



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CAMPUS I**



**“IMPORTANCIA Y BENEFICIOS DE CONSIDERAR LA
INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA EN EL ANÁLISIS Y
DISEÑO DE EDIFICIOS DE CONCRETO REFORZADO”**

TESIS

Que para obtener el grado de maestría en:
INGENIERÍA CON FORMACIÓN EN CONSTRUCCIÓN

Presenta:
WILLIAM VELÁZQUEZ RAMÍREZ C100130

Director de tesis:
M.I. JORGE ALFREDO AGUILAR CARBONEY

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; abril de 2024.



Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
15 de abril del 2024
Oficio No. F.I.01.666/2024

C. WILLIAM VELÁZQUEZ RAMÍREZ
EGRESADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CON FORMACIÓN EN CONSTRUCCIÓN
PRESENTE.


Con base en el Reglamento de Evaluación Profesional para los egresados de la Universidad Autónoma de Chiapas, y habiéndose cumplido con las disposiciones en cuanto a la aprobación por parte de los integrantes del jurado en el contenido de su Tesis Titulada:

“IMPORTANCIA Y BENEFICIOS DE CONSIDERAR LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA EN EL ANÁLISIS Y DISEÑO DE EDIFICIOS DE CONCRETO REFORZADO”.

CERTIFICO el **VOTO APROBATORIO** emitido por este jurado, y autorizo la entrega de tesis digital elaborada a través del Programa Institucional para la Obtención del Grado Académico (PIGA), para que sea sustentado en su Examen de grado de Maestro en Ingeniería con Formación en Construcción.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE
“POR LA CONCIENCIA DE LA NECESIDAD DE SERVIR”


DR. OMAR ANTONIO DE LA CRUZ COURTOIS
DIRECTOR



Ccp. Dr. Humberto Miguel Sansebastián García. Coordinador de Investigación y Posgrado. Facultad de Ingeniería, Campus I. UNACH.
Archivo/minutario
OACC/HMSG/itcpg*





Código: FO-113-05-05

Revisión: 0

CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DE LA TESIS DE TÍTULO Y/O GRADO.

El (la) suscrito (a) WILLIAM VELAZQUEZ RAMIREZ
Autor (a) de la tesis bajo el título de "IMPORTANCIA Y BENEFICIOS DE CONSIDERAR LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA EN EL ANÁLISIS Y DISEÑO DE EDIFICIOS DE CONCRETO REFORZADO."
presentada y aprobada en el año 2024 como requisito para obtener el título o grado de MAESTRÍA EN INGENIERÍA CON FORMACIÓN EN CONSTRUCCIÓN, autorizo licencia a la Dirección del Sistema de Bibliotecas Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH), para que realice la difusión de la creación intelectual mencionada, con fines académicos para su consulta, reproducción parcial y/o total, citando la fuente, que contribuya a la divulgación del conocimiento humanístico, científico, tecnológico y de innovación que se produce en la Universidad, mediante la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Consulta del trabajo de título o de grado a través de la Biblioteca Digital de Tesis (BIDITE) del Sistema de Bibliotecas de la Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH) que incluye tesis de pregrado de todos los programas educativos de la Universidad, así como de los posgrados no registrados ni reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad del CONACYT.
- En el caso de tratarse de tesis de maestría y/o doctorado de programas educativos que sí se encuentren registrados y reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del Consejo Nacional del Ciencia y Tecnología (CONACYT), podrán consultarse en el Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma de Chiapas (RIUNACH).

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; a los 17 días del mes de ABRIL del año 2024.


WILLIAM VELAZQUEZ RAMIREZ

Nombre y firma del Tesista o Tesistas

Agradecimientos.

A mi director de tesis el M.I. Jorge A. Aguilar Carboney por su valioso asesoramiento en el tema de investigación. Por resolver dudas puntuales y aportar su conocimiento para poder llevar a cabo el trabajo realizado.

A mi monitor del curso PIGA la Dra. Claudia Olivia Ichin Gómez por su valioso apoyo en la redacción del trabajo, retroalimentando cada apartado de manera oportuna y por su comprensión al facilitar toda información requerida.

Y también al administrador del programa PIGA el Dr. Carlos Ignacio López Bravo con conducirme de manera correcta a poder concluir en el tiempo predeterminado todos los apartados del trabajo.

“Poder divino más esfuerzo humano es igual a éxito”

-Ellen G. White

Dedicatorias

A mi esposa Jenny Yazmín Vázquez Castellanos por el valioso apoyo que me brindo en todo momento, por su comprensión y ánimos dados en el periodo de la realización de este trabajo de investigación.

A mis padres, por su apoyo moral brindado en toda mi vida y en cada etapa de desarrollo personal. Por la enseñanza de poner a Dios en primer lugar y que todo se puede realizar con esfuerzo y dedicación.

ÍNDICE

Resumen.....	7
Introducción.....	8
1.1 Justificación.....	10
1.2 Planteamiento del Problema.....	10
1.3 Hipótesis.....	11
1.4 Objetivo General.....	11
1.5 Objetivos Específicos.....	12
2. Marco Teórico.....	13
2.1 Antecedentes.....	14
2.2 Marco Conceptual.....	16
2.2.1 Sismicidad en México y Chiapas.....	16
2.2.2 Diferentes Tipos de Suelos.....	22
2.3 Características de Estructuras de Concreto Reforzado.....	25
2.4 Teoría de Como Interviene la Interacción Suelo-Estructura.....	26
2.4.1 Sistema Equivalente en la Interacción Suelo-Estructura.....	28
2.4.2 Efectos en el Periodo y Amortiguamiento.....	32
3. Metodología.....	34
3.1 Métodos.....	35
3.2 Procedimientos.....	36
3.3 Limitaciones.....	37
3.4 Participantes.....	38
3.5 Muestra.....	38
3.6 Instrumentos.....	39
4. Resultados y Discusiones.....	40
4.1 Descripción del Caso de Estudio.....	40
4.1.1 Macro Localización Sísmica del Sitio de Estudio.....	41
4.1.2 Micro Localización Sísmica del Sitio de Estudio.....	42
4.1.3 Ubicación Geotécnica de la Estructura.....	43
4.1.4 Criterios de Diseño.....	45
4.2 Análisis de Cargas.....	48
4.2.1 Cargas Muertas.....	49
4.2.2 Cargas Vivas.....	50

4.2.3 Combinaciones de Carga.	51
4.2.4 Efectos Bidireccionales.	52
4.3 Clasificación de la Estructura.	53
4.4 Análisis Sísmico.	54
4.4.1 Condiciones de Regularidad.	54
4.4.2 Factor de Amortiguamiento.	58
4.4.3 Factor Reductor por Sobre Resistencia.	58
4.4.4 Factor de Comportamiento Sísmico.	58
4.4.5 Factor por Redundancia.	58
4.5 Análisis Sísmico con Interacción Suelo Estructura.	59
4.6 Comparativa de Resultados.	62
4.7 Discusiones.	62
Conclusión.	63
Referencias bibliográficas.	65

Índice de Tablas.

Tabla 1. Secciones de elementos del edificio.	46
Tabla 2. Cargas muertas adicionales.	50
Tabla 3 Cargas vivas adicionales, Fuente (NTC-CADE, 2023).	51
Tabla 4. Factores de cargas. Fuente. Elaboración propia.	52
Tabla 5. Combinaciones de carga.	52
Tabla 6. Rigidez de entrepiso.	56
Tabla 7. Comparativa de periodos de vibración.	62

Índice de Figuras.

Figura 1. Teoría de Winkler. Fuente: Manuel J. Freire Tellado, 2000.	14
Figura 2. Mapa tectónico de la República Mexicana. Modificada del atlas nacional de riesgos de la República Mexicana (Cenapred, 2001).	19
Figura 3. Grafica de estados con mayor actividad sísmica 2023. Fuente: centro de monitoreo Vulcanológico-Sismológico. https://monitoreo.unicach.mx/index.php?p=page&v=MTI=	20
Figura 4. Sismos históricos en Chiapas (1900-2020). Fuente: centro de monitoreo Vulcanológico-Sismológico. https://monitoreo.unicach.mx/index.php?p=page&v=MTI=	21
Figura 5. Carta geológica estructural del valle de Tuxtla Gutiérrez.	24
Fuente: Zúñiga y Ordoñez, 2013.	24
Figura 6. Sistema equivalente de la interacción del suelo con la estructura.	29
Fuente: MOCDS-CFE, 2015.....	29
Figura 7. Grados de libertad del sistema equivalente.....	30
Fuente: MOCDS-CFE, 2015.....	30
Figura 8. Sistema suelo-estructura completo.	31
Fuente: MOCDS-CFE, 2015.....	31
Figura 9. Localización del sitio en estudio.	40
Fuente: Elaboración propia tomada de Google Earth.	40
Figura 10. Ubicación sísmica del sitio de estudio. PRODISIS.	41
De esto podemos observar que la ciudad de Tuxtla Gutiérrez está en una zona de alta sismicidad y por tal motivo la zona sufre de muchos movimientos y en ocasiones esos movimientos son de una frecuencia alta, es ahí donde las estructuras sufren fallas.....	41
Figura 11. Peligro sísmico del estado de Chiapas.	43
Fuente: Elaboración propia tomada de Google Earth.	43
Figura 12. Localización geotécnica de la estructura.....	44
Fuente: Elaboración propia tomada de Google Earth.	44
Figura 13. Características generales del edificio.....	45
Fuente: elaboración propia.....	45
Figura 14. Isométrico del edificio. Fuente: elaboración propia.	56
Figura 15. Obtención de los parámetros de diseño sísmico. PRODISIS.....	57
Figura 16. Espectro de diseño modificado.	59
Figura 17. Modelado de la estructura en el programa SAP2000.	60
Fuente: elaboración propia.....	60
Figura 19. Periodo de vibración de la estructura con IDSE en el eje Y.	61

Resumen.

Este trabajo de investigación se refiere a la importancia y el beneficio que tiene un análisis sísmico de un edificio de cuatro niveles a base de marcos rígidos de concreto reforzado considerando la interacción suelo-estructura, así mismo se realiza un análisis sin considerar la interacción del suelo con la estructura y se comparan los periodos efectivos de vibración obtenidos del edificio en estudio, para observar si el periodo es mayor debido a la flexibilidad del conjunto del sistema de la estructura con el suelo. Para comprender mejor el fenómeno del suelo y la estructura, así como su funcionalidad y los resultados se realiza el estudio en base a una investigación cualitativa. Este análisis estructural se realiza en apego al Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Concreto y Sismo 2023 y el análisis sísmico con el Manual de Diseño de Obras Civiles por Sismo de la Comisión Federal de Electricidad 2015. El sitio de estudio está ubicado en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. En la ciudad existen a grandes rasgos tres tipos de suelos: suelo formados por rocas calizas, suelo formados por lutitas y suelos blandos. Para el caso de estudio se realiza en el tipo de suelo más desfavorable que es un suelo blando constituido por terrenos aluviales a lo largo del cauce del río Sabinal formado de estratos de arcilla de color negro y de media a alta plasticidad ubicado en el sur-orientado de la ciudad. Para realizar el análisis sísmico se utiliza el programa PRODISIS para poder conseguir de manera aceptable el espectro de diseño modificado con respecto al lugar de aplicación. Así mismo, el análisis dinámico con la interacción del suelo con la estructura se realiza con el programa de computo SAP2000, que nos da resultados claros y aceptables acerca del periodo natural de vibración de la estructura. Para desarrollar el análisis se tuvieron las siguientes consideraciones, una estructura regular, una estructura de baja altura con funcionalidad de viviendas familiares. Se realizó ambos análisis con las mismas características del terreno y del edificio y se comparó los resultados obtenidos del periodo natural de vibración de la estructura en análisis y se comprueba que para el suelo blando de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez existe un aumento pequeño de periodo natural de vibración considerando la interacción del suelo con la estructura. Entonces es recomendable para los estructuristas realizar el análisis con la interacción suelo-estructura para realizar diseños estructurales aceptables.

Introducción.

En el diseño sísmico para edificios es común suponer que la subestructura se desplanta sobre un suelo infinitamente rígido, sin embargo, en la práctica no se presenta ni se comporta de esa manera, debido a que el suelo se deforma al ser sometido a cargas dinámicas y cuando esto sucede, la estructura también entra en movimiento en conjunto con la cimentación y el suelo. Esta relación que existe entre el suelo y la estructura en ingeniería sísmica se conoce como: interacción suelo-estructura.

Este sistema de interacción entre el suelo y la estructura se basa en un análisis modal, donde se puede apreciar de mejor manera el comportamiento de la estructura al ser sometida a movimientos sísmicos atípicos. Este tipo de análisis involucra espectros de diseño, las características geotécnicas de la región y las condiciones locales de sitio.

El tema de interacción suelo estructura tiene sus inicios desde el año 1867 realizado por Winkler, donde hace su primera propuesta modelando la cimentación como una viga flexible, creándolo de un inicio para analizar vías del ferrocarril. Los investigadores fueron tomando esta base y llevando el modelo a su propio campo de estudio, desde entonces el tema ha sido estudiado por numerosos autores y diversos métodos, por tal motivo se ha creado una variedad de teorías de como interactúa el suelo juntamente con la estructura cuando son sometidas a fuerzas sísmicas.

En México toma fuerza este tema a partir de los daños estructurales que sufrieron las edificaciones, ya que muchos de estos llegaron al colapso a raíz del sismo de septiembre de 1985, por tal motivo en el año 1987 el comité especializado en estructuras incorpora este tema en el reglamento de construcción para la Ciudad de México en un apéndice, la cual solamente aconsejaban utilizar la interacción suelo-estructura.

Sin embargo, fue hasta la publicación de las normas de 2017 donde el comité de normas de la ciudad de México decidió incluir el tema de manera obligatoria y ya no es una sugerencia, sino una obligación considerar la interacción suelo-estructura en ciertos tipos de edificaciones. Este cambio indica que usar estas consideraciones en el diseño tiene ventajas en las estructuras de concreto reforzado.

La estructura del trabajo consta de cinco capítulos principales: en el capítulo 1 se consideran puntos especiales, donde se narra de manera general en que consiste el trabajo en forma de una introducción, se define el problema, la hipótesis y los objetivos, así mismo, se describe la justificación del trabajo. En el capítulo 2 se abordan temas fundamentales que intervienen directamente en la investigación, se crea el marco teórico donde se abordan temas como, tipos e intensidades de sismos que ocurren en el país y en el estado de Chiapas, también se especifica los diferentes tipos de suelos que existen en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, así mismo, se aporta las consideraciones generales de la edificación en estructuras de concreto reforzado y por último se describe las teorías y fundamentos de cómo actúa la interacción suelo-estructura, quienes intervienen y como es su funcionalidad.

En el capítulo 3 se describe el proceso metodológico que se utiliza en la investigación, el procedimiento a desarrollarse, las limitaciones que se tienen y las técnicas, instrumentos y materiales para poder alcanzar los objetivos establecidos y lograr llegar a las respuestas de la hipótesis. En el capítulo 4 se plasma los resultados obtenidos del análisis del modelo presentado, así como su explicación y análisis, así mismo, se describe una discusión sobre el análisis de los resultados obtenidos y los presentados por los autores del marco teórico. Finalmente, en el capítulo 5 se presenta una conclusión del tema, de manera clara se resalta los resultados obtenidos y su aportación de la investigación en el ámbito estudiado.

1.1 Justificación.

Este trabajo de investigación se realiza para que el ingeniero estructural que diseña edificios de concreto reforzado tenga la sensibilidad de incorporar el método de interacción suelo estructura que se presenta en las normas técnicas complementarias para diseño por sismo 2023 (NTCDS-2023), ya que su utilización da mayor seguridad a las edificaciones ante la presencia de sismos fuertes, y el modelado de interacción suelo-estructura se acerca más a la realidad cuando éste recibe fuerzas dinámicas provocadas por sismos.

La idea es presentar un modelo de un edificio de concreto reforzado con cuatro niveles a base de marcos rígidos con el software de computo SAP2000 que trabaja en base a elementos finitos, con una interfaz gráfica en 3D que realiza de manera integrada la modelación y análisis. Para el modelado de la estructura se requieren los datos específicos del tipo de estructuración, materiales a emplear, factores y condiciones específicas de funcionamiento, también se especifica la cimentación a emplear (superficiales o profundas) y las particularidades del suelo de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, ya que estos intervienen directamente en el análisis.

1.2 Planteamiento del Problema.

La interacción suelo-estructura se puede definir como el conjunto de efectos que sufre el suelo por el movimiento sísmico en la base del edificio; dicho problema se presenta por la unión de los movimientos que sufre el suelo y la subestructura, estos efectos involucran los siguientes aspectos: la interacción cinemática y la interacción inercial, cada uno de estos fenómenos se presentan con consideraciones diferentes en la estructura en conjunto con el suelo.

La interacción cinemática se presenta cuando la cimentación de la estructura se desplanta a una profundidad significativa y el fenómeno sucede cuando la base de la estructura y las paredes exteriores entran en contacto con el suelo e interactúan cuando son sometidos a movimientos. La interacción inercial se presenta cuando existe una resistencia en la base de la cimentación al movimiento dinámico de la estructura y esa resistencia ocurre durante todo el tiempo que el edificio es sometido a fuerzas externas. A causa de estos dos tipos de movimientos que ocurre en el suelo en conjunto con la estructura surge la problemática de analizar las estructuras en conjunto con el suelo, y no considerar al suelo infinitamente rígido como se hace normalmente, si no como un suelo flexible que sufre deformaciones en conjunto con la estructura.

1.3 Hipótesis.

La hipótesis en que su fundamenta la investigación es comprobar si el periodo efectivo de un edificio de concreto reforzado con un análisis dinámico incluyendo interacción suelo-estructura es mayor en comparación con un análisis dinámico que considera empotramientos en la base de la estructura. Ambos análisis consideran las características particulares del sitio en estudio y la estructura propuesta.

1.4 Objetivo General.

Analizar de qué manera influye considerar el efecto de la interacción del suelo con la cimentación y observar la respuesta que tiene el edificio de concreto reforzado en estudio ante fuerzas sísmicas. El análisis se realiza con el método de elementos finitos mediante el software SAP2000.

1.5 Objetivos Específicos.

1. Realizar el diseño sísmico dinámico de una vivienda multifamiliar de cuatro niveles, considerando en el análisis dinámico la interacción suelo-estructura.
2. Comparar el análisis de interacción suelo-estructura con un análisis convencional considerando el suelo infinitamente rígido.

Con este estudio se pretende dar una visión más amplia en lo referente al análisis de la respuesta de una estructura en conjunto con el suelo cuando estas son sometidas a una excitación sísmica. Estas excitaciones son originadas por los sismos que ocurren y en la región de estudio, los sismos son de manera recurrente y aun no se puede predecir su intensidad y mucho menos la fecha de sucesos.

2. Marco Teórico.

En este apartado, capitulado marco teórico se presentan las ideas (teorías e hipótesis) con las cuales el proyecto de investigación adquiere sentido, y consiste en asumir una teoría que sirva de marco de referencia a todo el proceso de investigación, enlazando el problema con la metodología propuesta y empleada para buscarle una solución (Daros y William, 2002). Los conceptos implicados son aclarados y precisados.

Las construcciones con concreto reforzado son utilizados muy a menudo en nuestro país y en la capital del estado de Chiapas, ya que es un material de fácil acceso y su costo es aceptable. En las construcciones se toma en cuenta para el diseño y análisis la estructura del suelo, la estructura de la cimentación, la superestructura y las fuerzas externas que actúan en ella (viento, sismo). Estos parámetros requieren un estudio amplio y detallado, es por ello, que en el marco teórico se abordan estos temas, ya que cada uno de ellos interviene de manera directa en el análisis de la estructura.

En las ciudades metropolitanas, en este caso Tuxtla Gutiérrez, los espacios de manera horizontal son menos a medida que aumenta el crecimiento poblacional, los desarrolladores de viviendas están apostándole a los edificios verticales, por el mayor aprovechamiento a los terrenos. Es común ver edificios habitacionales de departamentos y es muy común que estas construcciones tengan más producción por la limitante de terrenos. Estos tipos de construcciones deben de tener la capacidad de resistir fuerzas sísmicas de gran magnitud debido a la ubicación geográfica de nuestro estado de Chiapas, por ello, se considera en los análisis de diseño sísmico la interacción del suelo con la estructura.

2.1 Antecedentes.

La primera propuesta realizada para este tema fue hecha por Winkler en 1867. Realizó en sus inicios el modelo de la cimentación y lo consideró como viga flexible, este método supone al terreno como un punto infinito ubicado bajo la viga supuesta flexible y deformable. Fue así que surge la constante de deformación denominada módulo de balasto (K_s), y este valor se obtuvo mediante la presión de contacto (q) que tiene la viga dividida por el desplazamiento que ocurre en el suelo (d).

Este método en un inicio se realizó para analizar el funcionamiento de las vías del ferrocarril, la cual consideraba el balasto como la capa de grava que se tiende en las vías de los ferrocarriles y este material puesto sobre el terreno realizaba la función de unos resortes a la hora de estar sujeto a fuerzas. El creador de este modelo de interacción estructura-terreno fue Winkler y su esquema de interpretación se observa en la figura 1 y tiene múltiples aplicaciones (Alvarado, 2011).

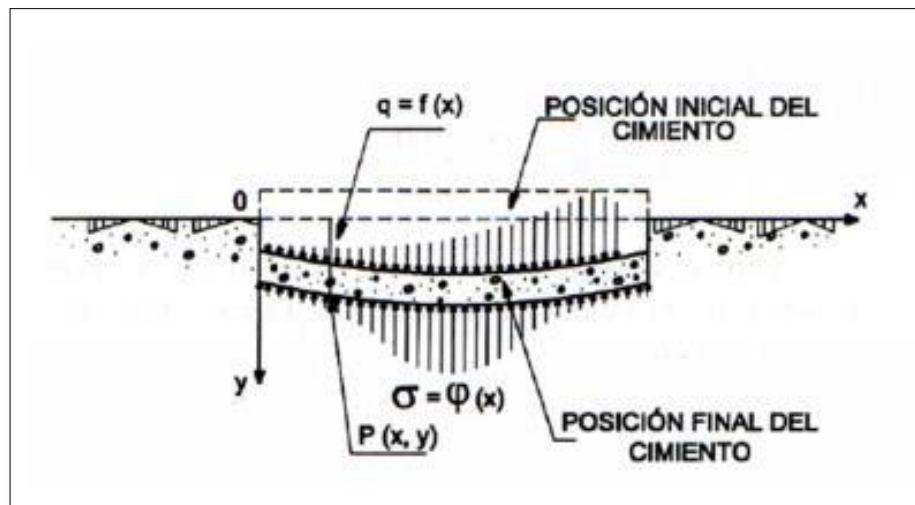


Figura 1. Teoría de Winkler. Fuente: Manuel J. Freire Tellado, 2000.

La aplicación de la teoría del módulo de balasto ha ganado aceptación en los últimos tiempos, ya que permite una fácil asimilación del modelo de la interacción estructura-terreno utilizando los métodos matriciales de cálculo (Alvarado, 2011).

Hasta los inicios de 1950, este tipo de problemas elásticos se solucionaban por métodos analíticos, en cambio las situaciones de muchas variables eran un poco más laborioso y complejos. En la actualidad el uso de equipos de cómputo y programas de cálculo han permitido resolver de manera eficiente las ecuaciones complejas, poniendo en práctica métodos numéricos como las diferencias finitas, elementos finitos y elementos de contorno (Gómez, 2002).

El comportamiento sísmico de una estructura va más allá que solo considerar los efectos entre suelo y cimentación ya que interviene un factor sismo, que no se puede predecir, ni donde, ni cuándo, ni la intensidad en que va a suceder, basándose en este modelo, se analiza como la estructura toma capacidad de rotación y como el suelo responde a cargas laterales.

En México este tema de investigación de tomar en cuenta la interacción del suelo con la estructura también ha tenido mucha relevancia desde hace muchos años, ya que en el año 1987 fue incorporado al reglamento de construcción en un Apéndice, el comité de dicho reglamento lo ponía como una recomendación y no como una obligación para considerar este tema en el diseño de estructuras y estas recomendaciones continuaron así hasta el año el año 2004, cuando las normas colocaban en un apéndice su utilización. Sin embargo, debido a la importancia de tomar en cuenta la interacción suelo-estructura en el año 2017 el comité de normas por sismo de la ciudad de México decidió incluir el tema de manera obligatoria a la interacción suelo-estructura en las normas técnicas complementarias de diseño por sismo (NTCDS-17). Eso indica que tomar en cuenta estos puntos en el diseño por sismo dan resultados positivos.

2.2 Marco Conceptual.

En este subtema de marco conceptual, se brinda información detallada del sismo en México y en Chiapas, la causa que los origina, que lugares son más recurrentes y cuanto influye esta fuerza en las edificaciones. Así mismo, se proporciona información de los diferentes tipos de suelos que existen en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.

2.2.1 Sismicidad en México y Chiapas.

Un sismo es un fenómeno natural producida por movimientos bruscos que suceden en la tierra, esto se da por una ruptura que pasa en la cubierta rígida del planeta y la principal causa es la liberación de energía acumulada por tiempos prolongados. Estos movimientos no se pueden predecir, porque son cantidades grandes de energía liberada cuando ocurren desplazamientos en las placas tectónicas moviéndose una contra otra y así se puede generar los terremotos.

Este tipo de fenómenos en México son muy a menudo debido a su ubicación geográfica, y se debe a que existen dos tipos de movimientos causados por las placas tectónicas, estos movimientos son llamados: movimiento de subducción y desplazamiento lateral y es lo que causa temblores importantes por la magnitud y frecuencia que se dan. Por la ubicación de México se encuentra en una zona sísmica muy activa, se encuentra entre las más activas del mundo, porque en el país están cuatro placas tectónicas (placa de Norteamérica, placa de Rivera, placa de Cocos y placa del Pacífico) que interactúan entre sí generando sismos importantes por la movilidad de estas placas. Por la gran cantidad de movimientos que existe en esta zona ha recibido el nombre de cinturón del fuego del pacífico, considerada como zona de alta sismicidad.

Para entender mejor el fenómeno del sismo, estos se interpretan según su intensidad y su magnitud. La intensidad del sismo es el efecto producido por el temblor, y esto es perceptible en el suelo que transfiere los movimientos a su corteza, la intensidad se puede medir, y su valor declara en números romanos, la cual utiliza una escala denominada Mercalli. La magnitud del sismo es dimensionar el tamaño del sismo, es decir, medir que cantidad de energía liberada en el temblor ocasionado por el movimiento de las placas y para sus expresar su valor se utiliza mayormente la escala de Richter. Comprender estas diferencias son de gran ayuda para comprender que datos y unidades de medida se necesita analizar de un sismo en un diseño de edificaciones.

En el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad 2015 (MDOC-CFE, 2015) se describe 4 tipos de sismos que ocurren en México y en el estado de Chiapas, que son los siguientes.

✓ **Sismos de subducción.** Los grandes temblores en México ($M > 7.0$) a lo largo de la costa del pacifico, son causados por la subducción de las placas oceánicas de cocos y de rivera bajo la placa de Norteamérica y por ello son conocidos como sismo de subducción (MDOC-CFE, 2015).

✓ **Sismos de fallamiento normal y profundidad intermedia.** Los grandes temblores también ocurren en el continente con profundidades de entre 30 y 100 km, en este caso los temblores presentan un mecanismo de fallamiento normal que refleja el rompimiento de la litosfera oceánica subducida, si bien este tipo de eventos es poco frecuente, se sabe que puede causar grandes daños, algunos ejemplos de este tipo de sismos son el de Oaxaca del 15 de enero de 1931 ($M=7.8$), el de Orizaba del 23 de agosto de 1973 ($M = 7.3$), el de Huajuapán de León del 24 de octubre de 1980 ($M = 7$) y el de Tehuacán

del 15 de junio de 1999 ($M = 7.0$), en México, el Eje Neovolcánico no es paralelo a la trinchera, esto es algo anormal en comparación con otras zonas de subducción en el mundo y es muy probable que se deba a la morfología de la placa de cocos (MDOC-CFE, 2015).

✓ **Sismos superficiales de la corteza continental.** Aun menos frecuentes son los temblores que ocurren dentro de la placa continental ($M \leq 7.0$) dependiendo de su ubicación, estos eventos pueden generar daños considerables en diversos asentamientos humanos, dos ejemplos son: el temblor de Jalapa del 3 de enero de 1920 ($M = 6.4$) y el de Acambay del 19 de noviembre de 1912 ($M = 7.0$), existe también lo que podría llamarse sismicidad de fondo la cual se trata de temblores con $M \leq 5.5$, cuyo origen no puede asociarse a ninguna estructura geológica (MDOC-CFE, 2015).

✓ **Sismos del sistema de fallas Polochic-Motagua.** La frontera entre las placas del caribe y la de Norteamérica es difusa, con un ancho de aproximadamente 120 km, el movimiento entre las dos placas se disipa, principalmente, a lo largo de las fallas de Chixoy-Polochi-Motagua, el mayor sismo registrado a lo largo de esta frontera con fallas de rumbo fue ocurrido el 4 de febrero de 1976 ($M=7.5$), que produjo cerca de 250 km de movimiento lateral izquierdo a lo largo de la falla Motagua, sin embargo, se tiene constancia que un gran temblor que ocurrió a lo largo de la falla Chixoy-Polochic en 1538 (MDOC-CFE, 2015).

Estos cuatro tipos de sismos son lo que ocurren recurrentemente en el país y son los que en muchas ocasiones han causado daños irreparables a las estructuras realizadas por el hombre. Por consiguiente, el estado de Chiapas debido a su ubicación geográfica es sacudido por estos tipos de sismos.

La ciudad de Tuxtla Gutiérrez se localiza en una región muy cercana a la zona sísmo génica de subducción que presenta la placa de cocos bajo la placa de Norteamérica en el sureste mexicano (figura 2). Esta interacción tectónica es la que genera la mayor cantidad de sismos en la zona y junto con el sistema de fallas Polochic-Motagua-Jocotán-Chamelecón, conocido como el límite tectónico entre las placas de Norteamérica y del Caribe, representan el origen de casi toda la energía sísmica liberada en la región, causante del peligro sísmico al que la ciudad está sujeta y en donde se han originado sismos de 7.8 grados de magnitud y sentido de intensidades de X grados en la escala de Mercalli (Figuroa, 1974).

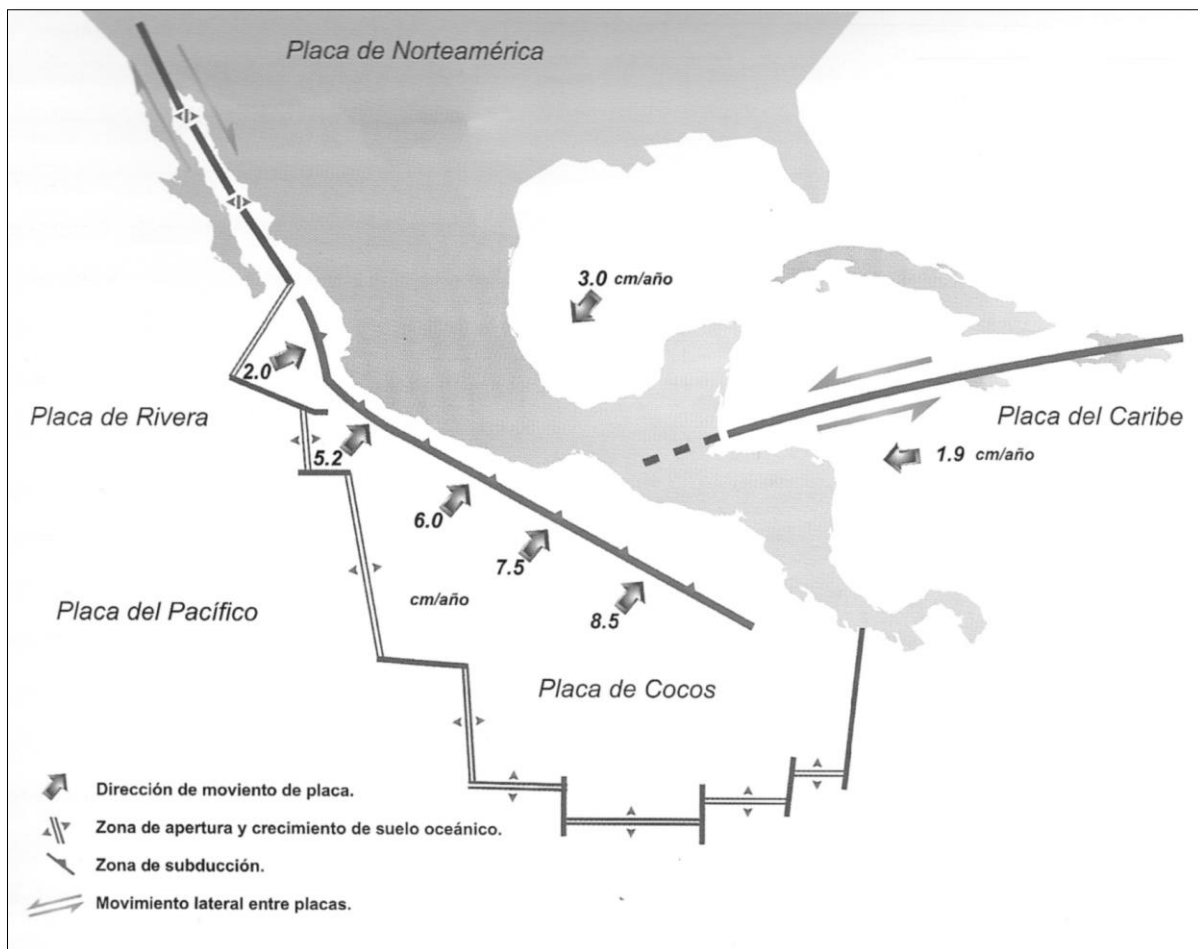


Figura 2. Mapa tectónico de la República Mexicana. Modificada del atlas nacional de riesgos de la República Mexicana (Cenapred, 2001).

En México, de enero a diciembre de 2023, se han registrado 24,186 eventos sísmicos, de los cuales, 3,480 ocurrieron en el estado de Chiapas; esto representa el 14.39% de la actividad sísmica del país (Figura 3). Hasta ahora, no se tienen registros de daños; sin embargo, existe preocupación por parte de la población chiapaneca de que estos eventos tengan lugar en el corto plazo.

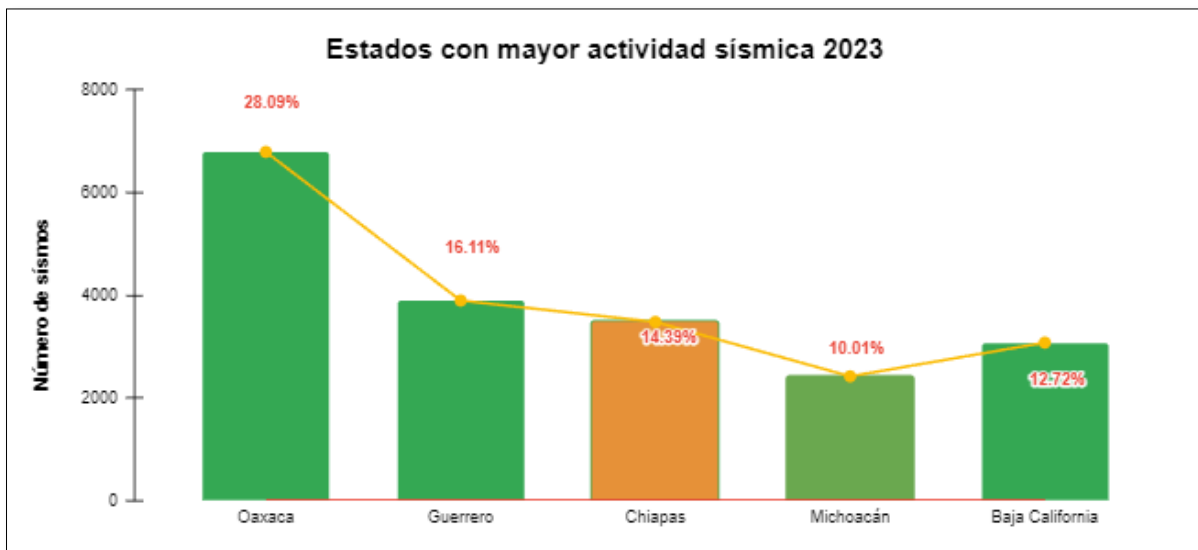


Figura 3. Grafica de estados con mayor actividad sísmica 2023. Fuente: centro de monitoreo Vulcanológico-Sismológico. <https://monitoreo.unicach.mx/index.php?p=page&v=MTI=>

El estado de Chiapas también se encuentra en una zona sísmica alta debido a su ubicación geográfica, ha sucedido sismos importantes de acuerdo a los registros que se tienen, se tiene registro del sismo con magnitud de 7.7 grados en la escala de Richter ocurrido en septiembre del año 1902, esto sucede alrededor de las 14:18 horas con un epicentro a 5 km al suroeste de Teopisca, este es uno de los sismos de gran magnitud que se tiene registro desde que se empezaba con la medidas de estos fenómenos naturales. Y también se puede mencionar un reciente terremoto ocurrido en el estado de Chiapas el 07 de septiembre de 2017 a las 23:49 horas, este sismo tuvo una magnitud de 8.2.

Desde el año 1900 hasta el 30 de septiembre de 2020, se han registrado 20 eventos sísmicos de magnitudes mayores a 7° en el estado de Chiapas y alrededores registrado por el centro de monitoreo vulcanológico-sismológico (Figura 4), lo que muestra lo importante que es tener en cuenta las consideraciones sísmicas en esta ubicación geográfica.

Esta zona es de un potencial sísmico alto, ya que los registros sismológicos a través de la historia tienen registro de al menos 6 eventos con magnitudes mayores a 7.5° en la escala de Richter, la cual estos sucesos ocasionan daños a las estructuras, ya que sufren afectaciones importantes y muchas veces llegan al colapso y esto ocasiona pérdidas grandes económicamente, incluso pérdidas de vidas humanas.

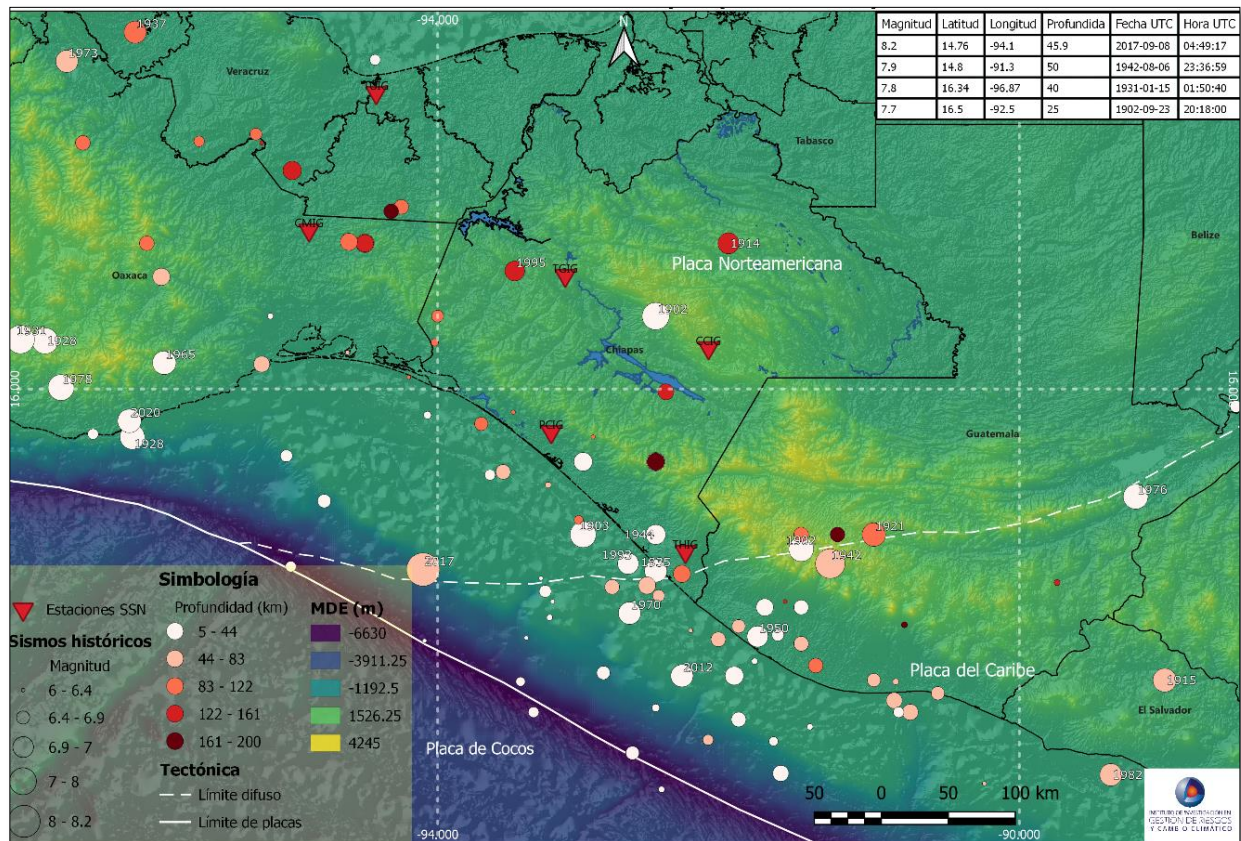


Figura 4. Sismos históricos en Chiapas (1900-2020). Fuente: centro de monitoreo Vulcanológico-Sismológico. <https://monitoreo.unicach.mx/index.php?p=page&v=MTI=>

2.2.2 Diferentes Tipos de Suelos.

Para el estudio de los suelos el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad 2015 (MDOC-CFE-2015) menciona que para los diferentes tipos de suelos que existe se debe tomar en cuenta lo siguiente:

Los efectos de las condiciones locales del subsuelo que pueden afectar considerablemente el movimiento sísmico y con ello la respuesta estructural, los también llamados efecto de sitio producen significativas variaciones espaciales del movimiento del terreno, incluyendo amplificaciones y/o atenuaciones de su intensidad, así como las modificaciones de su duración y contenido de frecuencias, las cuales tienen una influencia determinante en la respuesta estructural (MDOC-CFE, 2015).

Las mayores amplificaciones dinámicas que sufre el movimiento del terreno suelen presentarse donde los contrastes de rigidez de los suelos son muy pronunciados, esto ocurre generalmente cerca de la superficie libre, especialmente en áreas de depósitos sedimentarios o valles aluviales, las interfaces horizontales entre estratos y las irregularidades laterales producen un fenómeno de difracción múltiple de ondas sísmicas, que generan interferencias constructivas y destructivas, y que a su vez originan amplificaciones y atenuaciones (MDOC-CFE, 2015).

Para evaluar los efectos de amplificación del movimiento sísmico en depósitos de suelo sería deseable conocer la función de la transferencia de sitio, en ausencia de registros sísmicos, la función de transferencia suele determinarse a partir de datos detallados de la exploración del terreno y con el modelo unidimensional de propagación de ondas en medios estratificados, solo en casos especiales se recurre a modelos de mayor complejidad (MDOC-CFE, 2015).

Para el caso en específico de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, capital del estado de Chiapas, se localiza en la región central de la entidad, a una altura de 550 msnm, tiene una extensión territorial de 412.4 km², que representa 0.51% de la extensión estatal, el tipo de clima es cálido subhúmedo, la temperatura media anual es de 24.5 °C, la temporada de lluvias se presenta entre los meses de mayo y octubre y la de estiaje de noviembre-abril, la precipitación anual es alrededor de 900 mm (Ordoñez, 2015).

Hay diversos trabajos de investigación sobre los estudios de las propiedades dinámicas del suelo, con la finalidad de realizar zonificaciones sísmicas y análisis de riesgos en el trabajo de nueva microzonificación sísmica de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez Chiapas (Ordoñez et al., 2014) se menciona que la ciudad queda enmarcada por secuencias de sedimentos marinos de edad cretácico inferior Terciario medio deformadas por dos eventos orogénicos (figura 5), uno corresponde al cretácico superior Terciario inferior (orogenia Laramide) y otro corresponde al terciario medio (orogenia Chiapaneca).

En la zona norte de Tuxtla Gutiérrez se distinguen cubiertas calichosas irregulares que descansan sobre las calizas y forman suelos resistentes, hacia el sur se encuentran las secuencias aluviales del río “El Sabinal” que definen una delgada franja orientada casi W-E, compuesta por capas superficiales de arenas y limos que descansan a su vez, sobre capas de espesor irregular formadas por arcillas derivadas de la alteración-interperismo de las lutitas subyacentes (Ordoñez et al., 2014).

En la región sur de la ciudad, los flancos septentrionales de la meseta “Copoya” son dominantes, conformados en su porción superior por calizas y en su porción inferior por lutitas de edad paleocénica, cubierta por suelos residuales arcillosos derivados del interperismo de las mismas lutitas (Ordoñez et al., 2014).

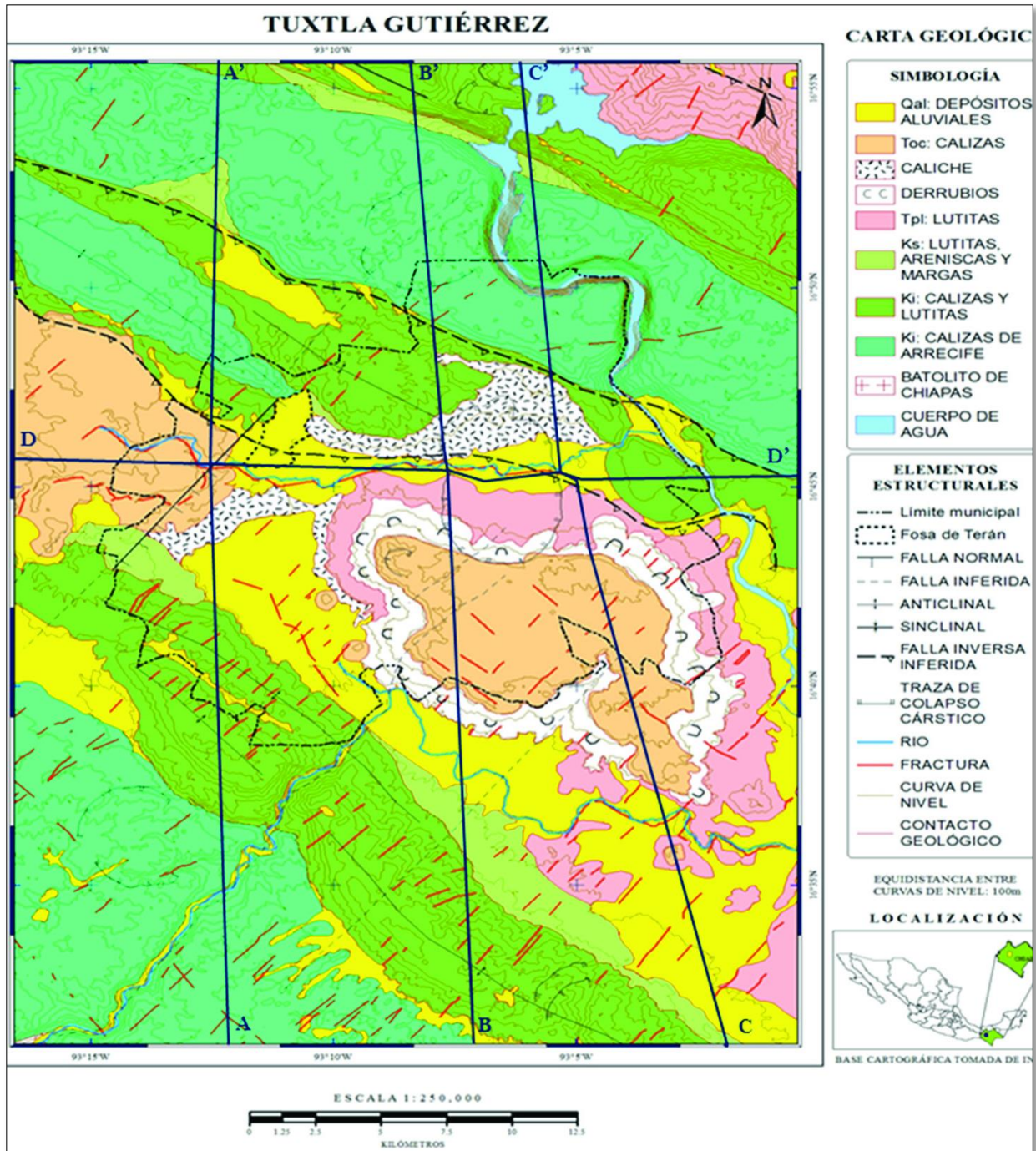


Figura 5. Carta geológica estructural del valle de Tuxtla Gutiérrez.

Fuente: Zúñiga y Ordoñez, 2013.

Así mismo, hacia la porción occidental de la ciudad, destaca una amplia zona de forma rectangular asociada a una fosa tectónica orientada SW-NE, que debió cortar la meseta de Copoya en su región occidental; a esta fosa se le denomina fosa Terán, la cual determina, que esta porción de ciudad se encuentra topográficamente en la zona más baja, siendo que debería de ser la continuación de dicha meseta; al ser una parte hundida tectónicamente, existen mayores espesores de rellenos alivio-fluviales (Ordoñez et al., 2014).

2.3 Características de Estructuras de Concreto Reforzado.

El concreto reforzado para construcciones es un material común a emplear en las edificaciones, este tipo de edificios tiene de base establecer la seguridad de las construcciones es el destino que ésta adquiere en su uso cotidiano y su principal objetivo es dar funcionalidad de manera adecuado cuando ocurren sismos de gran magnitud y así se pueda evitar las pérdidas de personas, también se puede evitar pérdidas económicas. Esto es lo que busca una estructura de concreto reforzado que cuando ocurra un sismo atípico la construcción siga en funcionamiento y cumpliendo con las funciones esenciales.

Y estas estructuras se clasifican en grupos, para el caso particular de edificaciones para vivienda de concreto reforzado el MDOC-CFE, 2015 lo clasifica en el grupo B, que son estructuras convencionales y estas se subdividen en dos: las estructuras B1 que son edificaciones habituales de mediana y grande altura, también menciona la estructura B2, la cual aborda a las estructuras convencionales de baja altura. Las clasificaciones de las estructuras son de mucha utilidad al realizar el análisis y diseño sísmico, debido a que cada estructura según su clasificación tiene consideraciones específicas.

Estas consideraciones para la clasificación según la estructuración se ha realizado por las particularidades estructurales que tiene cada construcción y estas tienen una gran ponderación en la respuesta sísmica estructural en las edificaciones. Por esta razón, se restringió a considerar las estructuras más importantes desde la perspectiva sísmica, así mismo, por la vulnerabilidad que tienen cuando son afectados por los temblores y los cambios que sufre la estructura por los efectos dinámicos que se originan por el movimiento del suelo.

Para distinguir entre los tipos de estructuras considerados, las construcciones se agruparon de acuerdo a los efectos sísmicos inherentes a ellas tales como son la generación de fuerzas de inercia lateral, fuerza de inercia verticales debidas a la acción del componente horizontal del movimiento sísmico, pares de inercia debido a la rotación de la masa de la estructura, fuerzas de inercia distribuidas continuamente, fuerzas hidrodinámicas, empujes de tierra y esfuerzos provenientes de las diferencia o desfaseamiento del movimiento del terreno en distintos puntos de apoyo de las estructuras, entre otros (MOCDS-CFE, 2015).

2.4 Teoría de Como Interviene la Interacción Suelo-Estructura.

El tema de la interacción del suelo con la estructura tiene su teoría fundamentada en que existe una agrupación de efectos del tipo cinemáticos e inerciales que se producen entre el suelo con la estructura cuando estas son sometidas a fuerzas dinámicas. Este conjunto de efectos modifica en cierta medida los parámetros dinámicos que en un inicio tiene la estructura, así mismo, modifica las características que tiene el terreno al estar en movimiento a la altura de la cimentación. Los parámetros dinámicos que cambian cuando ocurren estos fenómenos son: el periodo natural de vibración de la estructura, el amortiguamiento y la ductilidad.

Por lo tanto, este fenómeno de interacción suelo-estructura permite separarse en interacción inercial e interacción cinemática. La parte inercial se debe, fundamentalmente a la inercia y a la elasticidad del sistema suelo-estructura, lo que ocasiona alargamiento del periodo fundamental de vibración, aumento en el amortiguamiento y la reducción en la ductilidad de la estructura con respecto a la estructura supuesta con apoyo indeformable, por su parte, la interacción cinemática debida esencialmente a la rigidez y geometría de la cimentación, reduce el movimiento de esta última y le induce torsión y cabeceo por su efecto promediado, así como filtra los componentes de alta frecuencia de la excitación (Avilés y Pérez, 2003).

Estos dos tipos de interacción actúan cuando existe una fuerza sísmica en la base de la estructura. Si se considera esta fuerza actuante en la base igual al movimiento que actuaría en el suelo cuando no esté la estructura sobre ella (movimiento de campo libre) se tendría un efecto de interacción inercial y se presentaría flexibilidad del sistema, este efecto está regulada por el contraste de rigidez que se presenta en la estructura y el suelo.

Para tener un análisis completo con respecto a la interacción es necesario considerar el efecto que se produce cuando se considera la diferencia que existe entre la fuerza que se transmite en el movimiento de campo libre con la fuerza efectiva en la cimentación y este efecto puede resultar interesante para cimentaciones enterradas considerablemente. Es así como se genera un fenómeno llamado difracción de ondas y este logra modificar los movimientos en el suelo con la cercanía de la cimentación, esto surge a raíz que la rigidez del cimientto evita ajustarse con las deformaciones del suelo que se generan por los movimientos de campo libre. Al suceder este fenómeno actúa la interacción cinemática que se da cuando existe una diferencia entre el movimiento de entrada del cimientto y el de campo libre.

Con lo mencionado anteriormente se puede mencionar que, si el cimiento es suficientemente rígido, la interacción cinemática se manifiesta en una reducción de los movimientos de traslación de la cimentación (filtrado de los componentes de alta frecuencia de la excitación sísmica), así como la generación de cabeceo y torsión de la cimentación (Luko y Wong, 1987). Los especialistas en el tema de interacción suelo-estructura en base a investigaciones han observado que para la ciudad de México es conservador efectuar solo el análisis de interacción inercial, siempre que los efectos de sitio considerados en la determinación de movimiento de campo libre empleado como movimiento de entrada de la cimentación, aunque esta excitación no tiene componentes de rotación, generalmente es más desfavorable que la excitación efectiva de la base obtenida de un análisis de interacción cinemática (Avilés y Pérez, 2004).

2.4.1 Sistema Equivalente en la Interacción Suelo-Estructura.

El sistema equivalente considerado para el análisis de interacción entre el suelo y la estructura, en modo fundamental, toma en cuenta solo los efectos de interacción inercial (Avilés, 1991) presenta un procedimiento de superposición para el análisis completo en interacción suelo-estructura teniendo en cuenta, explícitamente, los efectos de la interacción cinemática.

Si el suelo es representado por un conjunto de resortes y amortiguadores equivalentes que expresan su rigidez y amortiguamiento, respectivamente, se obtiene el sistema equivalente (figura 6). Este sistema no tiene modos naturales clásicos de vibración debido al tipo de amortiguamiento que lo caracteriza, por esta razón, no es posible realizar un análisis modal, aunque se pueda aplicar el análisis paso a paso, teniendo en cuenta el comportamiento no lineal y el amortiguamiento de la estructura, así como el amortiguamiento material y geométrico del suelo (MDOC-CFE, 2015).

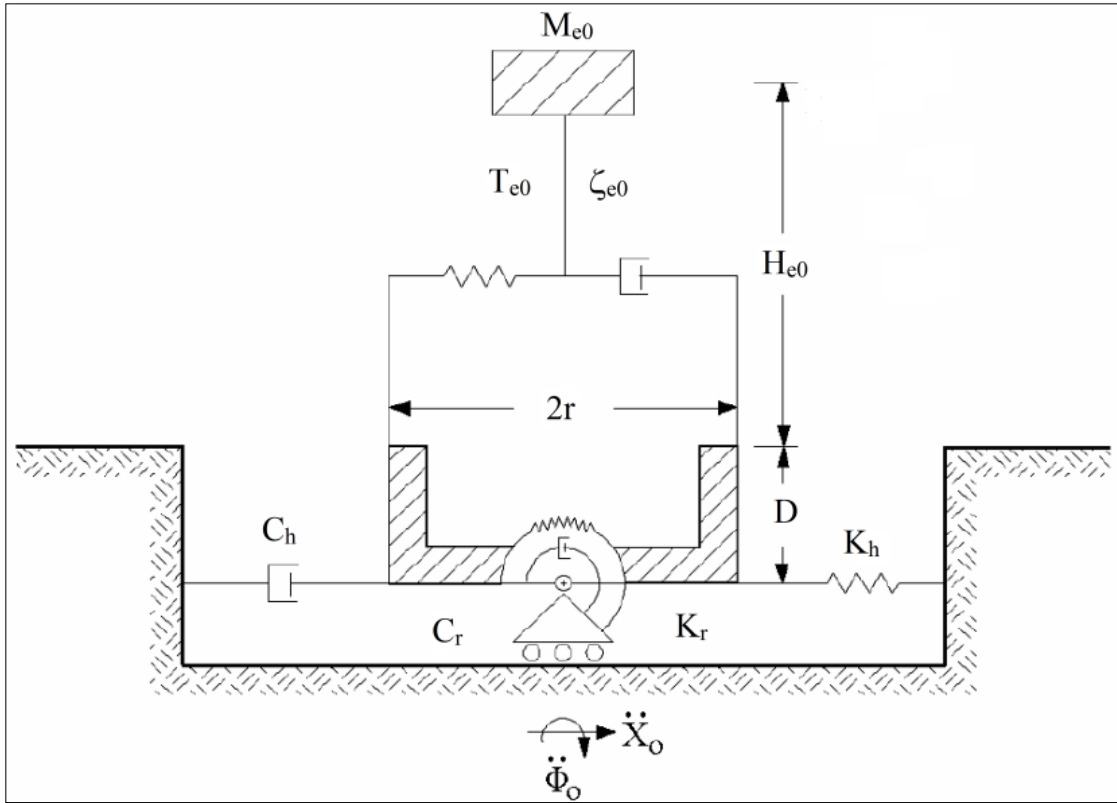


Figura 6. Sistema equivalente de la interacción del suelo con la estructura.

Fuente: MOCDS-CFE, 2015.

El sistema equivalente tiene 3 grados de libertad (figura 7) que son X_e la deformación de la estructura, X_c , el desplazamiento de la base de la cimentación relativo al movimiento, X_0 de campo libre, Φ_c , la rotación de la cimentación. Y el desplazamiento total de la estructura es $X_t = X_0 + X_c + (H_{e0} + D)\Phi + X_e$ para obtener las ecuaciones de movimiento del sistema equivalente se debe establecer el equilibrio dinámico de la masa de la estructura de traslación y de la masa de la cimentación en traslación y rotación (MDOC-CFE, 2015).

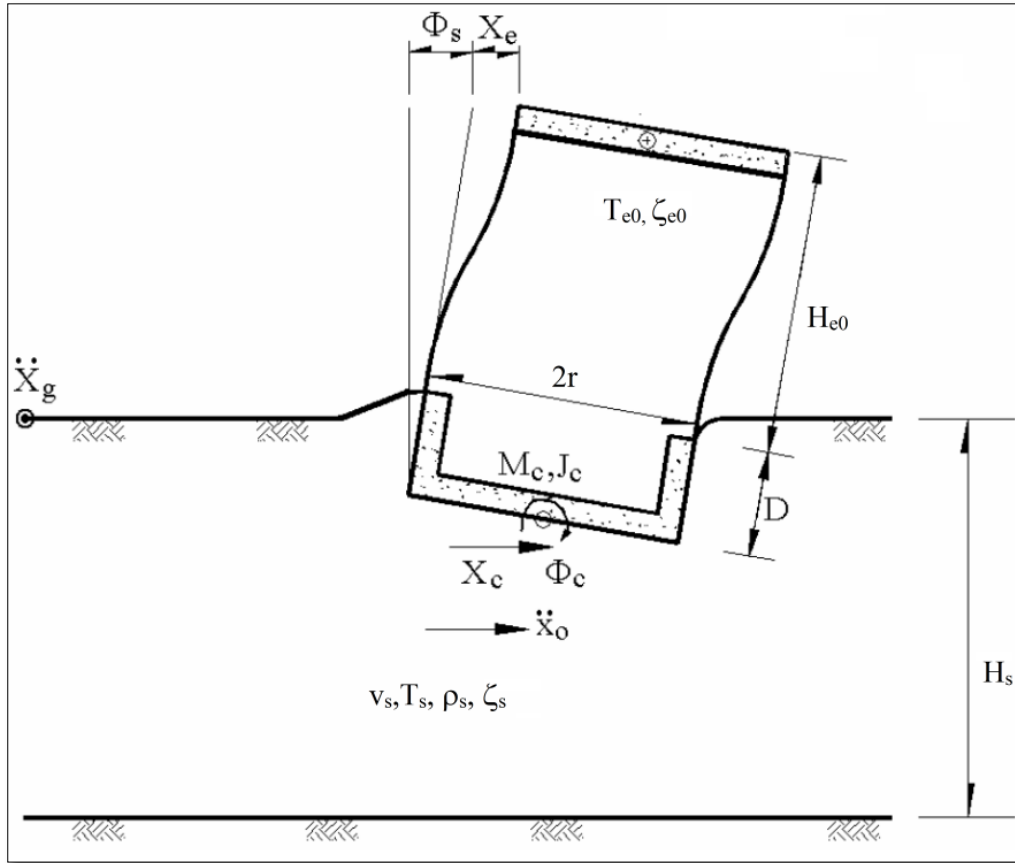


Figura 7. Grados de libertad del sistema equivalente.

Fuente: MOCDS-CFE, 2015.

Para transfórmalo en un sistema equivalente se puede reemplazar los resortes lineales $K_s(\omega)$ y $K_r(\omega)$, así mismo, los amortiguadores viscosos $C_x(\omega)$ y $C_r(\omega)$, que dependen de la frecuencia de movimiento ω , en la figura 8 se representa el sistema a movimiento de campo libre y este tiene los tres grados de libertad, que son, deformación en la estructura, el desplazamiento de la cimentación y la rotación en la base. Se puede apreciar un sistema suelo-estructura de un edificio completo.

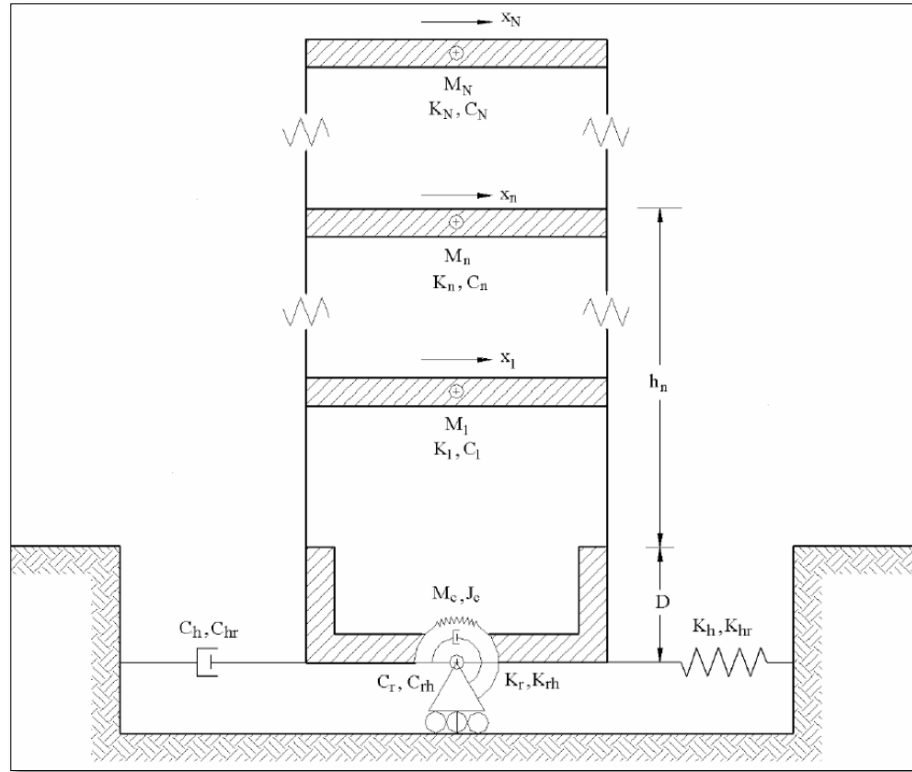


Figura 8. Sistema suelo-estructura completo.

Fuente: MOCDS-CFE, 2015.

Un sistema completo de interacción suelo-estructura no tiene modos naturales clásicos de vibración debido a que el amortiguamiento del suelo no es igual al amortiguamiento de la estructura y esto logra impedir el análisis por superposición convencional. Es por eso, que se recurre a usar los espectros de respuesta de campo libre y se usa en conjunto con las propiedades dinámicas más importantes de una estructura modificada por la interacción suelo-estructura, aunque se puede emplear un método paso a paso que considere el comportamiento no lineal de la estructura. En la literatura (Wolf, 1985 y 1988) existen métodos para considerar la flexibilidad de la cimentación y el comportamiento inelástico del suelo.

2.4.2 Efectos en el Periodo y Amortiguamiento.

En el análisis de interacción del suelo con la estructura el alargamiento del periodo es producto de la deformabilidad del medio de soporte y éste resulta de la capacidad del suelo para disipar energía no solo por comportamiento histérico (amortiguamiento material) y radiación de ondas (amortiguamiento geométrico), sino también por la difracción de las ondas incidentes por la cimentación, en vista de que el cabeceo de la cimentación puede incrementar la respuesta relativa del edificio y por consiguiente reducir el amortiguamiento, es factible que el amortiguamiento del conjunto suelo y estructura llegue a ser menor que el amortiguamiento de la estructura sola, a menos que la reducción del amortiguamiento estructural ocasionada por la excitación adicional de cabeceo sea compensada con la contribución del amortiguamiento del suelo, este efecto suele ocurrir en estructuras esbeltas, que son las más sensibles al cabeceo de la cimentación (Avilés y Pérez, 2004).

Los criterios de interacción de las normas consideran tanto el alargamiento del periodo debido a la deformabilidad del suelo como la modificación del amortiguamiento producto del comportamiento histérico y la radiación de ondas en el suelo, de esta forma se tiene en cuenta la interacción inercial solamente; la interacción cinemática es reconocida implícitamente restringiendo la posible reducción del amortiguamiento al valor nominal de 5% considerado en los espectros de diseño reglamentarios, las modificaciones del periodo y amortiguamiento pueden calcularse usando una analogía con un oscilador de reemplazo, cuya respuesta resonante sea igual a la de la estructura con base flexible, para la misma excitación armónica de la base, la ventaja práctica de este enfoque reside en que la máxima respuesta estructural puede estimarse por medio de espectros de respuesta estándar de campo libre, usando el periodo y amortiguamientos efectivos del sistema (Avilés y Pérez, 2004).

De acuerdo a esta información, el estudio de “análisis y diseño de un edificio de concreto reforzado considerando la interacción suelo-estructura” se desarrolla desde la perspectiva del cambio del periodo efectivo y el amortiguamiento que sufre la estructura en una excitación dinámica, en comparación con el análisis que considera al suelo infinitamente rígido. Para mayor comprensión se realiza el modelado de la estructura mediante el software SAP2000 con análisis dinámico modal con interacción suelo-estructura y se observa cómo influye el efecto de las características dinámicas del suelo en la estructura para diferentes tipos de suelos que existe en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.

3. Metodología.

Este trabajo de tesis “Importancia y beneficios de considerar la interacción suelo-estructura en el análisis y diseño de edificios de concreto reforzado.” Se analizará desde la investigación cualitativa, cabe mencionar que este tipo de investigación nos permite no solo comprender mejor la disciplina de estudio, si no también hacer cuestionamientos sobre los resultados obtenidos. Colas y Buendía (1994), señalan algunas características de la metodología cualitativa, mencionando que el principal objetivo científico será la comprensión de los fenómenos, que el investigador y objeto de investigación estén interrelacionados y que el objetivo de la investigación es desarrollar un cuerpo de conocimientos ideográficos que describan los casos individuales.

El tema de interacción suelo-estructura se aborda con el método de investigación cualitativa, para poder comprender de diferentes perspectivas lo que le ocurre a una estructura de concreto reforzado cuando ésta se le presentan eventos atípicos como son los sismos. Este caso se estudiará como un todo, lo que implica comprensión del fenómeno, respuesta del suelo y la estructura ante el fenómeno y cómo interactúan juntos mediante un modelado.

Por lo tanto, se buscará autores relacionados con el tema de investigación. Así mismo, con este método se podrá comparar resultados obtenidos mediante análisis de percepciones o interpretaciones, considerando el análisis dinámico de la interacción suelo-estructura en comparación con un análisis de diseño estructural convencional utilizando un programa de cómputo para diseño de estructuras.

3.1 Métodos.

Las estructuras son una de las ramas de Ingeniería Civil y se enfoca mayormente en los análisis y diseños de las estructuras, para el caso en específico se toman las estructuras de concreto reforzado, la cual, para ésta área existe una variedad de métodos y soluciones a seguir para poder llegar a un resultado satisfactorio en base a los análisis y diseños de las edificaciones, por ello, este trabajo de tesis se procederá de la siguiente manera.

Primero se hará la descripción de las características del suelo y las características del sismo a partir de publicaciones de trabajos como: El periodo natural de vibración del suelo en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, realizada por la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH), Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) y Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICAH) dirigida por un grupo de investigadores de dichas instituciones (Carlos et al., 2006).

Así mismo, la publicación: Nueva microzonificación sísmica de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez Chiapas dirigida por un grupo de investigadores del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chiapas (Ordoñez et al., 2014).

Se utilizará dos métodos de análisis para la misma edificación, el primero es llamado análisis no lineal elástico que consiste en estudiar la estructura en conjunto con el suelo, cuando ambos son sometidos a fuerzas dinámicas, en este método existen muchas variables tales como, el suelo, la cimentación, la estructura, el periodo de vibración, los espectros de diseño, y los apoyos sobre el suelo se consideran flexibles. El segundo método es un análisis convencional con apoyos rígidos sobre el suelo al ser sometidos a fuerzas dinámicas. Luego de obtener ambos resultados poder hacer una comparativa entre los análisis.

Para ambos métodos se seguirán los lineamientos del reglamento de construcción para el municipio de Tuxtla Gutiérrez Chiapas, así mismo se utilizará las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo de la ciudad de México (NTCDS-2023) y también se tomará en cuenta las recomendaciones y procedimientos del Capítulo de Diseño por Sismo del Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CDS-MDOC CFE 2015). Estos son los reglamentos, normas y manuales vigentes que son la base fundamental para poder realizar un análisis sísmico de cualquier tipo de estructura.

Para un mejor entendimiento del fenómeno de estudio se utilizará la tecnología para para el modelado de la estructura en análisis y se utilizará un programa de computadora para poder entender mejor el comportamiento de la estructura y los resultados que nos brinden nos servirá para analizar la estructura en conjunto con el suelo y así poder hacer el diseño sísmico de la estructura que considera la interacción suelo-estructura.

3.2 Procedimientos.

Primeramente, se analizará los casos particulares de suelos que existen en el lugar, detallando de manera clara y precisa con base a los datos recabados por investigadores por medio de sondeos y muestras de los tipos de suelos que existen en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. Seguidamente se plantea el análisis con interacción suelo-estructura y cuáles son las ventajas de tomar en cuenta la interacción, una vez teniendo las características del suelo y sus propiedades mecánicas, se propondrá una subestructura para el edificio, definiendo si es una cimentación superficial o profunda, para luego proponer la súper estructura que actuara en conjunto con la cimentación y el suelo.

Con los métodos de análisis y diseño de estructuras descritos anteriormente y con los parámetros y variables de la estructura como periodo natural de vibración y amortiguamiento y con datos de los sismos actuantes en la localidad se realizará el modelado del edificio en estudio en el programa SAP2000. Este consistirá en hacer el mismo modelado del edificio tres veces, utilizando el mismo análisis en tres tipos de suelos diferentes que existen en la ciudad considerando las características particulares de cada suelo. Los tres tipos de análisis consideran la interacción suelo-estructura y el modelado en cada caso particular brindara información necesaria en el cambio del periodo de vibración de la estructura. De la misma manera se realizará tres análisis de manera convencional, no tomando en cuenta el efecto de interacción suelo-estructura, si no, considerando los apoyos rígidos. cada análisis considera las características particulares del suelo.

Finalmente se evaluarán los resultados de los dos tipos de análisis, uno que considera la interacción suelo-estructura y otro que no la considera y se dará a conocer los beneficios de considerar el análisis con interacción, también se brindará información de en qué casos se debe utilizar el cálculo de estructuras de diseño por sismo de manera convencional. Este es el procedimiento a utilizar en esta investigación para poder comparar los resultados que se obtengan durante el proceso de la misma.

3.3 Limitaciones.

El trabajo de tesis se limitará a un caso en particular para su análisis de diseño por sismo de un edificio de concreto armado de 4 niveles, para uso exclusivo de un conjunto habitacional en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, se toma únicamente un caso en un sitio específico para poder obtener características particulares del suelo y el análisis sea razonable.

Se toma este tipo de estructura debido a que en la ciudad hay diversas edificaciones con estas características y son usadas como departamentos para uso habitacional, por tal motivo, el interés de querer estudiar este tipo de construcciones y analizar su funcionamiento y capacidad de carga cuando es sometida a fuerzas sísmicas.

El lugar de estudio es la ciudad de Tuxtla Gutiérrez y se hará un caso particular para el análisis que tome en cuenta la interacción del suelo con la estructura y en el mismo sitio de estudio se realiza el análisis considerando empotramientos.

3.4 Participantes.

Este trabajo se realiza en conjunto con el director de tesis el M.I Jorge A. Aguilar Carboney, docente en la Facultad de Ingeniería Campus-1 UNACH. Así mismo, el Ing. William Velázquez Ramírez alumno de Maestría en Ingeniería con formación en Construcción en la Facultad de Ingeniería de la UNACH.

3.5 Muestra.

Para el caso de los suelos, se toma las muestras de trabajos e investigaciones ya realizados por publicaciones de investigadores. Para el caso de los espectros de diseño para análisis sísmico se usa el programa PRODISIS del Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (MDOC-CFE, 2015).

3.6 Instrumentos.

Para poder realizar el trabajo de manera más eficiente se utilizará un programa de estructuras conocido como SAP 2000, donde se modela el edificio y la interacción de la estructura con el suelo por el método de elementos finitos.

Para las características del suelo se obtienen de investigaciones ya realizadas en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez por medio de sondeos y muestras del suelo.

Para realizar el análisis se utiliza las Normas Técnicas Complementarias y el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad, donde da la herramienta para utilizar el programa PRODISIS para obtener los espectros de diseño modificado.

4. Resultados y Discusiones.

En este apartado se presenta el procedimiento de los métodos utilizados para el análisis de la estructura a base de concreto reforzado y losas macizas, considerando la interacción del suelo con la estructura. Así mismo, se comparan los resultados obtenidos con los autores dictados en el marco teórico, realizando una discusión con los resultados obtenidos en el estudio y los que se esperaba según la hipótesis.

4.1 Descripción del Caso de Estudio.

El caso de estudio del proyecto se emplaza en un predio con un área de 340 m² ubicada en la colonia Industrial con Latitud: 16.734744° y Longitud: -93.064350 (figura 9), en el municipio de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Para el análisis se toma en cuenta el Reglamento de Construcción del Distrito Federal y se complementa con las normas del año 2023 (concreto y sismo). Así mismo, para el diseño sísmico se considera el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad 2015 (MOCDS-CFE, 2015).

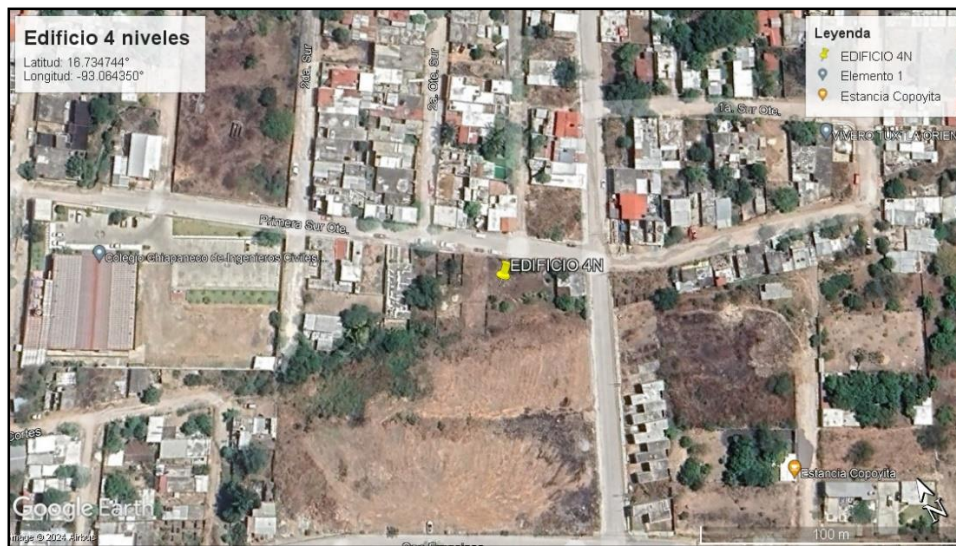


Figura 9. Localización del sitio en estudio.

Fuente: Elaboración propia tomada de Google Earth.

4.1.1 Macro Localización Sísmica del Sitio de Estudio.

Las intensidades del peligro sísmico varían en el territorio mexicano en forma continua, tanto los valores de referencia, como los asociados a periodos de retorno, el programa PRODISIS (figura 10) propone una regionalización en que se consideren cuatro zonas: dos de baja y dos de alta sismicidad (MOCDS-CFE, 2015). Por la zona sísmica donde se encuentra el edificio en estudio se clasifica como C, de alto riesgo sísmico.

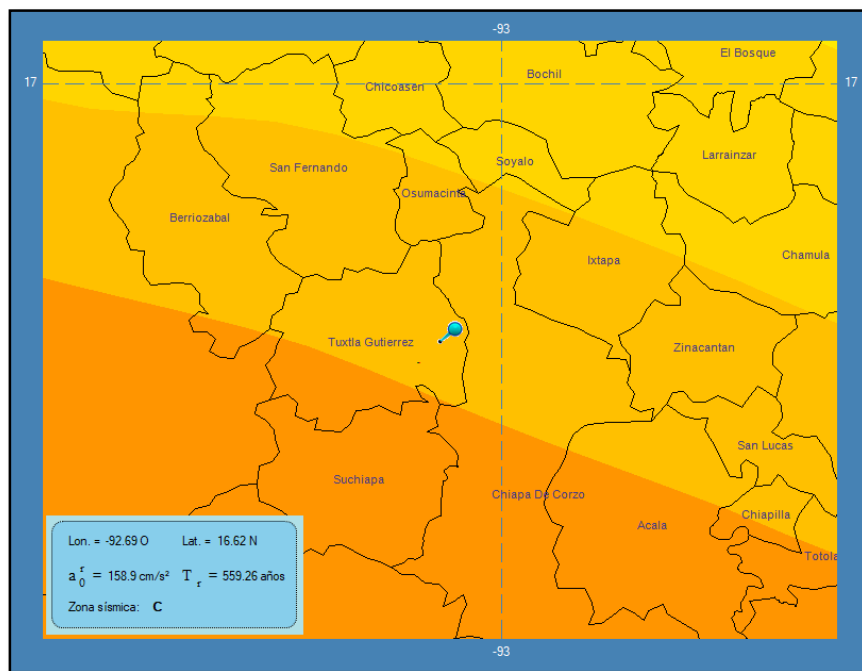


Figura 10. Ubicación sísmica del sitio de estudio. PRODISIS.

De esto podemos observar que la ciudad de Tuxtla Gutiérrez está en una zona de alta sismicidad y por tal motivo la zona sufre de muchos movimientos y en ocasiones esos movimientos son de una frecuencia alta, es ahí donde las estructuras sufren fallas.

4.1.2 Micro Localización Sísmica del Sitio de Estudio.

Después de un análisis bibliográfico de las razones espectrales existentes en la zona de estudio, de las cuales, la ciudad de Tuxtla Gutiérrez tiene información al respecto de manera técnica y confiable, se pudo localizar valores confiables respecto al periodo dominante. Con esta información y las investigaciones que han realizado y publicado los especialistas han logrado hacer una distribución de los periodos dominantes en toda la ciudad.

En el año 2013 el doctor Ordoñez, desarrolló un mapa para la microzonificación sísmica de Tuxtla Gutiérrez, donde se presentan 3 zonas de clasificación de terrenos para fines de diseño sísmico y nos serán de utilidad en este estudio:

- **Azul:** la zona estable de la ciudad; esta región no presenta efecto de sitio, sin embargo, se encuentran estratos de sedimentos con poca profundidad
- **Amarillo:** zona con efecto de sitio
- **Naranja:** zona de riesgo; esta zona forma parte de las lomas de Tuxtla Gutiérrez, debido a los derrumbes en la cual han ocurridos deslizamientos de taludes producto de eventos sísmicos, saturación y presión de poro en los suelos por las constantes lluvias (Ordoñez, 2013).

Según la información existente, se ubica el predio en estudio en el mapa de Google Earth (figura 11) y se estima, que la estructura en estudio se encuentra en la zona de riesgo de la ciudad y un periodo aproximado $T_s = 0.40$ segundos, el cual se toma como referencia para el análisis estructural, siendo un parámetro aproximado.

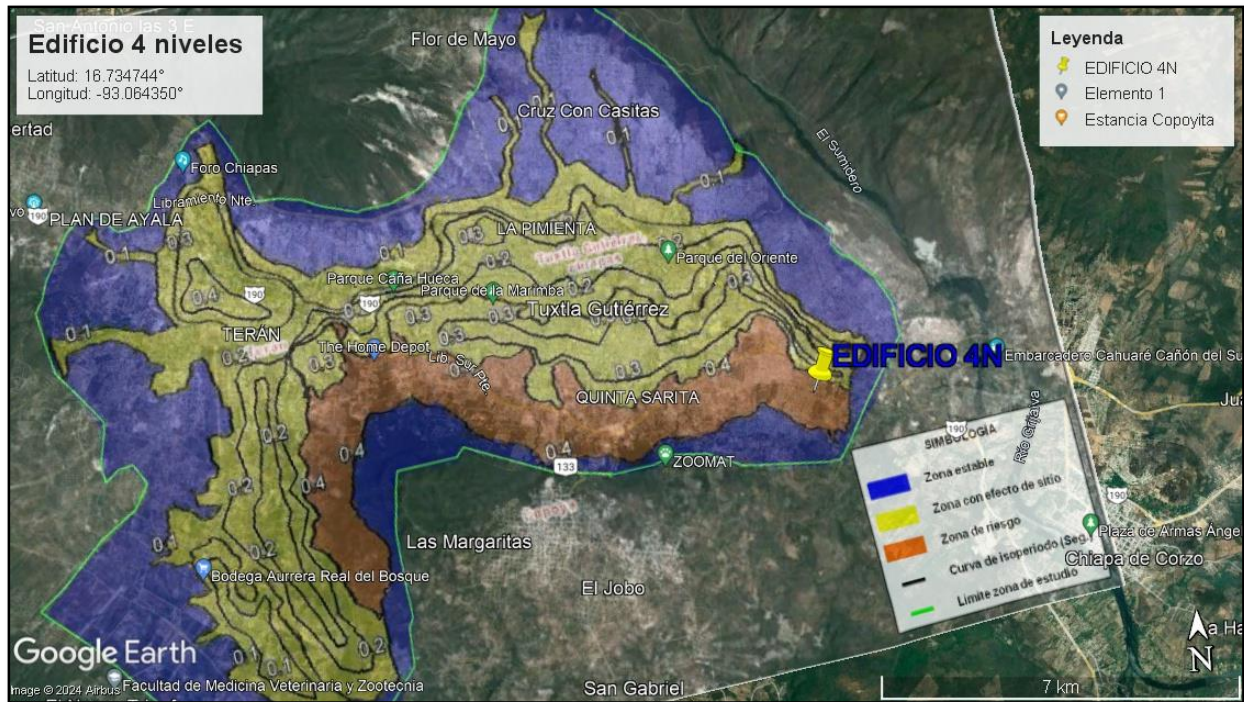


Figura 11. Peligro sísmico del estado de Chiapas.

Fuente: Elaboración propia tomada de Google Earth.

4.1.3 Ubicación Geotécnica de la Estructura.

De acuerdo con la publicación y estudios realizados por el Dr. Jorge Ordoñez Ruiz, el cual propone una zonificación geotécnica de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez (figura 12), la cual es referencia bibliográfica y técnica más cercana a la zona de estudio, está comprendida en tres zonas:

- Zona C, en estas zonas se observan depósitos de rocas calcáreas de origen sedimentario, con afloramiento de rocas calizas muy intemperizadas, conocidas como caliche, sobre yaciéndoles una capa de arcilla de color negro, de mediana a alta plasticidad de 0.5 a 1.0 metros de profundidad
- Zona B, se tiene presencia de Lutitas (Arcillas), muy estratificadas de color café oscuro, de consistencia firme en estado seco

➤ Zona A, constituido por terrenos aluviales ubicados a lo largo del cauce del río Sabinal, formado de estratos de arcilla de hasta 7.0 metros de color negro y de media a alta plasticidad (Ordoñez, 2013).

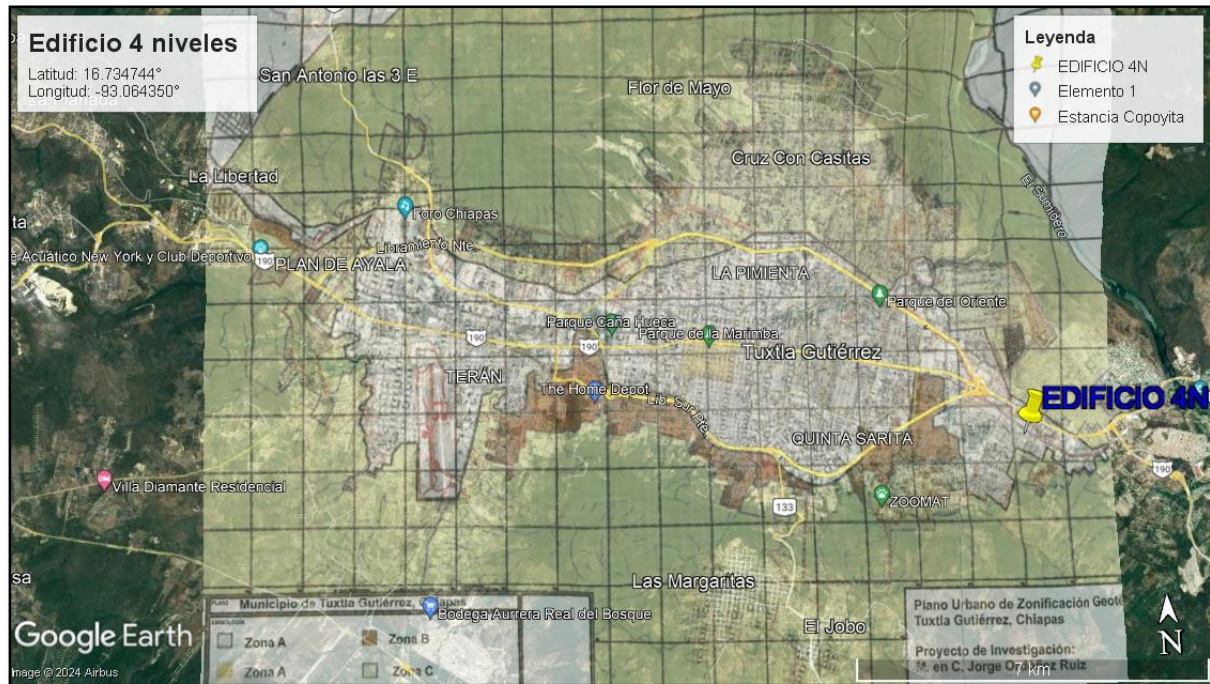


Figura 12. Localización geotécnica de la estructura.

Fuente: Elaboración propia tomada de Google Earth.

La estructura en estudio se ubicada en una zona promedio de capacidad de carga considerando así, una Zona A, en estas zonas se tiene presencia de terrenos aluviales, en este tipo de suelos existen estratos de arcilla y dependiendo de su ubicación pueden ser hasta 7.0 metros de profundidad y su color es negro, la plasticidad de las arcillas es de media y alta, por lo que se considerara un terreno blando y las consideraciones del diseño sísmico se considera así, como un terreno blando.

4.1.4 Criterios de Diseño

El Edificio en análisis es uno de 4 niveles para uso habitacional, en la figura 13 se muestra el plano en planta y sus alzados para mayor visualización.

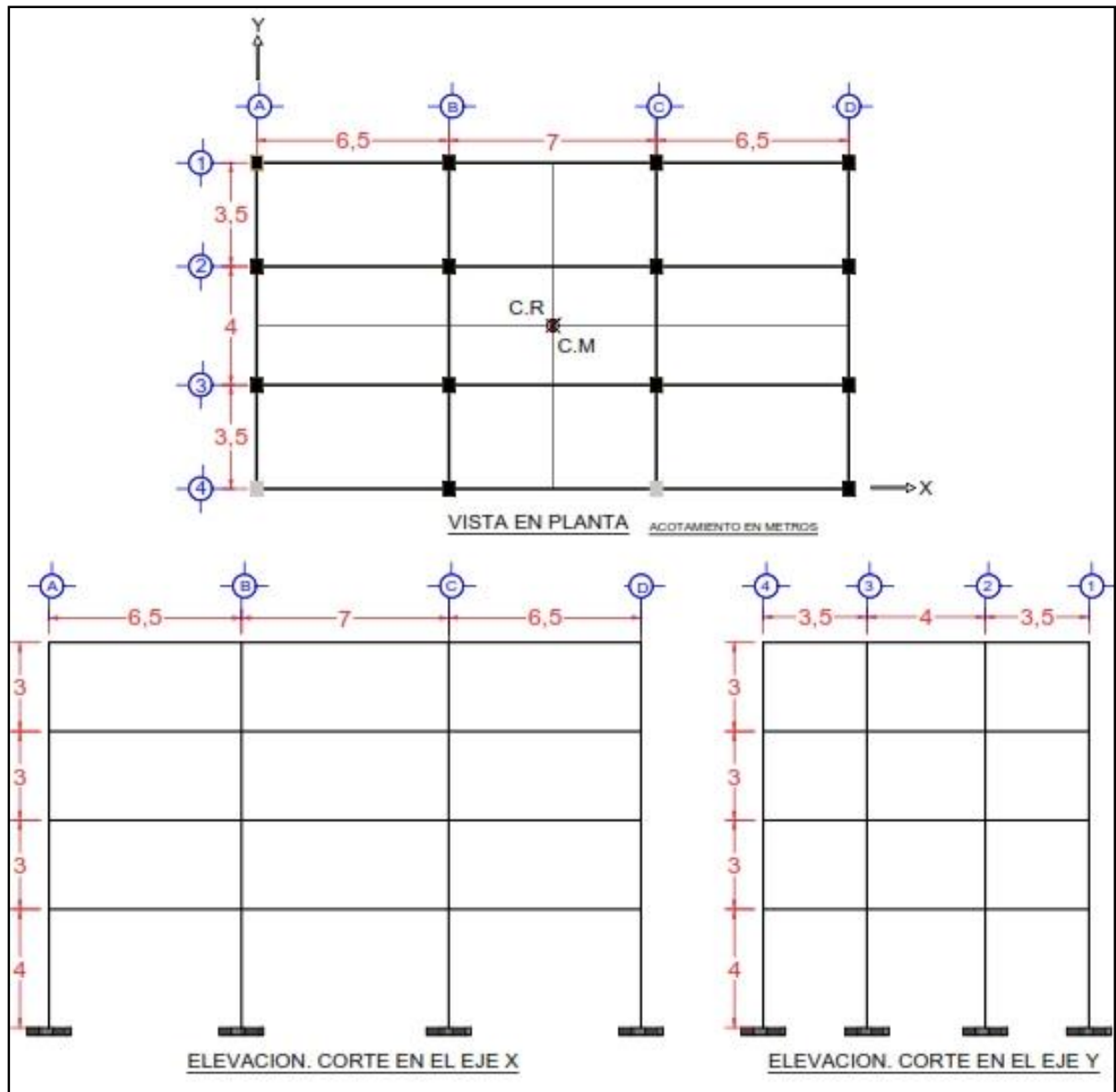


Figura 13. Características generales del edificio.

Fuente: elaboración propia.

Para el análisis de nuestro caso en específico, que es la interacción del suelo con la estructura se utilizó un edificio tipo a base de marcos rígidos compuestas por columnas, traveses y losas macizas que se menciona en el ejemplo del MDOC-DS-CFE-2015. Por lo tanto, se contempla al sismo de diseño actuando bidireccionalmente, es decir, en ambas direcciones del plano, tanto en x, como en y.

Como se observa en planta el edificio es una estructura compuesta por 4 niveles, cuyas dimensiones están de: ancho del edificio de 11.0 metros, largo de 20.0 metros y una altura de 13 metros. Como la estructura es regular en planta y en todos los entrepisos el centro de masa calculados para cada nivel está en la misma coordenada. $X_{cm} = 10.0$ m, y $Y_{cm} = 5.5$ m. A continuación, se muestran en la tabla 1 las secciones correspondientes para cada entrepiso y cada marco de la estructura propuesta.

SECCIONES DE ELEMENTOS MECANICOS (M)			
ENTRE PISO	ELEMENTOS	EJE X	EJE Y
PARA PRIMERO Y SEGUNDO	COLUMA	0.4	0.5
	TRABE TIPO I EJE X	0.25	0.5
	TRABE TIPO I EJE Y	0.25	0.5
PARA TERCERO Y CUARTO	COLUMA	0.35	0.45
	TRABE TIPO II EJE X	0.2	0.45
	TRABE TIPO II EJE Y	0.2	0.45

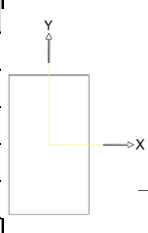


Tabla 1. Secciones de elementos del edificio.

Estas secciones propuestas son las que se utilizarán en los cálculos de análisis para la estructura, para el análisis de cargas y para todos los procedimientos de análisis sísmico que se realizará. Se utilizan estas secciones ya probadas en el análisis estático y se pretende ver su funcionalidad estructural con el análisis dinámico de interacción suelo-estructura.

Toda estructura y cada una de sus partes son diseñadas para cumplir los siguientes lineamientos básicos:

- Tener la seguridad adecuada contra la aparición de todo estado límite de falla posible ante las combinaciones de acciones más desfavorables que puedan presentarse durante su vida esperada
- No rebasar ningún estado límite de servicio ante combinaciones de acciones que corresponden a condiciones normales de operación (MDOC-CFE, 2015).

La cimentación es considerada a base de zapatas corridas desplantada a 2.0 m de profundidad, debido a las características y condiciones del terreno, todo esto para garantizar la interacción del suelo con la estructura; debido a que es la condición con la que se modela.

En la aplicación de los métodos para el análisis dinámico de la estructura, se toma en cuenta un efecto muy importante, que es el efecto de agrietamiento que sufren los elementos estructurales al ser sometidos a cargas, para el cálculo de la rigidez usando el módulo de elasticidad del concreto y la inercia de los elementos mecánicos, estos últimos se multiplican por un factor de reducción por agrietamiento que para las vigas se multiplica el momento de inercia por 0.5, y para las columnas se multiplica el momento de inercia por 0.7.

También se debe tener en cuenta las características de los materiales a utilizar y sus capacidades de resistencia para considerarlo en los análisis. A continuación, se enlista los las características y propiedades de los materiales a utilizar, ya que las propiedades de los materiales son de utilidad para realizar los cálculos en el análisis sísmico, solamente se colocan los materiales que tienen más importancia.

- Concreto hecho en obra y/o premezclado, clase 1, $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ (25 MPa) que cumple con la norma NMX-C-155, columnas, vigas, zapatas, contra trabes, losas de concreto, resistencia normal a los 28 días, tamaño máximo del agregado $\frac{3}{4}$ " (2.0 cm) y revenimiento de 12.
- Acero corrugado de alta resistencia $F_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ o 412 MPa tipo HYLSA o similar grado 42, para todos los elementos estructurales con diámetros desde $\frac{3}{8}$ " hasta 1".
- Agregado fino, este material debe ser arena fina, que se obtiene a base de trituración y cribado, su módulo de finura está comprendida entre 2.3-3.1 con un más menos de ± 0.2 . Para su buen funcionamiento y trabajabilidad el material no debe estar contaminado de impurezas y materiales orgánicos.
- Agregado grueso, este material debe ser de grava natural con un tamaño máximo del agregado de $\frac{3}{4}$ " que se obtiene por el proceso de trituración y cribado. Su módulo de finura está comprendido entre 6.5-7.5 con un más menos de ± 0.2 . Este material debe estar libre de impurezas.

4.2 Análisis de Cargas.

Conforme a los pesos volumétricos recomendados por el reglamento de construcciones, avalados por el RCCDMX-2023 se consideró el siguiente análisis de cargas, considerando acciones variables, permanentes y accidentales.

- Acciones permanentes: Son las que actúan todo el tiempo en la vida útil de la estructura, se le conoce mayormente como cargas muertas, estas tienden a variar muy poco respecto al tiempo.

- Acciones variables: Son las que actúan en la estructura de manera variable, se le conoce mayormente como cargas vivas. Estas dependen de la función principal de la estructura.
- Acciones accidentales: Las que ocurren esporádicamente en las construcciones, las conocemos como fuerzas horizontales y puede ser el sismo, viento, explosiones, etc.

Estas acciones que actúan en el edificio se manifiestan en diversas combinaciones dependiendo el caso de evaluación, para los casos más desfavorables se toma en cuenta la máxima intensidad de acciones permanentes y variables, para otros casos con una intensidad instantánea, y para los efectos a largos plazo en las estructuras se considera la intensidad media.

Una estructura se analiza bajo acciones de una componente horizontal ortogonal al movimiento del terreno, y esta acción genera una deformación en el suelo que se combina con las fuerzas internas de la estructura y es ahí donde las cargas realizan las combinaciones necesarias para hacer trabajar a la estructura, esto lo especifica claramente los reglamentos y las normas de la Ciudad de México.

4.2.1 Cargas Muertas.

Las cargas muertas son las que consideran el peso propio de la estructura, es decir, el peso de los elementos constructivos (vigas, columnas, muros, acabados, instalaciones, etc.) y cada elemento que ocupa un espacio de manera permanente y que su peso no disminuirá ni aumentará substancialmente al pasar del tiempo. Este tipo de cargas se le denomina así porque permanecerán en todo el tiempo de la vida útil de la estructura.

Existen también cargas muertas adicionales y son aplicadas por el reglamento para cada caso en específico. para estimar las cargas muertas es necesario los dimensionamientos del cada elemento a participar, también en muy importante los pesos unitarios de los materiales. Para aplicar pesos unitarios siempre se considera el caso más desfavorable para la estructura, es decir, se utilizan valores mínimos en caso de volteo, y los valores máximos siempre se emplean para los otros casos.

A continuación, se muestra en la tabla 2 las cargas muertas adicionales que tendrá la estructura, ya que las cargas muertas propias de losa, trabe y columna lo considera de manera automática el programa SAP2000, que es programa con que se realiza el análisis en estudio.

Entrepiso			
1	Loseta cerámica	35	Kg/m ²
2	Mortero (0.015 m x 2,100 Kg/m ³)	31.5	Kg/m ²
4	Instalaciones	15	Kg/m ²
6	Carga Adic (5.1.2 NTCSCADEE)	40	Kg/m ²
Total, Carga Muerta		121.5	Kg/m²
Azotea			
1	Impermeabilizante	15	Kg/m ²
2	Mortero (0.015 m x 2,100 Kg/m ³)	31.5	Kg/m ²
4	Instalaciones	15	Kg/m ²
5	Carga Adic (5.1.2 NTCSCADEE)	40	Kg/m ²
Total, Carga Muerta		101.5	Kg/m²

Tabla 2. Cargas muertas adicionales.

4.2.2 Cargas Vivas.

Las cargas vivas son fuerzas que se producen en la estructura en función del uso y ocupación que tendrá, ya que esta carga no surge por la construcción de la edificación y no actuará de forma permanente, a menos que se justifiquen racionalmente otros valores.

Estas cargas se tomarán iguales a las especificadas en las Normas Técnicas Complementarias (tabla 3). Para este tipo de cargas vivas se debe considerar lo siguiente.

- 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 instantánea W_a se deberá usar para diseño sísmico y por viento y cuando se revisen distribuciones de carga más desfavorables que la uniformemente repartida sobre toda el área
- La carga media W se deberá emplear en el cálculo de asentamientos diferidos y para el cálculo de flechas diferidas (NTC-CADE, 2023).

Destino de piso o cubierta	W	W _a	W _m
	(Kg/m ²)	(Kg/m ²)	(Kg/m ²)
a) Habitación (casa-habitación, departamentos, viviendas, dormitorios, cuartos de hotel, internados de escuelas, cuarteles, cárceles, correccionales, hospitales y similares)	80	100	190
h) Azoteas con pendiente no mayor de 5%	15	70	100

Tabla 3 Cargas vivas adicionales, Fuente (NTC-CADE, 2023).

4.2.3 Combinaciones de Carga.

Debido a que la estructura entra en la clasificación de estructuras tipo B1, a las combinaciones de cargas se le aplicara un factor de carga tal como se puede apreciar en la tabla 4 que a continuación se muestra.

GRAVITACIONALES	SISMO (+/-)
PP = 1.3	PP = 1.1
CM = 1.3	CM = 1.1
CV = 1.5	Cvac. = 1.1
	Sx = Sy = 1.1

Tabla 4. Factores de cargas. Fuente. Elaboración propia.

4.2.4 Efectos Bidireccionales.

Para el método sísmico estático o el sísmico dinámico modal espectral los efectos de los dos componentes horizontales del movimiento del terreno se deben combinar, tomando en cada dirección en que se analice la estructura 100 por ciento de los efectos del componente que obra en esa dirección y 30 por ciento de los efectos del que obra perpendicularmente a el, con los signos que resulten más desfavorables para cada concepto (tabla 5). Para el análisis se toman en cuenta las siguientes nueve combinaciones de cargas, se pueden realizar muchas más combinaciones de carga, para efecto de análisis de nuestro caso se tomarán en cuenta nueve combinaciones y con estas nos dará una respuesta aceptable.

Estados de carga y factores de carga correspondientes						
Combinación	PP	CM	CVM	CVA	Sx	Sy
Gravitacional	1.3	1.3	1.5			
Sísmico 1	1.1	1.1		1.1	1.1	0.33
Sísmico 2	1.1	1.1		1.1	1.1	-0.33
Sísmico 3	1.1	1.1		1.1	-1.1	0.33
Sísmico 4	1.1	1.1		1.1	-1.1	-0.33
Sísmico 5	1.1	1.1		1.1	0.33	1.1
Sísmico 6	1.1	1.1		1.1	0.33	-1.1
Sísmico 7	1.1	1.1		1.1	-0.33	1.1
Sísmico 8	1.1	1.1		1.1	-0.33	-1.1

Tabla 5. Combinaciones de carga.

4.3 Clasificación de la Estructura.

La estructura en análisis como se mencionó anteriormente es un edificio de uso habitacional y su funcionamiento será por marcos de concreto reforzado por medio de columnas, trabes y losas macizas de entrepiso, que son los elementos que suministrarán la resistencia de la estructura.

Esta estructura conforme a su uso según el MDOC-DS-CFE, 2015 (Sección 3.1.2.1), se clasifica dentro del Grupo B, estructuras en las que se requiere un grado de seguridad convencional, son construcciones cuya falla estructural ocasionaría la pérdida de un número reducido de vidas, pérdidas económicas moderadas o pondría en peligro otras construcciones de este grupo y/o daños a las del Grupo A+ y A moderados.

Las estructuras del grupo B, se dividen de acuerdo con su tamaño, es decir, de la altura de la construcción, H, y del área total construida, Ac, como se indica:

- Subgrupo, Clase 1 (B1): Altura mayor que 13 m o área total construida mayor que 400 m²
- Subgrupo, Clase 2 (B2): Altura menor o igual que 13 m y área total construida menor o igual que 400 m² (MDOC-DS-CFE, 2015).

Entonces por su tamaño el edificio en estudio tiene una altura total de 13 metros y un área construida en planta de: 20.0 metros x 11.0 metros en 4 niveles = 880 m². Por lo tanto, se clasifica como clase 1 (B1). Por su estructuración se considera como tipo 1, estructura de edificios. Se deduce que el edificio en análisis está catalogado como una del grupo B, clase 1 (B1).

4.4 Análisis Sísmico.

En base a los datos mencionados anteriormente y las consideraciones correspondientes se realiza en análisis sísmico de acuerdo al MDOC-CFE, 2015. Lo primero que se realiza es verificar si la estructura en análisis es regular o irregular, esto se logra si cumple con los 11 requisitos que a continuación se mencionan.

4.4.1 Condiciones de Regularidad.

Para el análisis sísmico la regularidad de un edificio debe cumplir las once condiciones de regularidad que indica el MDOC-CFE2015 que son las siguientes:

1. Las masas, los muros y otros elementos son simétricos en esta estructura tal como se puede apreciar en las plantas y alzados de la figura 11, y las columnas resistentes en cada nivel son simétricos en ambos sentidos, entonces cumple la primera condición.
2. La segunda condición es la relación que existe entre la altura de la estructura y el ancho de la base, esta relación no debe ser mayor a 2.5.

$$\frac{H}{B_y} = \frac{13}{11} = 1.18 < 2.5 \quad \text{cumple}$$

3. La tercera condición es la relación que existe entre largo y ancho de la base del edificio, esta relación no debe ser mayor a 2.5.

$$\frac{B_x}{B_y} = \frac{20}{11} = 1.81 < 2.5 \quad \text{cumple}$$

4. En la figura 11 se observa que no hay entrantes ni salientes en donde las medidas sea mayor al 20%. Esta condición se cumple fácilmente porque la estructura es rectangular y no tiene ni entrante ni saliente en ambas direcciones.
5. En todos los niveles se considera los entrepisos como losas macizas y este sistema de construcción es resistente y también rígido, por lo tanto, esta condición se cumple.
6. En las losas de entrepiso de cada nivel no se consideran ningún tipo de aberturas. Por lo tanto, no exceda el 20% de la dimensión de la planta en ambas direcciones y la estructura cumple con esta condición.
7. El peso de cada nivel no es mayor que 110% ni menor que 70% del correspondiente al piso inmediato inferior, el ultimo entrepiso queda excluido de esta condición (MDOC-DS-CFE, 2015). Se observa en planta que el edificio tiene las mismas medidas y no tiene entrantes ni salientes si cumple con esta condición.
8. Ningún piso tiene un área, delimitada por los paños exteriores de sus elementos resistentes verticales, mayor que 110%, ni menor que 70% de la del piso inmediato inferior (MDOC-DS-CFE, 2015). En la figura 11 se observa que todas las áreas son iguales en las losas macizas y no tiene diferencia de áreas, por lo tanto, si cumple.
9. En todos los pisos todas las columnas están restringidas en dos direcciones ortogonales por tabes y losas planas (MDOC-DS-CFE, 2015). Como se observa en la figura 14 las columnas están restringidas por trabes y losas planas en ambas direcciones. Por lo tanto, cumple.

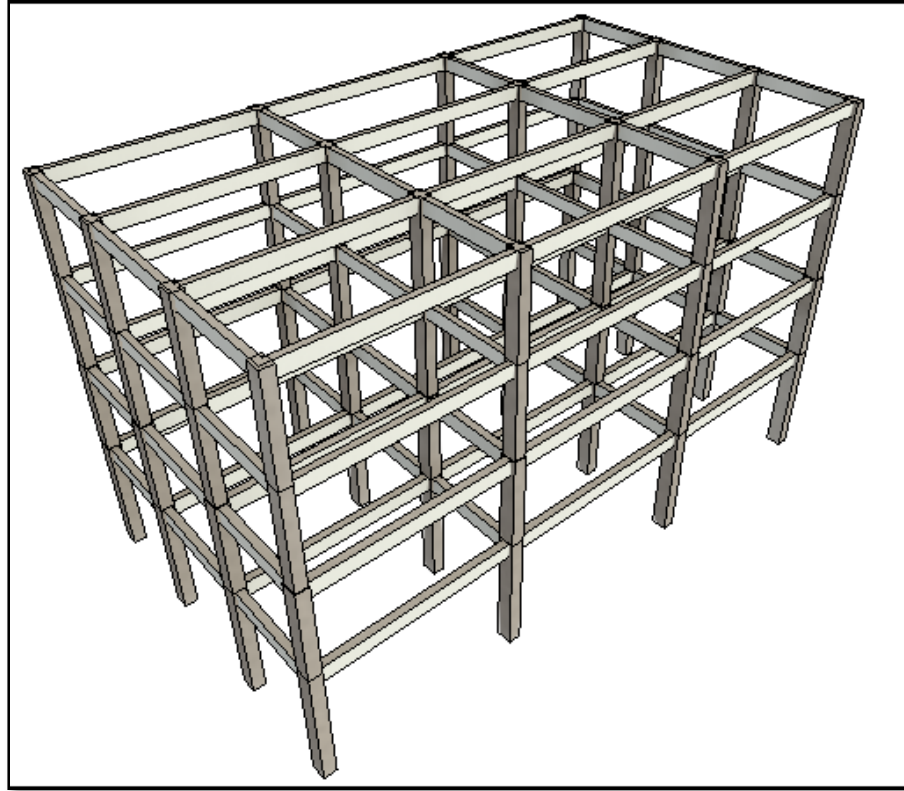


Figura 14. Isométrico del edificio. Fuente: elaboración propia.

10. La décima condición establece que La rigidez y la resistencia al corte de cada entrepiso del edificio no excede en más del 50% a la del entrepiso inmediato inferior (MDOC-DS-CFE, 2015). Se presenta en la tabla 6 las rigideces de entrepiso para revisar las condiciones de regularidad.

ENTREPISO (1.5 K_(j-1))x (Kn/cm)	CUMPLE
rigidez de piso 4 se exenta	PASA
rigidez piso 3 = 713.20 < 1543.13	PASA
rigidez piso 2 = 1,028.75 < 1418.82	PASA
rigidez piso 1 = 945.88	PASA

Tabla 6. Rigidez de entrepiso

11. Para la condición 11 se revisa la torsión en cada nivel, la excentricidad torsional es menor del 10% de su dimensión debido a que tenemos una estructura semejante en cada entrepiso.

Si cumple para ambas direcciones.

Entonces la estructura en análisis cumple con las 11 condiciones de regularidad presentadas anteriormente, por lo tanto, para el análisis se utilizarán los factores correspondientes para una estructura regular y no se utilizan los factores reductores por irregularidad.

Con ayuda del programa PRODISIS se obtiene los parámetros para diseño por sismo (figura 15) ubicando el edificio correctamente en el lugar de construcción.

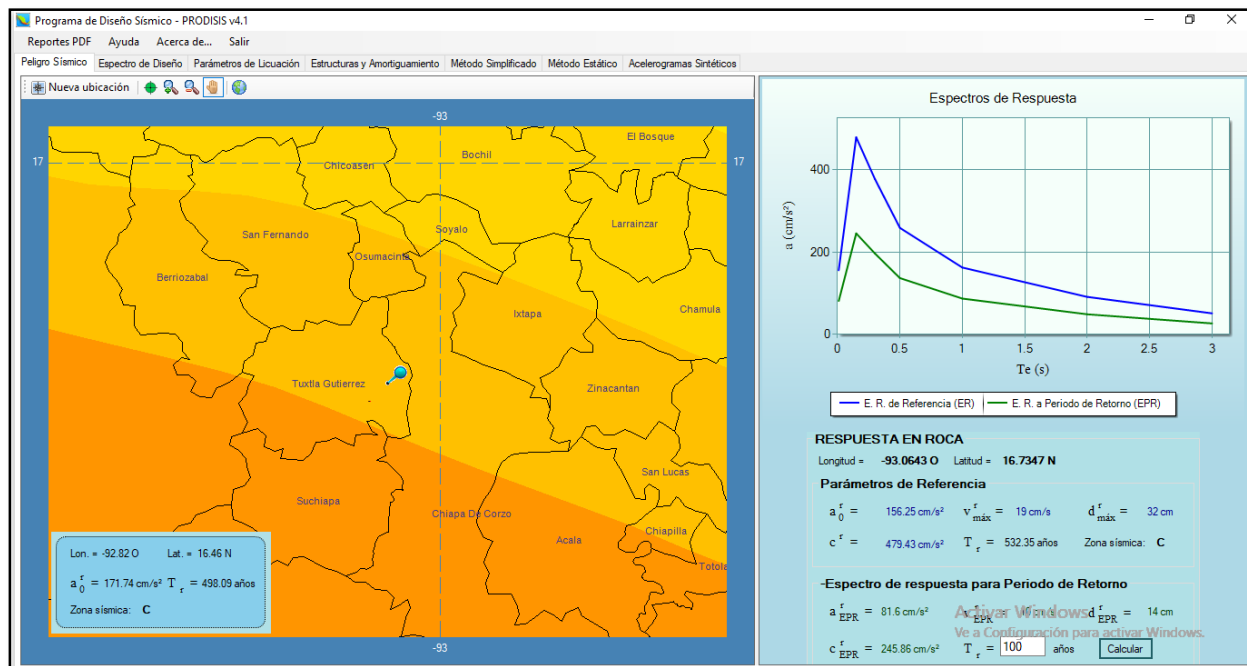


Figura 15. Obtención de los parámetros de diseño sísmico. PRODISIS.

4.4.2 Factor de Amortiguamiento.

Se tomará un factor de amortiguamiento igual a 5% para la estructura, considerando también que según la tabla 3.1 del MDS-CFE, se considera dicho factor de amortiguamiento para estructuras de concreto reforzado.

4.4.3 Factor Reductor por Sobre Resistencia.

Este factor $R\langle T_e, R_o \rangle$ puede ser diferente en ambas direcciones ortogonales del edificio en análisis, según sean sus características en cada dirección. Para nuestro caso de estudio el factor reductor por sobre resistencia será en mismo en ambas direcciones. Se tomará un $R_o = 2.5$ por ser estructura de concreto diseñada para un $Q = 3$. (MDS-CFE, 2015).

4.4.4 Factor de Comportamiento Sísmico.

El factor de comportamiento sísmico Q se emplea para tomar en cuenta la influencia del comportamiento no lineal del sistema en la estimación de su demanda sísmica, y con ello, en su desempeño esperado y nivel de confiabilidad, se tomará un $Q=3$ cuando la resistencia de todos los entrepisos es suministrada por columnas de concreto reforzado, por marcos rígidos y losas planas (MDOC-CFE, 2015).

4.4.5 Factor por Redundancia.

Para cada dirección ortogonal de análisis, la redundancia de la estructuración empleada se tomará en cuenta mediante el factor por redundancia (ρ), se tomará un $\rho=1.25$ ya que se tienen cuatro marcos de tres crujías (MDOC-CFE, 2015).

Con estos factores el espectro de diseño modificado puede obtenerse con el programa PRODISIS (figura 16) seleccionando el tipo de estructuras (edificios) e ingresando los parámetros mencionados.

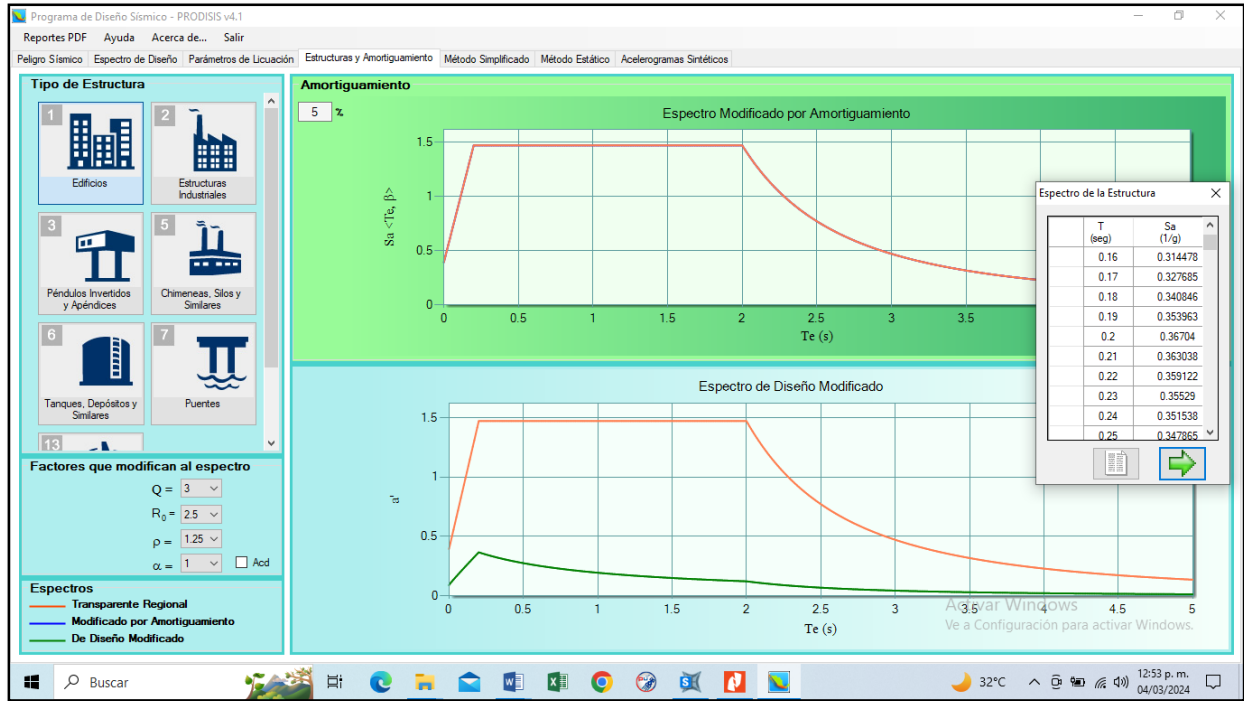


Figura 16. Espectro de diseño modificado.

4.5 Análisis Sísmico con Interacción Suelo Estructura.

Se realiza en análisis dinámico considerando la interacción suelo-estructura con los datos descritos anteriormente. Así mismo, se realiza otro análisis con el mismo tipo de suelo y misma estructura solamente considerando que no existe la interacción.

El análisis se realiza en el SAP2000 con los datos que ya se mencionó en el cálculo, para hacer el análisis se modela en el programa colocando las columnas, trabes y losas macizas con las dimensiones especificadas (figura 17).

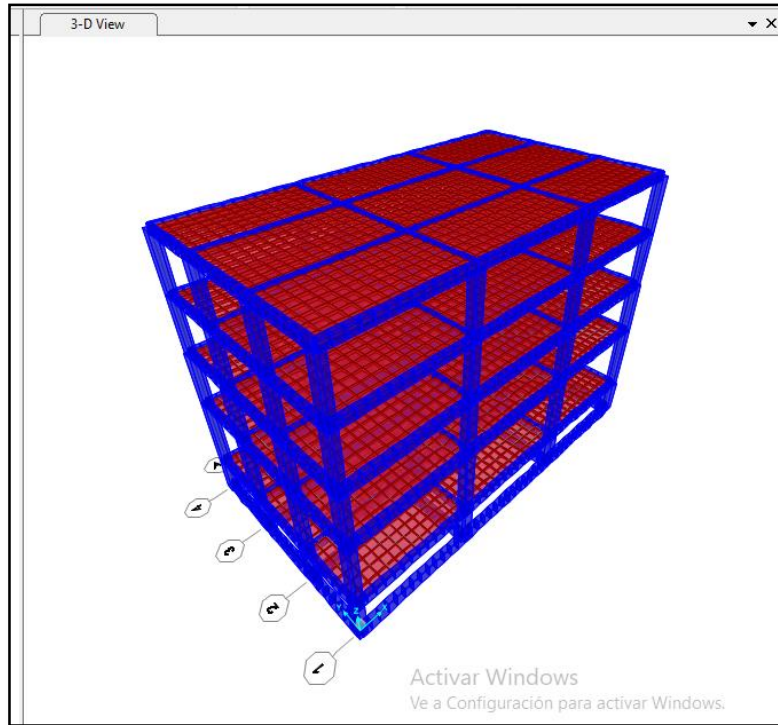


Figura 17. Modelado de la estructura en el programa SAP2000.

Fuente: elaboración propia.

Modelado la estructura con sus características particulares se le asigna a la cimentación la interacción del suelo con la estructura, colocando el espectro de diseño modificado y las consideraciones correspondientes del suelo. Se colocó la constante de resortes para apoyo elástico para una zapata corrida de 2 metros de ancho, y su largo es 50 centímetros, se considera 50 centímetros para dividir los elementos de la estructura para que se aplique el método de elementos finitos y tenga un resultado razonable. A continuación, se muestra el periodo de vibración de la estructura en el sentido del eje X (figura 18) y en el sentido del eje Y (figura 19) con el programa SAP2000.

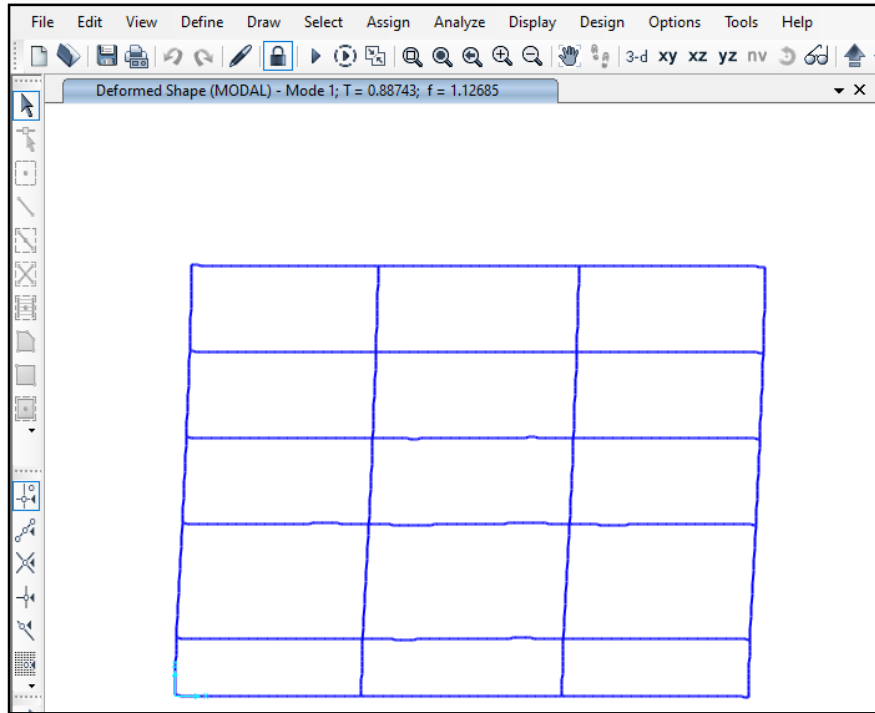


Figura 18. Periodo de vibración de la estructura con IDSE en el eje X.

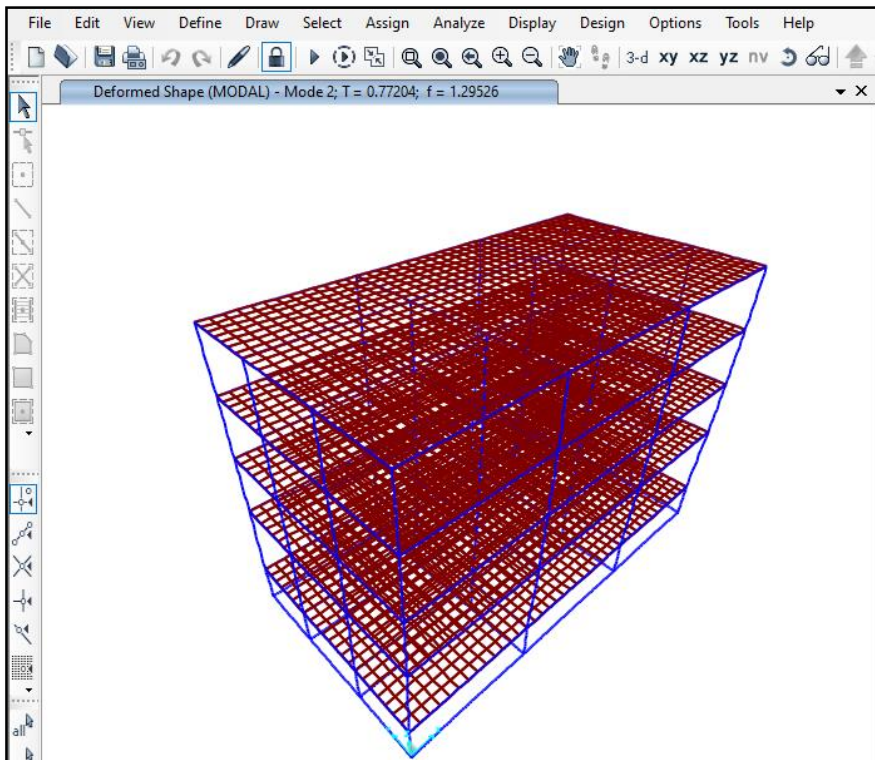


Figura 19. Periodo de vibración de la estructura con IDSE en el eje Y.

4.6 Comparativa de Resultados.

También se realizó el procedimiento considerando empotramiento en la cimentación y sin considerar la interacción del suelo con la estructura, a continuación, se muestra en la tabla 7 una comparativa respecto al periodo natural de vibración con respecto al eje x y al eje Y, del lado izquierdo con la interacción y del lado derecho sin la interacción.

PERIODO NATURAL DE VIBRACION (SEG)		
EJES	CON IDSE	SIN IDSE
EJE X	0.88743	0.82642
EJE Y	0.77204	0.66106

Tabla 7. Comparativa de periodos de vibración.

4.7 Discusiones.

Lo que se busca en un análisis sísmico es que la estructura no tenga problemas de resonancia al estar expuesto a un sismo de gran magnitud. Para evitar problemas de resonancia en la estructura, el periodo de vibrar de la estructura no deberá estar en el rango de vibración del suelo. La estructura se encuentra en una zona con un periodo del suelo igual a:

Periodo de vibración del suelo (T_s) = 0.40 segundos.

se puede apreciar que el periodo dominante de la estructura que consideró los empotres en la cimentación es de 0.8264 segundos y con el análisis que consideró la interacción suelo-estructura el periodo aumenta a 0.8874 segundos, estos resultados nos llevan a mencionar que debido a un incremento en el periodo se requiere un mayor amortiguamiento, por otro lado la estructura en estudio cumple con los requerimientos necesarios para diseño evitando la resonancia cuando este bajo efectos sísmicos y el en el sitio donde se realiza el edificio concuerda con la teoría de los autores mencionados en el marco teórico.

Conclusión.

De acuerdo al tema de investigación Interacción Dinámica Suelo-Estructura se puede concluir que esta fue aplicada para un suelo específico de la ciudad Tuxtla Gutiérrez, un suelo arcilloso de mediana a alta plasticidad y un edificio de cuatro niveles a base de marcos rígidos, con una cimentación superficial constituida por zapatas corridas.

La investigación realizada, encuentra que el periodo natural de vibración de la estructura en estudio con el análisis de interacción dinámica suelo-estructura es de 0.8874 segundos, y el análisis considerando empotramiento resulto con un periodo natural de vibración de 0.8264 segundos. Como puede observarse el aumento del periodo de la estructura es pequeño en comparación a lo esperado. Lo que en términos buscados es un aumento pequeño al interactuar el suelo con la estructura al ser sometidos a cargas dinámicas extremas. Estos resultados tienen su explicación que a continuación se mencionan:

La estructura analizada es considerada de baja altura, eso quiere decir que para este tipo de edificaciones construidas en un suelo arcilloso la interacción suelo-estructura puede aplicarse usando las normas vigentes y los resultados serán aceptables y más apegados a la realidad cuando son sometidos a fuerzas dinámicas.

El análisis realizado tiene buena funcionalidad porque no existe resonancia, es decir, al ser el periodo de vibrar del suelo de 0.4 segundos y de la estructura de 0.8874 segundos no tiene problemas de resonancia. Esto indica que cuando exista un temblor fuerte va a interactuar de manera adecuada, permitiendo que el edificio no llegue al colapso y esté en funcionamiento sin problemas estructurales, únicamente detalles de acabados.

Este tema de investigación es un inicio para la zona de estudio, y puede ampliarse a más variaciones, como puede ser cómo interactúan las edificaciones con la interacción suelo-estructura en cimentaciones profundas, o con estructuras de mayor altura. Estos temas pueden ser cuestiones que se pueden retomar para investigaciones futuras y comparar los resultados obtenidos.

Referencias.

- Arias Marín, P. (2016). *Interacción dinámica suelo-estructura aplicada a distintas geometrías de cimentación (vibración transmitida del suelo a la estructura)*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://www.ptolomeo.unam.mx>
- Astete Juárez, E. (2015). *Interacción suelo estructura en un edificio de planta irregular*. [Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica de Chile]. <https://masterieg.uc.cl/wpcontent/uploads/2022/04/2015-11>
- Avilés, J. y Rocha, L.E. (2004). Bases para las nuevas disposiciones reglamentarias sobre interacción dinámica suelo-estructura. *Revista de Ingeniería Sísmica*. (71), 1-36. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61807101>
- Cantor, G. (2002). La triangulación metodología en ciencias sociales. Reflexiones a partir de un trabajo de investigación empírica. *Cinta de Moebio*. (13). Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Castillo, E. y Vázquez, M. (2003). El rigor metodológico en la investigación cualitativa en *Colombia Medica*. Volumen 34 (3), 164-167. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=28334309>
- Centro de Monitoreo vulcanológico-sismológico. (2023). Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. <https://monitoreo.unicach.mx/index.php?p=page&v=MjM=>
- Chan Canché, J.R. (1997). *Interacción dinámica suelo estructura*. [Tesis de Maestría, Universidad Veracruzana]. <http://colaboracion.uv.mx/insting/Tesis/1997>

Comisión Federal de Electricidad (2015), *Manual de Diseño de Obras Civiles, Estructura, C.1.3*
Diseño por Sismo, Instituto de Investigaciones Eléctricas

Fernández Sola, L.R. y Avilés López, J. (2008). Efectos de interacción suelo-estructura en edificios con planta baja. *Revista de Ingeniería Sísmica*. (79), 71-90.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61812162004>

Guillermo, A., Cruz, R., Santos, F., Ramírez, M., Ruiz, M. y Iglesias, J. (1995). *Zonificación sísmica de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez*. Repositorio Institucional Zaloamati.
<http://hdl.handle.net/11191/2432>

Lafuente Ibáñez, C. y Marín Egoscóabal, A. (2008). Metodologías de la investigación en las ciencias sociales: Fases, fuentes y selección de técnicas. *Revista Escuela de Administración de Negocios*, (64), septiembre-diciembre, 5-18.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=20612981002>

León Alvarado, J.P. (2011). *Interacción estática Suelo-Estructura análisis con el Método de Elementos Finitos*. [Tesis de licenciatura, Universidad Politécnica Salesiana].
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1515/16/UPS-CT002282>

Mejía Bahamon, N.A. *Análisis de Interacción suelo estructura en conjunto con un análisis PUSH OVER en una edificación de 10 pisos en pórticos de concreto, en zonas lacustres de la microzonificación sísmica de Bogotá*. [Tesis de Maestría, Universidad Militar Nueva Granada]. <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/20633>

- Mejía Bermejo, L.A. (2017). *Interacción dinámica suelo-estructura*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México].
<https://repositorio.unam.mx/contenidos/interaccion-dinamica-suelo-estructura-215732>
- Narcía, C., Cruz, R. y Aguilar, J. (2006). El periodo natural de vibración del suelo en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Quehacer científico en Chiapas*. Volumen 1 (1), 22-38.
https://www.dgip.unach.mx/images/pdf-REVISTA-QUEHACERCIENTIFICO/2006-ene-junio/El_periodo_natural_de_vibracion_del_.pdf
- Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo. (2023). Gaceta Oficial de la Ciudad de México. <https://www.isc.cdmx.gob.mx/directores-res/cursos-de-actualizacion-2022/normas-tecnicas-complementarias-2023>
- Normas Técnicas Complementarias para diseño y construcción de estructuras de Concreto. (2023). Gaceta Oficial de la Ciudad de México. <https://www.isc.cdmx.gob.mx/directores-res/cursos-de-actualizacion-2022/normas-tecnicas-complementarias-2023>
- Ordoñez Ruiz, J., Auvinet Guichard, G. y Juárez Camarena M. (2014). Caracterización del subsuelo y análisis de riesgos geotécnicos asociados a las arcillas expansivas de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. *Revista Ingeniería Investigación y Tecnología*, Volumen XVI (3), Julio-septiembre, 454-470. <http://www.revistaingenieria.unam.mx/es/>
- Ordoñez, J.A., Lermo, J.F. y Martínez, J.A. (2014). Nueva Microzonificación sísmica de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez Chiapas. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica*.
https://www.smig.org.mx/admArticulos/eventos/19_XXVII_Reunion_Nacional_de_Inge

neria_Geotecnica/36_Reunion_Nacional/78_caracterizacion_y_zonificacion_geotecnica
_de_ciudades/a5oraj_2.doc

Sánchez González, M. (2001). Una construcción metodológica para compartir desde la investigación cualitativa. *Educación*. Volumen 25 (2), 67-85.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=44025207>

Sautu, R., Boniolo, P., Dalle, P. y Elbert, R. (2005). *Manual de Metodología. Construcción del marco teórico, formulación de los objetivos y elección de la metodología*. Editorial CLACSO. Buenos Aires, Argentina.

Tena Colunga, A. (2019). Interacción suelo-estructura. Reflexiones sobre su importancia en la respuesta dinámica de estructuras durante sismos. *Revista internacional de Ingeniería de Estructuras*. Volumen 24 (2), 141-165, <http://researchgate.net/publication/341132042>

Villarreal Castro, G. (2009). *Interacción suelo-estructura en edificios altos*. Lima, Perú.
<https://www.academia.edu/5328319>