiles de acero estructural de sección tubular "OR", la rigidez lateral de la estructura se incrementó, lo que ayudó a disminuir la distancia entre el centro de torsión y el centro de masas. Este diseño específico se ha justificado en estudios previos que demuestran que los contraventeos en "V invertida" proporcionan un mejor comportamiento en zonas sísmicas.

En los resultados se observa que las distorsiones de entrepiso de cada uno de los casos de estudio cumplen con el límite permisible, sin embargo, cabe mencionar que para este trabajo lo que se pretenden es comprobar la reducción de los desplazamientos y distorsiones al utilizar la metodología propuesta, por lo que en los resultados no se enfoca en la cantidad si no la diferencia entre modelos sin contraventeos y con contraventeos.

Capítulo 8. Conclusiones y recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos al analizar los casos de estudio tanto con la metodología propuesta como con los modelos computacionales, se presentan las siguientes conclusiones y recomendaciones:

1. Se pudo comprobar que la metodología propuesta nos proporciona la cantidad de rigidez lateral necesaria para disminuir lo más posible la excentricidad estática, así mismo la aplicación de la misma es relativamente sencilla siempre y cuando se comprenda el problema de la torsión sísmica.
2. Los modelos a los que se les adicionó rigidez lateral con los contraventeos, presentaron una disminución de más del 80% en los desplazamientos laterales, en comparación con los modelos sin contraventeos.
3. Las rotaciones en planta se redujeron en más del 50% al aplicar fuerzas laterales en don direcciones ortogonales entre sí.
4. El uso adecuado de contraventeos demostró ser efectivo para minimizar la torsión sísmica y mejorar la estabilidad estructural. La configuración en "V invertida" resultó óptima para disipar esfuerzos laterales, sin embargo, es posible utilizar cualquier otra configuración de contraventeos siempre y cuando estos aporten la cantidad de rigidez obtenida por la metodología.
5. Así mismo, se podrían utilizar cualesquiera otros elementos estructurales que aporten la rigidez necesaria para disminuir la excentricidad estática, tales como muros de concreto, muros de placa de acero o inclusive el aumento en la sección de las columnas, aunque esta última opción puede no ser siempre la más óptima.
6. La metodología propuesta, está enfocada en modificar la rigidez lateral y no depende de la magnitud de la demanda sísmica, por lo que puede aplicarse en zonas con alta o baja sismicidad, ya que la excentricidad estática es una propiedad de la estructura y no depende de las acciones externas.
7. Debido a que las rotaciones en planta de los modelos analizados disminuyeron significativamente, las plantas con contraventeos presentaron un comportamiento con desplazamientos predominantemente traslacionales, es decir, los desplazamientos de la estructura proporcionaron menores efectos de torsión sísmica.
8. La modificación de la rigidez lateral de una estructura influye directamente en su periodo fundamental de vibración. En el presente estudio, dicha modificación resultó en una disminución del periodo en los tres modelos analizados. Sin embargo, es importante destacar que un periodo más corto no siempre implica un mejor desempeño estructural. Lo verdaderamente relevante es la posición del periodo de vibrar con respecto al espectro de respuesta sísmica del sitio específico, ya que este define las aceleraciones que actuarán sobre la estructura.
9. El trabajo de investigación podría enriquecerse al incluir un análisis sísmico no lineal presentando resultados del comportamiento de la estructura cuando incursiona en el rango inelástico.
10. De igual manera, se pueden analizar varias configuraciones de forma geométrica en planta, que sean susceptibles a los efectos de torsión, como lo son estructuras con geometría en "T", en "H" o en cualquier otro modelo con planta altamente asimétrica.
11. Es importante mencionar que existen otras soluciones para disminuir los efectos de la torsión sísmica, como el dividir la estructura en dos o más cuerpos regulares, sin

embargo, no siempre es posible, sobre todo cuando la planta es muy irregular, en este sentido, el objetivo de este trabajo es reducir la excentricidad estática independientemente de la geometría en planta del edificio.

12. Finalmente, esta investigación confirma que la modificación de la rigidez lateral es una opción eficaz para reducir la excentricidad en edificios irregulares en planta, mejorando el comportamiento estructural del edificio sin modificar el diseño arquitectónico. La aplicación correcta del método podría servir como una herramienta fundamental para ingenieros y diseñadores que buscan garantizar la seguridad en edificaciones modernas y complejas ante eventos sísmicos.

Referencias

1. Abd-el-rahim, H. H. A., & Farghaly, A. A. (2010). *INFLUENCE OF STRUCTURAL IRREGULARITY IN PLAN FLOOR SHAPE ON SEISMIC RESPONSE OF BUILDINGS*. JES. Journal of Engineering Sciences, 38(4), 911–928. <https://doi.org/10.21608/jesaun.2010.125548>
2. Arias Lizárraga, F. (2023). Optimización del diseño estructural de un edificio irregular ubicado en Acapulco, Guerrero, México; concreto reforzado versus acero. http://repositorio.uas.edu.mx/jspui/handle/DGB_UAS/440
3. Barbat, H., Oller, S., & Vielma, J. C. (s/f). *Cálculo y diseño sismorresistente de edificios. Aplicación de la norma NCSE-02*. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/28500/MIS56.pdf>
4. Boddu Venkata, S. P., Brungi Sri, V., & Narayana, J. L. (2021). *Seismic analysis of various combinations of irregularities in a structure*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1070(1), 012036. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1070/1/012036>
5. Bohara, B. K., Ganaie, K. H., M.Tech in Structural Engineering Sharda University, Saha, P., & Department of Civil Engineering, Sharda University, India. (2021). Effect of position of steel bracing in L-shape reinforced concrete buildings under lateral loading. *Research on Engineering Structures and Materials*. <https://doi.org/10.17515/resm2021.295st0519>
6. Bojórquez, J., Arias, F., Velarde, F., Reyes, H., Sánchez, A., & Rocha, M. (2024). Optimización del diseño estructural de un edificio irregular ubicado en una zona de alta sismicidad. *REVISTA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA UAS*, 6, Article 6. <https://revistas.uas.edu.mx/index.php/RITUAS/article/view/719>
7. Botis, M. F., & Cerbu, C. (2020). A Method for Reducing of the Overall Torsion for Reinforced Concrete Multi-Storey Irregular Structures. *Applied Sciences*, 10(16), 5555. <https://doi.org/10.3390/app10165555>
8. Buendía Sánchez, L. M., Reinoso Angulo, E., Buendía Sánchez, L. M., & Reinoso Angulo, E. (2019). Análisis de los daños en viviendas y edificios comerciales durante

- la ocurrencia del sismo del 19 de septiembre de 2017. *Ingeniería sísmica*, 101, 19–35. <https://doi.org/10.18867/ris.101.508>
9. Christian, M., & Santiago, M. (2017). *Coeficiente Irregularidad en Planta a partir del Análisis de Torsión en Estructuras Irregulares*. 39(2).
 10. Crisafulli, F. J. (2018). *Diseño sismorresistente De construcciones De acero*. Quinta. Santiago de Chile: Asociación Latinoamericana del Acero-Alacero. https://cms.alacero.org/uploads/disenosismorresistente_de_construcciones_de_acero_5ta_ed_20135148cc.pdf
 11. Colunga, A. T. (2010). *IRREGULARIDAD ESTRUCTURAL Y SU EFECTO EN LA RESPUESTA SÍSMICA DE EDIFICIOS*.
https://www.researchgate.net/publication/262180547_Irregularidad_estructural_y_su_efecto_en_la_respuesta_sismica_de_edificios
 12. Del Rincón De La Macorra, A. (2017). *Contravientos en la respuesta sísmica de edificios regulares*. <http://zaloamati.azc.uam.mx/handle/11191/6223>
 13. Delgado Anguaino, L. M. y Ledesma Rivera, R. (2016). *Consideraciones para el análisis sísmico de edificios irregulares empleando direcciones principales*. <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000744389/3/0744389.pdf>
 14. Dhakal, A., & Shrestha, R. (2022). Torsional Improvements in a Multistoried Building with Plan Irregularities. *Journal of Advanced College of Engineering and Management*, 7(01), 17–27. <https://doi.org/10.3126/jacem.v7i01.47317>
 15. Garrido, C., & Fernandez-Davila, V. (2024). Comportamiento sísmico de edificios irregulares en planta considerando sistemas de aislación con excentricidad de rigidez. *Ingeniería*, 34(2), Article 2. <https://doi.org/10.15517/ri.v34i2.55859>
 16. Georgoussis, G. K., & Mamou, A. (2018). The effect of mass eccentricity on the torsional response of building structures. *Structural Engineering and Mechanics*, 67(6), 671–682. <https://doi.org/10.12989/SEM.2018.67.6.671>
 17. Gobierno de la Ciudad de México. (2023). *Norma Técnica Complementaria para el Diseño por Sismo*. https://www.smie.org.mx/uploads/2/2023-11/ntc_cdmx_2023.pdf.

18. Gobierno de la Ciudad de México. (2023). *Norma Técnica Complementaria para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto*. https://www.smie.org.mx/uploads/2/2023-11/ntc_cdmx_2023.pdf.
19. Gobierno de la Ciudad de México. (2023). *Norma Técnica Complementaria Sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones*. https://www.smie.org.mx/uploads/2/2023-11/ntc_cdmx_2023.pdf.
20. González Herrera, R., & Gómez-Soberón, M. (2008). INFLUENCE OF PLAN IRREGULARITY OF BUILDINGS. https://www.researchgate.net/publication/262261089_INFLUENCE_OF_PLAN_IRREGULARITY_OF_BUILDINGS
21. Inga Solórzano, R. P. (2019). ANÁLISIS DE LA ASIMETRÍA ESTRUCTURAL DE UN EDIFICIO Y SU INFLUENCIA EN EL EFECTO TORSIONAL. *Facultad de Ingeniería*. <http://repositorio.upla.edu.pe/handle/20.500.12848/938>
22. INIFED (2022). *Normas y Especificaciones Técnicas para la Realización de Estudios, Proyectos, Construcción e Instalaciones*. https://www.inifed.gob.mx/doc/pdf/2022/normatividad/VOLUMEN_4_TOMO_II_Diseño_por_Sismo.pdf
23. Lyublinskiy, V. (2024). *Torsion of asymmetric buildings during non-linear deformation of reinforced concrete*. *E3S Web of Conferences*, 533, 02013. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453302013>
24. Ñauta Ayala, D. O., & Vélez Lliguisupa, D. I. (2024). Análisis comparativo de soluciones para un edificio asimétrico sometido a torsión por efecto sísmico [bachelorThesis, Universidad del Azuay]. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/14608>
25. Padilla Quincot, G. (2010). PROPUESTA PARA CONSIDERAR LA IRREGULARIDAD ESTRUCTURAL EN LA RESISTENCIA LATERAL DE LAS ESTRUCTURAS EN EL PERÚ.
26. Pérez Peña, L. A. & Doz, G. (2018). *Estudio de la influencia de las irregularidades en planta en la respuesta sísmica de una estructura de concreto armado*. https://www.scipedia.com/public/Perez_Pena_Doiz_2018a#

27. Pérez Rocha, L. E. P. (2023). *PRODISIS: Inicios y actualidad*. <https://cicepac.org/wp-content/uploads/2023/07/Prodisis-Inicio-y-Actualidad.pdf>
28. Picazo Gama, Y. (2014). Modelo simplificado para estimar las funciones de vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios asimétricos en planta. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/6891>
29. Portal Consejería Jurídica y de Servicios Legales del DF (2024) *REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES PARA EL DISTRITO FEDERAL*. <https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/index.php/leyes/reglamentos/35-#reglamento-de-construcciones-para-el-distrito-federal>
30. *PRODISIS | Gerencia de Ingeniería Civil*. (2017). Recuperado el 8 de octubre de 2024, de <https://civil.ineel.mx/prodisis/es/prodisis.php>
31. Ramírez Castañeda, J. E. (2015). *Obtención de las direcciones principales de análisis en edificios irregulares en planta*. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/8413>
32. Restrepo, J. I., Rodríguez, M. E., Núñez, J., & Reinoso, E. (2023). Método sencillo para considerar la irregularidad de estructuras en el diseño sismorresistente. Aplicación en la determinación de aceleraciones de piso para el diseño sísmico de diafragmas, apéndices, y elementos no estructurales en edificios. *Ingeniería sísmica*, 111, 57-79.
33. Rodríguez, M. E. (2023). *Normativas de diseño sismorresistente de estructuras, enseñanzas de terremotos y de resultados experimentales*. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 110, 19–44. <https://doi.org/10.18867/ris.110.611>
34. Salazar Moreno, A. F. (2020) *Interpretación de la rigidez lateral es escaleras para el balance torsional aproximado en configuraciones estructurales de edificaciones de concreto reforzado*. <http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/7209/2/8.%20TESIS%20ANDRES%20SALAZAR.pdf>
35. Sherif Mehana, M., Mohamed, O., & Isam, F. (2019). Torsional Behaviour of Irregular Buildings with Single Eccentricity. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 603(5), 052028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/603/5/052028>

36. Siroya, R., & Patel, D. V. R. (2021). STUDY OF TORSIONAL IRREGULAR MULTISTOREY STRUCTURE UNDER SEISMIC FORCES. <https://www.irjet.net/archives/V8/i9/IRJET-V8I9777.pdf>
37. Subodh. S. P., Ajim G.M., Pritam M. y Murugesh K., (2017). *A STUDY OF TORSIONAL EFFECT ON MULTI-STORIED BUILDING WITH PLAN-IRREGULARITY*. International Journal of Advanced Research, 5(1), 1625–1632. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/2928>
38. Tapia Hernandez, E. (s.f.) *Uso de contravientos de acero*. Gerdau Corsa. https://www.gerdaucorsa.com.mx/sites/mx_gerdau/files/PDF/USO%20DE%20CONTRAVIENTOS%20DE%20ACERO.pdf
39. *Terremoto 7.7 en Myanmar 2025: ¿Por qué un edificio resistió y otro colapsó?* (2025, marzo 31). [Video recording]. <https://www.youtube.com/watch?v=gserQ9ZTjm4>
40. Trujillo Tamayo, S. F. (2020). *Análisis de los efectos de la irregularidad en planta y esbeltez en el comportamiento sísmico de edificios* [Master thesis, Universitat Politècnica de Catalunya]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/192800>
41. UNE-ENV. (2000). *Eurocódigo 8. Disposiciones para el Proyecto de Estructuras Sismorresistentes. Parte 3*. <https://pdfcoffee.com/eurocodigo-8-9-pdf-free.html>
42. CFE. (2015). *Manual de Diseño de Obras Civiles*. Diseño por Sismo. Recuperado el 19 de junio de 2025, de https://www.academia.edu/24719547/Manual_de_diseno_por_sismo_CFE

Glosario

Q, factor de comportamiento sísmico

Q', factor de reducción por comportamiento sísmico

R' factor de reducción por redundancia

T, periodo fundamental de la estructura

Ta, es el límite inferior de la meseta del espectro de diseño

Tb, es el límite superior de la meseta del espectro de diseño

Tc, es el periodo de inicio de la rama descendente en que los desplazamientos espectrales tienden correctamente al desplazamiento del terreno.

k, es el parámetro que controla la caída de las ordenadas espectrales para $T \geq T_c$

k1, factor de corrección por hiperestaticidad

k2, factor de incremento para estructuras pequeñas y rígidas

r, parámetro que controla la caída de las ordenadas espectrales para $T_b \leq T < T_c$

c, es la máxima ordenada espectral

a0, es la aceleración máxima del terreno

ρ , factor de redundancia, se calcula de la siguiente forma:

$$\rho = k + (1 - k) \left(\frac{T_c}{T} \right)^2$$

R, factor de sobre-resistencia

R0, factor básico de sobre-resistencia del sistema estructural

α , factor correctivo por irregularidad



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
 Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
 School of Engineering and Basic Sciences

Mineral de la Reforma, Hgo., a 28 de julio de 2025

Número de control: ICBI-D/1290/2025

Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado al egresado de la Licenciatura en Ingeniería Civil **Sarahí Oropeza Porras**, quien presenta el trabajo de titulación **“Obtención de la rigidez lateral en edificios irregulares en planta, con diafragma rígido, para disminuir la excentricidad estática”**, ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Mtro. Jesús Eduardo Ramírez Castañeda

Secretario: Ing. Michelle Alejandra Monroy Sánchez

Vocal: Dr. Omar Caballero Garatachea

Suplente: Mtro. Luis Leopoldo Leonar Lira

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
 “Amor, Orden y Progreso”

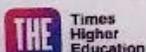
Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
 Director del ICBI



GVR/YCC

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
 Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
 direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergarar@uaeh.edu.mx

“Amor, Orden y Progreso”



uaeh.edu.mx