

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



Evaluación de las derivas en un edificio de cinco niveles con marcos especiales a momento, para distintas tipologías de suelo en Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Oscar Josué Cuellar Gonzalez para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

2025



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



Evaluación de las derivas en un edificio de cinco niveles con marcos especiales a momento, para distintas tipologías de suelo en Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Oscar Josué Cuellar Gonzalez para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

2025

Vs.Bo.:

(f)   
Ing. Hugo Enrique Pallais Bateta

Tribunal Examinador:

(f)   
Ing. Hugo Enrique Pallais Bateta

(f)   
Ing. Danilo Antonio Rodríguez Cerón

(f)   
Ing. José Guillermo Aldana Suchini

Fecha de aprobación: Guatemala, 8 de enero de 2025.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al concluir esta etapa tan importante de mi vida, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que, de una u otra manera, han sido parte fundamental de este proceso.

En primer lugar, agradezco a Dios, por darme la fortaleza, la paciencia y la sabiduría necesarias para enfrentar los retos que surgieron en el camino. Su guía ha sido mi mayor sostén en cada paso de esta trayectoria académica.

A mi familia, por su amor incondicional, su apoyo constante y su confianza en mí, en especial a mi madre Milca González, mi abuela Vilma Cuellar y mi hermana Anika Barillas. Gracias por estar siempre a mi lado, por sus palabras de aliento y por ser mi mayor fuente de inspiración. Sin ustedes, este logro no sería posible.

A mis catedráticos y asesores, quienes, con su dedicación y enseñanza, han dejado una huella imborrable en mi formación. Sus conocimientos y orientación han sido fundamentales para mi crecimiento académico y profesional.

A mis amigos de la universidad, por compartir conmigo este viaje lleno de aprendizajes, desafíos y momentos inolvidables, en especial a Luis Broncy, Raúl Roca y Sara Mejía. Gracias por su compañía, su apoyo y por hacer de esta experiencia algo aún más significativo.

A cada persona que, de alguna manera, ha aportado a mi desarrollo en esta etapa, mi más profundo agradecimiento. Este logro no es solo mío, sino de todos aquellos que han creído en mí y me han acompañado en este camino.

## PREFACIO

La presente tesis titulada *Evaluación de las derivas en un edificio de cinco niveles con marcos especiales a momento, para distintas tipologías de suelo en Guatemala* utiliza el software ETABS con el objetivo principal de contribuir al entendimiento del comportamiento estructural de edificaciones sujetas a eventos sísmicos, específicamente en lo que respecta a las derivas de entrepiso y su relación con las características geotécnicas del suelo.

Este estudio surge de la necesidad de profundizar en la evaluación estructural y el diseño sismorresistente de edificaciones en Guatemala, un país con alta vulnerabilidad sísmica. En este conexto, se plantea como desafío evaluar cómo las diferentes tipologías de suelo influyen en las derivas laterales de un edificio de 5 niveles, utilizando como herramienta de análisis el software ETABS, reconocido por su capacidad para realizar simulaciones avanzadas en ingeniería estructural.

La investigación se enmarca en las normativas vigentes del Reglamento Sísmico de Guatemala (NSE) y ACI, los cuales establecen los límites aceptables para las derivas estructurales con el fin de garantizar la seguridad y funcionalidad de las edificaciones. El análisis comparativo entre suelos de diferentes características tiene el potencial de generar recomendaciones prácticas para ingenieros estructurales y diseñadores que trabajan en la región, promoviendo un diseño más seguro y eficiente frente a los movimientos sísmicos.

Agradezco profundamente a mis catedráticos y colegas que me apoyaron durante este proceso, especialmente al ingeniero Hugo Pallais, cuya orientación y experiencia han sido clave para el desarrollo de esta investigación. Agradezco también a mi familia, cuyo apoyo incondicional me ha permitido llegar hasta aquí. Además, a la Fundación Juan Bautista Gutiérrez, cuyo apoyo fue fundamental en mi proceso universitario.

Este trabajo es el resultado de años de esfuerzo académico, investigación y aprendizaje, y representa un paso más en mi camino hacia la práctica profesional de la Ingeniería Civil, una disciplina que, sin duda, tiene un impacto directo en la calidad de vida de las personas y el desarrollo sostenible de nuestra sociedad.

# CONTENIDO

	Página
AGRADECIMIENTOS.....	4
PREFACIO	
AGRADECIMIENTOS.....	5
CONTENIDO.....	6
LISTA DE FIGURAS .....	8
RESUMEN.....	10
<u>A.</u>	
ABSTRACT.....	11
<u>I.</u> INTRODUCCIÓN.....	1
<u>II.</u> ANTECEDENTES.....	3
<u>III.</u> JUSTIFICACIÓN.....	5
<u>IV.</u> OBJETIVOS.....	6
<u>B.</u> Objetivo general .....	6
<u>C.</u> Objetivos específicos .....	6
<u>V.</u> ALCANCE .....	7
VI. MARCO TEÓRICO .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
A. Sistemas constructivos de concreto reforzado.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
B. Software de ingeniería estructural .....	15
<u>D.</u> Diseño de estructuras de concreto reforzado .....	17
<u>E.</u> Herramientas informáticas y su aporte a la Ingeniería Civil .....	22
<u>F.</u> Cálculo de derivas para una edificación .....	24
<u>G.</u> Definición de deriva inter piso .....	24
<u>H.</u> Método de cálculo .....	25
<u>I.</u> Derivas permisibles según AGIES 2018 .....	25
<u>J.</u> Límites de deriva según AGIES 2018 .....	26
<u>K.</u> Verificación de derivas .....	26
<u>L.</u> Tipos de suelo, según AGIES NSE 2018 .....	26
<u>M.</u> Espectro de respuesta utilizado para la determinación de derivas y parámetros de aceleración	

espectral .....	27
<u>N.</u> Parámetros de aceleración espectral .....	27
<u>O.</u> Ñ. Construcción del espectro de respuesta .....	27
<u>P.</u> Determinación de derivas .....	28
<u>Q.</u> Cargas de diseño para edificaciones .....	28
<u>R.</u> Cargas de diseño, según AGIES NSE 2018 .....	28
<u>S.</u> Cargas de diseño según ACI 318-19 .....	29
<u>T.</u> Combinaciones de carga .....	29
<u>U.</u> Factor de importancia $i$ .....	29
<u>V.</u> Factor de modificación de respuesta $R$ para edificaciones de concreto .....	30
<u>W.</u> Factor de escala .....	30
<u>VII.</u> METODOLOGÍA .....	32
<u>A.</u> Ordenamiento y clasificación de información .....	37
<u>B.</u> Diseño estructural .....	40
<u>VIII.</u> RESULTADOS .....	47
<u>IX.</u> CONCLUSIONES.....	53
<u>X.</u> RECOMENDACIONES .....	54
<u>XI.</u> BIBLIOGRAFÍA .....	55
<u>XII.</u> APÉNDICES .....	57

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
Figura 1. Interfaz ETABS.....	16
Figura 2. Integración de cargas muertas.....	31
Figura 3. Cargas vivas.....	32
Figura 4. Propiedades del concreto.....	33
Figura 5. Predimensionamiento losa.....	33
Figura 6. Predimensionamiento viga principal.....	34
Figura 7. Predimensionamiento viga secundaria.....	34
Figura 8. Predimensionamiento columnas.....	34
Figura 9. Espectro sísmico para Guatemala con clase de suelo tipo B.....	38
Figura 10. Espectro sísmico para Guatemala con clase de suelo tipo C.....	38
Figura 11. Espectro sísmico para Guatemala con clase de suelo tipo D.....	39
Figura 12. Modificadores de rigidez de losa.....	39
Figura 13. Asignación de masa al modelo de ETABS.....	40
Figura 14. Viga secundaria.....	40
Figura 15. Viga principal.....	41
Figura 16. Columna de borde y central.....	41
Figura 17. Columna de esquina nivel 1.....	41
Figura 18. Losa de entrepiso y techo.....	42
Figura 19. Propiedades del concreto.....	44
Figura 20. Asignación de cargas al modelo de ETABS.....	45
Figura 21. Espectro sísmico para suelo tipo B en Guatemala, Guatemala.....	45
Figura 22. Espectro sísmico para suelo tipo C en Guatemala, Guatemala.....	45
Figura 23. Espectro sísmico para suelo tipo D en Guatemala, Guatemala.....	45
Figura 24. Análisis modal y masa participante para tipo se suelo B.....	46
Figura 25. Análisis modal y masa participante para tipo se suelo C.....	47
Figura 26. Análisis modal y masa participante para tipo se suelo D.....	47
Figura 27. Deformación de estructura para suelo tipo B.....	47
Figura 28. Deformación de estructura para suelo tipo C.....	48
Figura 29. Deformación de estructura para suelo tipo D.....	48
Figura 30. Desplazamiento máximo por nivel.....	49
Figura 31. Desplazamiento máximo por nivel.....	49
Figura 32. Distribución de derivas por nivel con tipo de suelo B.....	49
Figura 33. Distribución de derivas por nivel con tipo de suelo C.....	50
Figura 34. Distribución de derivas por nivel con tipo de suelo D.....	50
Figura 35. Resumen de distribución de derivas por nivel según tipo de suelo. ....	50
Figura 36. Cargas vivas según NSE 2.1.....	56
Figura 37. Cargas vivas según NSE 2.1 (Continuación).....	57

Figura 38. Cargas vivas según NSE 2.1 (continuación).....	58
Figura 39. Planta de proyecto hotel.....	59
Figura 40. Elevación norte.....	59
Figura 41. Elevación este.....	59
Figura 42. Planta nivel 1.....	60
Figura 43. Planta nivel 2-5.....	60
Figura 44. Mapa de zonificación sísmica de Guatemala.....	61
Figura 45. Mapa geológico de Guatemala.....	62
Figura 46. Listado de amenaza sísmica y velocidad de viento de Guatemala....	63

## RESUMEN

El diseño de estructuras de concreto reforzado es una parte fundamental en la planificación y construcción de edificios y otras infraestructuras. Para asegurar la seguridad, estabilidad y eficiencia de estas estructuras, es esencial contar con herramientas de cálculo y análisis estructural confiables.

ETABS, uno de los programas de análisis y diseño estructural más reconocidos a nivel mundial, ha demostrado su eficacia en una amplia gama de proyectos. Su capacidad para modelar estructuras complejas en 3D y simular eventos sísmicos proporciona a los ingenieros una visión detallada de cómo se comportaría una estructura ante diferentes condiciones. La posibilidad de generar informes gráficos precisos es especialmente valiosa para comunicar los resultados del análisis a los equipos de diseño.

El estudio se enfoca en tres tipologías de suelo representativas del territorio guatemalteco, categorizadas según la clasificación del Reglamento Sísmico de Guatemala AGIES: suelos tipo D (suelo blando), tipo C (suelo intermedio) y tipo B (roca). Se desarrolló un modelo tridimensional del edificio en ETABS, el cual fue sometido a análisis estático y dinámico bajo la acción de cargas gravitacionales y sísmicas, aplicando el método de análisis modal espectral.

Este estudio contribuye a la comprensión del comportamiento sísmico de edificaciones en función del tipo de suelo y proporciona información útil para el diseño sísmico de estructuras en Guatemala, promoviendo así la seguridad y la sostenibilidad de las construcciones.

## **ABSTRACT**

The design of reinforced concrete structures is a fundamental part of the planning and construction of buildings and other infrastructure. To ensure the safety, stability and efficiency of these structures, it is essential to have reliable structural analysis and calculation tools.

ETABS, one of the most recognized structural analysis and design programs worldwide, has proven its effectiveness in a wide range of projects. Its ability to model complex structures in 3D and simulate seismic events provides engineers with a detailed view of how a structure would behave under different conditions. The possibility of generating accurate graphical reports is especially valuable for communicating analysis results to design teams.

The study focuses on three representative soil typologies of the Guatemalan territory, categorized according to the AGIES Seismic Regulations of Guatemala classification: type D soils (soft soil), type C (intermediate soil) and type B (rock). A three dimensional model of the building was developed in ETABS, which was subjected to static and dynamic analysis under the action of gravitational and seismic loads, applying the spectral modal analysis method.

This study contributes to the understanding of the seismic behavior of buildings based on the type of soil and provides useful information for the seismic design of structures in Guatemala, thus promoting the safety and sustainability of buildings.

# I. INTRODUCCIÓN

La ingeniería estructural es un campo en constante evolución, donde la precisión y la eficiencia son pilares fundamentales para concebir y construir infraestructuras seguras y funcionales en un mundo en constante cambio.

El concreto reforzado, gracias a su resistencia y versatilidad, continúa siendo uno de los materiales fundamentales en la construcción de estructuras a nivel global. Su aplicación abarca desde puentes y rascacielos hasta edificaciones residenciales, y la precisión en el diseño y análisis de estas estructuras es esencial para garantizar su integridad y durabilidad.

El comportamiento sísmico de las estructuras ha sido un tema de interés crucial en la Ingeniería Civil, particularmente en zonas de alta actividad sísmica como Guatemala. El diseño de edificaciones debe cumplir con criterios que aseguren tanto la estabilidad estructural como la seguridad de sus ocupantes frente a eventos sísmicos. En este contexto, la evaluación de las derivas, o desplazamientos laterales entre niveles adyacentes, es un aspecto fundamental en el análisis sísmico, ya que está directamente relacionado con la capacidad de una estructura para resistir las deformaciones inducidas por un sismo.

Las derivas excesivas pueden comprometer la funcionalidad de una estructura, generar daños no estructurales y, en casos extremos, ocasionar colapsos. Por ello, las normativas sísmicas, como el Reglamento Sísmico de Guatemala, establecen límites en los desplazamientos laterales permitidos para diferentes tipos de edificaciones. Para poder diseñar estructuras eficientes y seguras, es imprescindible contar con herramientas computacionales avanzadas que permitan simular con precisión el comportamiento de los edificios ante acciones sísmicas.

El software ETABS es una herramienta ampliamente utilizada en la ingeniería estructural para modelar, analizar y diseñar edificaciones sometidas a diversas condiciones de carga. Permite realizar análisis dinámicos y estáticos, lo que facilita la evaluación precisa de las derivas y otros parámetros críticos en el comportamiento estructural. La versatilidad del software ETABS lo convierte en una opción ideal para el estudio del impacto de las condiciones del suelo sobre el comportamiento de una estructura.

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar las derivas de un edificio de cinco niveles situado en Guatemala bajo diferentes condiciones de suelo, categorizadas según la clasificación del Reglamento Sísmico de Guatemala: tipo B (roca), tipo C (suelo intermedio) y tipo D (suelo blando). Este análisis permitió comparar el comportamiento estructural del edificio bajo diferentes condiciones geotécnicas y determinar si se cumplieron los requisitos normativos en cuanto a desplazamientos laterales.

La importancia de esta investigación radicó en que, en Guatemala, la diversidad de condiciones del suelo y la alta sismicidad hicieron esencial un análisis detallado para asegurar el buen desempeño de las estructuras. Los resultados obtenidos contribuyeron a

mejorar el diseño estructural en la región y proporcionaron recomendaciones para la optimización de edificaciones en función del tipo de suelo.

## II. ANTECEDENTES

Se han llevado a cabo una serie de investigaciones que exploran diferentes aspectos del análisis y diseño estructural, utilizando diversos programas y enfoques metodológicos. Estas investigaciones destacan la evolución y la eficacia de las herramientas de modelado estructural en distintas aplicaciones.

Alvarado Lemolle (2008) desarrolló una tesis enfocada en el análisis y diseño de un edificio de cuatro niveles situado en una zona sísmica de categoría I, caracterizada por una alta actividad sísmica. En su estudio, optó por emplear un sistema de losas planas, eligiendo específicamente las losas aligeradas y ábacos macizos de concreto para el sistema de estructuración. Este enfoque buscó optimizar el rendimiento estructural y económico del edificio. Alvarado Lemolle no solo se centró en el diseño y análisis, sino que también investigó los antecedentes históricos de fallas estructurales asociadas con este tipo de sistemas. Para llevar a cabo el modelado y diseño, utilizó los programas de análisis STAAD Pro 2007 y ETABS V.9.0. En su investigación, se dio preferencia a STAAD Pro 2007 debido a su interfaz intuitiva y facilidad de uso, lo que facilitó la modelación compleja y el análisis de la estructura. Esta investigación proporcionó una visión integral sobre la aplicación de diferentes herramientas de software en el diseño de edificaciones en zonas sísmicas, y cómo estas herramientas pueden influir en los resultados y la seguridad estructural.

Briones Sánchez y Álvarez Chiriboga realizaron un estudio comparativo entre los programas ETABS y ROBOT S.A.P. en el contexto del modelamiento, diseño sismorresistente y diseño en concreto armado de un edificio de cinco niveles. Su investigación reveló que, aunque los resultados estructurales obtenidos con cada programa mostraban diferencias en los comportamientos estructurales, estas diferencias no afectaban significativamente el diseño en concreto armado. Además, el estudio destacó una ventaja económica en el uso de ROBOT SAP, ya que el costo del proyecto estructural resultó ser un 0.46% menor en comparación con ETABS. Este hallazgo sugiere que ROBOT S.A.P. podría ofrecer una opción más rentable en ciertos escenarios, sin comprometer la calidad del diseño estructural (Alvarado Espinoza, 2021).

Poma De La Cruz (2019) centró su tesis en el análisis no lineal estático tipo Pushover para pórticos planos de concreto armado con secciones rectangulares esbeltas bajo cargas laterales incrementales. Para este propósito, desarrolló el programa AMAP 2D utilizando Microsoft Excel 2010, con macros habilitadas y Visual Basic for Applications (VBA). Este programa proporciona herramientas para generar la curva de capacidad de la estructura y analizar el mecanismo de falla frente a cargas incrementales, lo cual es crucial para evaluar la respuesta sísmica y la capacidad de resistencia de los pórticos. La metodología empleada en esta tesis ofrece una aproximación práctica para el análisis de estructuras sísmicas, mejorando la comprensión de su comportamiento bajo condiciones de carga extremas.

Huaraca Ramos (2018) llevó a cabo una investigación centrada en la comparación del

comportamiento estructural de viviendas autoconstruidas en el distrito de Pucará, Huancayo. Utilizando los programas Robot Structural Analysis y ETABS, su estudio reveló que ambas viviendas presentaban un comportamiento estructural deficiente que no cumplía con los requisitos establecidos por la normativa peruana. Este estudio subraya la importancia de aplicar prácticas de diseño y construcción adecuadas para garantizar la seguridad y estabilidad de las viviendas, especialmente en áreas propensas a fenómenos sísmicos. La investigación también destacó la necesidad de mejorar las técnicas de construcción y los conocimientos técnicos en el sector de la autoconstrucción.

Pérez Martínez realizó una investigación comparativa entre los programas ETABS y CypeCAD, así como el método clásico, en el diseño de edificios de concreto armado de cuatro niveles en Carapongo Chosica. La investigación siguió el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) y otras normativas pertinentes. El estudio concluyó que CypeCAD ofrecía ventajas significativas en términos de herramientas avanzadas y rapidez en el modelamiento, mientras que ETABS proporcionaba una metodología más directa para obtener los diseños estructurales. Esta comparación resalta cómo diferentes herramientas de software pueden influir en la eficiencia del diseño estructural y en la calidad de los resultados obtenidos. La investigación de Pérez Martínez también pone en evidencia la importancia de seleccionar la herramienta adecuada en función de las necesidades específicas del proyecto y los requisitos normativos (Briones Sánchez, 2019).

En conjunto, estas investigaciones destacan el impacto de los programas de análisis estructural en la práctica del diseño, la eficiencia económica, y la calidad de los proyectos estructurales. Cada estudio aporta una perspectiva única sobre cómo las herramientas de software y los enfoques metodológicos pueden mejorar la precisión, la seguridad y la rentabilidad en el diseño estructural.

### III. JUSTIFICACIÓN

Guatemala es un país situado en una región de alta sismicidad, lo que hace necesario garantizar que las edificaciones diseñadas cumplan con estrictos requisitos de seguridad estructural. Los terremotos ocurridos en el pasado han demostrado la vulnerabilidad de muchas construcciones, lo que ha causado daños significativos y la pérdida de vidas humanas. Por ello, el diseño sismorresistente de edificaciones es una prioridad para ingenieros y planificadores urbanos.

Uno de los aspectos clave en el diseño sísmico es la evaluación de las derivas de entrepiso, ya que estas están directamente relacionadas con la estabilidad de las estructuras y el confort de los ocupantes. Si las derivas superan los límites normativos, se corre el riesgo de generar fallas estructurales graves o daños irreparables en la edificación. En particular, las derivas son influenciadas de manera significativa por las condiciones del suelo sobre el cual se construye la estructura. Guatemala presenta una diversidad geotécnica que abarca desde suelos blandos hasta suelos más rígidos, lo que puede modificar considerablemente el comportamiento sísmico de las edificaciones.

A pesar de la relevancia de este factor, no siempre se realizan estudios exhaustivos que contemplen cómo las diferentes tipologías de suelo impactan en el comportamiento estructural bajo cargas sísmicas. Por ello, esta investigación busca llenar ese vacío al analizar las derivas de un edificio de 5 niveles bajo tres condiciones típicas de suelo en Guatemala, clasificadas como tipo B (roca), tipo C (suelo intermedio) y tipo D (suelo blando) según la normativa sísmica vigente.

El uso del software ETABS para esta evaluación es otra justificación importante, ya que es una herramienta avanzada que permite modelar de manera precisa la respuesta de una estructura ante cargas dinámicas y estáticas. Su capacidad para realizar análisis modales y espectrales ofrece resultados confiables que pueden ser comparados con los límites normativos establecidos.

Este estudio no solo contribuirá al diseño óptimo de edificaciones en zonas sísmicas de Guatemala, sino que también proporcionará información valiosa para profesionales en el campo de la Ingeniería Civil, mejorando la planificación y construcción de estructuras seguras. Adicionalmente, se espera que los resultados de esta investigación puedan ser utilizados como referencia para futuras normativas y estudios en el área del diseño estructural sismorresistente.

## **IV. OBJETIVOS**

### **A. Objetivo general**

Evaluar el comportamiento de las derivas de un edificio de 5 niveles en diferentes tipologías de suelo en Guatemala, utilizando el software ETABS, con el fin de determinar si estas cumplen con los límites establecidos por la normativa sísmica local.

### **B. Objetivos específicos**

- Modelar un edificio de 5 niveles en el software ETABS y realizar análisis estructurales bajo diferentes escenarios sísmicos, de acuerdo con la clasificación de suelos establecida en el NSE.
- Determinar las derivas de entrepiso para cada nivel del edificio bajo tres tipologías de suelo: tipo B (roca), tipo C (suelo intermedio) y tipo D (suelo blando).
- Comparar los resultados obtenidos para cada tipología de suelo con los límites de desplazamiento lateral permitidos por la normativa guatemalteca, con el objetivo de identificar las variaciones en el comportamiento estructural.
- Analizar la influencia de las características geotécnicas del suelo en las derivas del edificio, con énfasis en cómo los suelos blandos afectan el comportamiento sísmico en comparación con suelos más rígidos.

## v. ALCANCE

El presente estudio tiene como objetivo principal evaluar las derivas laterales de un edificio de 5 niveles, modelado en el software ETABS, bajo diferentes condiciones de suelo representativas de las tipologías geotécnicas más comunes en Guatemala.

El alcance de esta investigación se detalla a continuación:

- El análisis se centrará en la respuesta estructural de un edificio de 5 niveles, cuya tipología constructiva se basa en un sistema de marcos dúctiles de concreto reforzado.
- Se considerarán tres tipologías de suelo: tipo B (roca), tipo C (suelo intermedio) y tipo D (suelo blando), basadas en las clasificaciones de suelos establecidas por el Reglamento Sísmico de Guatemala.
- El análisis se realizará utilizando el software ETABS, que permite la simulación de estructuras bajo cargas sísmicas aplicadas de acuerdo con los espectros de respuesta para cada tipología de suelo.
- Se calcularán las derivas de entrepiso para cada nivel del edificio bajo las condiciones de suelo mencionadas, con el fin de comparar los resultados y evaluar el cumplimiento con los límites establecidos por la normativa local.
- Los resultados del análisis incluirán gráficas y tablas comparativas que muestren las derivas obtenidas para los diferentes escenarios de suelo, así como la interpretación de estos resultados para fines de diseño sismorresistente.
- Esta investigación se limitará a analizar las derivas laterales en un solo edificio representativo, sin incluir aspectos como variaciones en materiales, efectos térmicos, impacto del viento o posibles cambios en las características estructurales del edificio.

Con este alcance, se espera que los resultados obtenidos contribuyan al diseño estructural sismorresistente de edificaciones en Guatemala, proporcionando una mejor comprensión del comportamiento de las estructuras en función de las condiciones del suelo y permitiendo la optimización de diseños para mejorar la seguridad sísmica.

## VI. MARCO TEÓRICO

### A. Sistemas constructivos de concreto reforzado

Los fundamentos de ingeniería estructural son los pilares de la disciplina, centrados en la concepción, diseño y análisis de estructuras resistentes y seguras. Estos fundamentos incluyen la comprensión profunda de las propiedades de los materiales de construcción, la aplicación de principios de mecánica estructural para calcular cargas y deformaciones, y la consideración de códigos de construcción y normativas para garantizar la seguridad. Además, se utilizan herramientas matemáticas y software de análisis para crear diseños eficientes y duraderos, teniendo en cuenta la resistencia a la compresión, tracción y flexión de los materiales. Estos fundamentos son esenciales para asegurar la estabilidad y el rendimiento de las estructuras en diversos entornos y aplicaciones (Lamus y Andrade, 2015).

**1. Propiedades del concreto reforzado.** El concreto reforzado es un material ampliamente utilizado en la construcción debido a su resistencia a la compresión variable según las necesidades, su durabilidad y resistencia a la corrosión. Además, se mejora su capacidad para soportar cargas de tracción mediante barras de acero de refuerzo, haciéndolo adecuado para flexión y cargas de corte. También ofrece propiedades aislantes, tanto térmicas como acústicas, lo que contribuye a la eficiencia energética y comodidad en edificios. Su versatilidad y adaptabilidad a diversas aplicaciones lo convierten en un material esencial en la construcción.

**2. Propiedades mecánicas del concreto.** Las propiedades mecánicas del concreto son esenciales en su desempeño estructural. La resistencia a la compresión es una propiedad clave y se refiere a la capacidad del concreto para soportar cargas que lo comprimen. La resistencia a la tracción es más limitada y se mejora mediante el uso de acero de refuerzo. La flexión es una propiedad importante que determina la capacidad del concreto para resistir cargas que inducen curvatura. La tenacidad es vital en situaciones de carga cíclica o sísmica y se relaciona con la capacidad de absorber energía antes de la falla (Lamus y Andrade, 2015).

La resistencia a la compresión es una de las principales propiedades mecánicas del concreto. Esta se define como la capacidad del concreto para soportar cargas de compresión sin fallar. La resistencia a la compresión del concreto se evalúa mediante pruebas estándar en cilindros o cubos de concreto, normalmente después de 28 días de curado, y se expresa en términos de MPa (mega pascales) o psi (libras por pulgada cuadrada) (Lamus y Andrade, 2015).

La resistencia a la compresión está influenciada por diversos factores, tales como:

- La relación agua/cemento.

- La calidad y proporción de los agregados.
- El tipo de cemento utilizado.
- Las condiciones de curado.

Un concreto típico de uso estructural presenta resistencias a la compresión entre 20 MPa y 50 MPa, aunque en aplicaciones especiales puede alcanzar valores superiores.

El concreto, por naturaleza, es débil a la tracción. Sin embargo, cuando se refuerza con barras de acero o mallas de alambre, su capacidad para resistir esfuerzos de tracción aumenta considerablemente. La resistencia a la tracción del concreto se puede evaluar a través de ensayos de tracción indirecta, como el ensayo de resistencia a la tracción o el ensayo de flexión (módulo de ruptura) (Lamus y Andrade, 2015).

A pesar de la adición de refuerzo, la resistencia a la tracción del concreto suele ser aproximadamente del 10 % al 15 % de su resistencia a la compresión, lo que explica la necesidad de incluir acero de refuerzo en elementos estructurales que estén sometidos a fuerzas de tracción significativas.

El módulo de elasticidad del concreto es una medida de su rigidez, es decir, de su capacidad para deformarse elásticamente bajo una carga aplicada. El módulo de elasticidad está relacionado directamente con la resistencia a la compresión del concreto; un concreto con mayor resistencia generalmente tiene un mayor módulo de elasticidad (Lamus y Andrade, 2015).

El módulo de elasticidad se puede expresar mediante la siguiente relación aproximada, según varias normas internacionales:

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c}$$

donde  $E_c$  es el módulo de elasticidad en MPa, y  $f'_c$  es la resistencia a la compresión del concreto en MPa.

El módulo de elasticidad del concreto suele variar entre 20 GPa y 40 GPa, dependiendo de la resistencia del concreto y de los materiales utilizados en la mezcla.

Aunque el concreto por sí solo es un material frágil, la inclusión del acero de refuerzo confiere al concreto reforzado una ductilidad significativa. La ductilidad es la capacidad del material para deformarse plásticamente antes de la rotura, lo que permite que las estructuras de concreto reforzado resistan grandes deformaciones sin colapsar repentinamente (Lamus y Andrade, 2015).

El acero de refuerzo absorbe las tensiones de tracción y redistribuye las cargas en el concreto, lo que permite a la estructura resistir mejor cargas dinámicas o imprevistas, como sismos o sobrecargas puntuales. Esta propiedad es crucial en el diseño de elementos estructurales, ya que una estructura dúctil tiene un mayor margen de seguridad frente a fallas.

La deformación por fluencia es la tendencia del concreto a deformarse gradualmente bajo cargas sostenidas en el tiempo. Aunque el acero de refuerzo ayuda a limitar las

deformaciones, el concreto reforzado aún experimenta fluencia, lo que puede influir en el comportamiento a largo plazo de las estructuras (Lamus y Andrade, 2015).

La magnitud de la fluencia depende de factores como:

- La duración de la carga.
- El nivel de esfuerzo aplicado.
- La edad del concreto en el momento de la aplicación de la carga.
- Las condiciones ambientales, como la humedad y temperatura.

Las deformaciones por fluencia deben considerarse en el diseño, especialmente en elementos sometidos a cargas permanentes, como columnas y vigas de grandes luces.

La durabilidad es fundamental, ya que se refiere a la capacidad del concreto para resistir condiciones ambientales adversas, como la exposición a la humedad y la corrosión. La densidad y la porosidad son propiedades que influyen en la capacidad de aislamiento térmico y acústico del concreto. Estas propiedades mecánicas son cruciales en el diseño y la construcción de estructuras seguras y eficientes (Cormac y Brown, 2018).

**3. Comportamiento bajo cargas estáticas y dinámicas.** El comportamiento de las estructuras bajo cargas estáticas y dinámicas es crítico en ingeniería estructural. Las cargas estáticas, como las fuerzas gravitatorias, son constantes y predecibles, y el análisis estático garantiza la estabilidad a lo largo del tiempo. Las cargas dinámicas, como sismos o vientos fuertes, implican fluctuaciones en el tiempo, y el análisis dinámico considera la respuesta de la estructura a diferentes frecuencias y la capacidad de amortiguación. El diseño estructural debe abordar ambas cargas para garantizar seguridad y capacidad de respuesta ante situaciones predecibles e impredecibles. El análisis y evaluación de este comportamiento son esenciales para la integridad y confiabilidad de las construcciones (Cormac y Brown, 2018).

Las cargas estáticas son aquellas que se aplican gradualmente y permanecen constantes o varían lentamente con el tiempo. Ejemplos comunes de cargas estáticas incluyen el peso propio de la estructura, cargas debidas a elementos permanentes (muros, techos, equipos fijos) y cargas vivas que cambian de forma lenta o se consideran permanentes (mobiliario, personas, etc.).

Bajo cargas estáticas, el concreto reforzado experimenta un comportamiento elástico y, en algunos casos, inelástico, dependiendo de la magnitud de la carga y de la relación entre el esfuerzo aplicado y la resistencia del material. En la fase elástica, tanto el concreto como el acero se deforman de manera proporcional a las cargas aplicadas, y las deformaciones regresan a su estado original una vez que las cargas son removidas (Deulofeu, 2019).

Sin embargo, cuando las cargas superan ciertos límites, el concreto puede comenzar a agrietarse en las zonas de tracción, momento en el cual el acero de refuerzo comienza a absorber la mayor parte de las tensiones de tracción. La respuesta del concreto reforzado bajo cargas estáticas incluye los siguientes comportamientos clave:

- **Fase elástica:** donde las deformaciones son proporcionales a las cargas aplicadas.
- **Aparición de grietas:** cuando las tensiones de tracción en el concreto superan su resistencia, se generan grietas, pero el acero de refuerzo mantiene la integridad estructural.
- **Comportamiento plástico:** bajo cargas mayores, el acero se deforma plásticamente y la estructura puede desarrollar grandes deformaciones antes del colapso.

El diseño de estructuras de concreto reforzado bajo cargas estáticas se basa en la teoría del análisis límite, garantizando que la estructura mantenga su capacidad portante incluso en presencia de deformaciones y fisuras controladas.

Las cargas dinámicas son aquellas que varían con el tiempo y que generalmente se caracterizan por la aplicación de fuerzas rápidas o repentinas. Estas cargas incluyen fenómenos como terremotos, ráfagas de viento, tráfico vehicular, explosiones o impactos accidentales. A diferencia de las cargas estáticas, las cargas dinámicas generan aceleraciones en la estructura, lo que puede dar lugar a vibraciones y comportamientos complejos en los materiales (Ardila Bothia, 2014).

El comportamiento del concreto reforzado bajo cargas dinámicas es más complejo que bajo cargas estáticas debido a los efectos de inercia, amortiguamiento y resonancia. La respuesta dinámica de una estructura de concreto reforzado depende de diversos factores, como su rigidez, masa, características de amortiguamiento y la frecuencia de la carga aplicada.

Algunas características importantes del comportamiento dinámico del concreto reforzado incluyen:

- **Resonancia:** si la frecuencia de la carga dinámica coincide con la frecuencia natural de la estructura, puede ocurrir un fenómeno de resonancia, lo que incrementa las amplitudes de vibración y puede generar daños significativos.
- **Capacidad de disipación de energía:** el concreto reforzado tiene una capacidad limitada para disipar energía debido a su naturaleza frágil. Sin embargo, el acero de refuerzo proporciona una mejora en la disipación de energía durante eventos dinámicos, como sismos.
- **Comportamiento no lineal:** bajo cargas dinámicas extremas, como terremotos, el comportamiento del concreto reforzado es no lineal, debido al agrietamiento del concreto y la plasticidad del acero de refuerzo.

Las estructuras sometidas a cargas dinámicas deben diseñarse para soportar tanto las tensiones directas como las tensiones inducidas por las aceleraciones. En el caso de sismos, el diseño sismorresistente tiene como objetivo dotar a la estructura de suficiente ductilidad y capacidad de disipación de energía para evitar el colapso catastrófico.

**4. Diseño sismorresistente.** Uno de los principales retos en el diseño de concreto

reforzado bajo cargas dinámicas es el diseño sismorresistente. Los terremotos generan aceleraciones y fuerzas laterales que pueden inducir grandes deformaciones en los elementos estructurales. Para garantizar la seguridad de una estructura durante un sismo, el concreto reforzado debe cumplir con ciertas condiciones:

- **Ductilidad:** la capacidad de los elementos de deformarse sin perder su capacidad de carga.
- **Capacidad de disipación de energía:** el uso de refuerzos y detalles constructivos que permitan a la estructura disipar energía sin colapsar.
- **Redundancia estructural:** diseñar la estructura para que la carga se redistribuya en caso de fallos localizados.

El concreto reforzado tiene una alta capacidad para soportar cargas sísmicas cuando se detalla adecuadamente con acero de refuerzo para garantizar el confinamiento del concreto, la adecuada conexión entre elementos y la capacidad de desarrollar mecanismos de disipación de energía (Suesca, 2007).

El diseño sismorresistente en Guatemala está regulado por AGIES, el cual establece los lineamientos y criterios para asegurar que las edificaciones puedan soportar los efectos de los sismos sin sufrir daños estructurales graves. Este reglamento se basa en normativas internacionales, como las del (ACI) y el (IBC), pero adaptadas a las condiciones específicas del país (Villagrán de León et al.,2020).

Algunos de los aspectos clave que abarca la normativa guatemalteca incluyen:

- **Espectro de respuesta sísmica:** el reglamento establece un espectro de respuesta sísmica que varía según la ubicación geográfica de la estructura, considerando las zonas sísmicas en las que se divide el país.
- **Criterios de diseño por desempeño:** Se incluyen criterios para que las estructuras no solo soporten cargas sísmicas, sino que además limiten el daño estructural en distintos niveles de intensidad sísmica.
- **Detallado estructural:** la normativa incluye requisitos específicos para el detallado de los elementos de concreto reforzado, como vigas, columnas y losas, para asegurar que las estructuras puedan disipar energía y evitar el colapso durante un sismo.

La ductilidad es una de las propiedades más importantes en el diseño sismorresistente de concreto reforzado. Se refiere a la capacidad de una estructura de deformarse de manera significativa sin perder su capacidad de soportar cargas. En el contexto de Guatemala, donde los terremotos pueden generar grandes desplazamientos laterales en las estructuras, es fundamental que los edificios de concreto reforzado tengan un comportamiento dúctil, lo que permite que absorban y disipen energía sísmica sin colapsar de manera repentina.

El diseño sismorresistente de concreto reforzado en Guatemala contempla la inclusión de detalles constructivos que incrementan la ductilidad, tales como:

- **Confinamiento de concreto en columnas y vigas:** el uso de estribos cerrados o confinados en las zonas críticas de las columnas y vigas ayuda a aumentar la capacidad de absorción de energía.
- **Refuerzo transversal adecuado:** para prevenir el pandeo de las barras de refuerzo longitudinales y garantizar que las secciones de concreto mantengan su integridad bajo deformaciones importantes.

La capacidad de una estructura de concreto reforzado para disipar energía es esencial en el contexto de los sismos. El concreto, al ser un material frágil, tiene una capacidad limitada para disipar energía por sí solo; sin embargo, el acero de refuerzo proporciona una mayor capacidad de disipación mediante el desarrollo de deformaciones plásticas en el acero.

El diseño sismorresistente en Guatemala considera:

- **Refuerzo adecuado de las conexiones:** las conexiones entre elementos estructurales, como las uniones viga-columna, deben ser reforzadas para garantizar que puedan soportar las tensiones inducidas por las cargas sísmicas sin romperse.
- **Comportamiento inelástico controlado:** el diseño debe prever la localización de posibles mecanismos de falla plástica en las vigas, de manera que las columnas mantengan su capacidad estructural, evitando un colapso global.

El comportamiento sísmico de una estructura depende en gran medida de su ubicación geográfica, debido a las diferencias en la actividad sísmica regional. Guatemala se divide en varias zonas sísmicas de acuerdo con el nivel de riesgo, que varía desde zonas de alta actividad sísmica, como la costa sur y la Ciudad de Guatemala, hasta zonas de riesgo sísmico moderado o bajo en el norte del país (Barillas et al., 2018).

Espectros de diseño para diferentes zonas sísmicas

El reglamento sísmico guatemalteco define diferentes espectros de diseño según la zona sísmica en que se encuentre el proyecto. Estos espectros están basados en estudios de peligrosidad sísmica y tienen en cuenta tanto la cercanía a fallas geológicas como la calidad del suelo. En las zonas de mayor riesgo, se requieren coeficientes de diseño sísmico más elevados, lo que implica estructuras más robustas y con mayor capacidad de disipación de energía.

El análisis modal espectral es uno de los métodos más utilizados en el diseño sismorresistente de concreto reforzado en Guatemala. Este tipo de análisis permite estimar las respuestas dinámicas de una estructura ante un sismo, tomando en cuenta la distribución de masas, rigidez y amortiguamiento. A través de este método, se puede evaluar el comportamiento de las estructuras en términos de desplazamientos, fuerzas internas y momentos flectores bajo cargas sísmicas (Lamus y Andrade, 2015).

El diseño por capacidad es un enfoque ampliamente utilizado en la ingeniería sismorresistente de Guatemala. Consiste en diseñar los elementos estructurales de manera

que los mecanismos de falla ocurran en las zonas controladas, permitiendo que la estructura en su conjunto mantenga su estabilidad. Esto implica:

- **Diseño de vigas más flexibles que las columnas:** con el fin de garantizar que las columnas no colapsen antes que las vigas.
- **Sobre resistencia de elementos críticos:** para evitar el colapso prematuro de elementos clave que comprometerían la estabilidad global de la estructura.

A pesar de los avances en el diseño sismorresistente en Guatemala, aún existen varios desafíos, especialmente en la implementación de las normativas en áreas rurales y en edificaciones informales. Además, el cambio climático y el desarrollo urbano están modificando las condiciones de riesgo sísmico en muchas áreas, lo que requiere una actualización constante de las prácticas de diseño y la normativa aplicable (Moreno, 2022).

La investigación futura debe centrarse en:

- **Mejora de los modelos de peligrosidad sísmica:** Incorporando datos más recientes y análisis detallados del comportamiento de los suelos.
- **Sistemas de construcción más eficientes:** Que optimicen el uso de materiales y técnicas que mejoren la resistencia sísmica, especialmente en proyectos de bajo costo.

**5. Normativas y códigos de diseño.** Las normativas y códigos de diseño son un componente esencial en la ingeniería estructural, ya que establecen estándares y pautas que garantizan la seguridad y confiabilidad de las construcciones. Estas normativas varían según el país y la región, y su cumplimiento es obligatorio en la mayoría de las jurisdicciones. Los códigos de diseño abarcan aspectos diversos, como la resistencia de materiales, cargas de diseño, diseño sísmico, vientos, temperaturas extremas y otros factores ambientales. También incluyen criterios para la calidad de materiales de construcción y métodos de construcción (Villagrán de León et al., 2020); (Barillas et al., 2018).

El cumplimiento de estas normativas y códigos es esencial para garantizar que las estructuras sean seguras y cumplan con los estándares de calidad. Los ingenieros estructurales deben ser expertos en la interpretación y aplicación de estas regulaciones en sus diseños, asegurando que las construcciones sean seguras y estén en conformidad con las leyes y regulaciones locales. El incumplimiento de estas normativas puede resultar en consecuencias legales y riesgos para la seguridad pública, lo que subraya la importancia crítica de su aplicación.

Algunas de las normativas y códigos de diseño ampliamente reconocidos incluyen:

- Normas ASTM (American Society for Testing and Materials): establecen estándares para materiales de construcción, pruebas y métodos de ensayo.
- Código Internacional de Construcción (IBC): utilizado en los Estados Unidos, abarca regulaciones de construcción y seguridad para edificios.
- Euro códigos: aplicados en países europeos, proporcionan directrices para el diseño estructural y consideran factores como cargas, materiales y seguridad.
- Código Sísmico Internacional (IBC): dirigido a la resistencia de estructuras ante sismos, es esencial en áreas sísmicas.
- Código de Construcción de Hormigón Armado ACI (American Concrete Institute): se enfoca en el diseño y construcción de estructuras de concreto.
- Normas ISO (Organización Internacional de Normalización): ofrecen estándares globales en varios aspectos, incluyendo calidad de materiales.
- Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (AGIES): es una organización en Guatemala dedicada a promover y desarrollar la ingeniería estructural y sísmica. Su enfoque incluye actividades de investigación, educación y capacitación en el ámbito de la resistencia de las estructuras a sismos y otros riesgos naturales. AGIES desempeña un papel importante en la promoción de prácticas seguras de construcción y la difusión de conocimientos en ingeniería estructural, particularmente en áreas propensas a terremotos.

## **B. Software de ingeniería estructural**

El software de ingeniería estructural es una herramienta crítica en el campo, permitiendo el análisis y diseño preciso de estructuras. Estas soluciones informáticas, como Etabs, SAP2000 y Midas Gen, ofrecen capacidades avanzadas para modelar, simular y evaluar el comportamiento de edificios y puentes. Su funcionalidad incluye análisis estático y dinámico, diseño de elementos estructurales, y consideraciones de cargas sísmicas y gravitatorias. Además, estos programas proporcionan una interfaz intuitiva y visual, facilitando la creación de modelos detallados. Su utilidad radica en la eficiencia, precisión y capacidad de optimizar el uso de materiales, lo que es fundamental para proyectos de ingeniería estructural exitosos (Briones Sánchez, 2019).

**1. Introducción a software de ingeniería estructural.** La introducción al software de ingeniería estructural es fundamental en la construcción moderna. Estas herramientas computacionales son vitales para el diseño, análisis y modelado de estructuras, permitiendo a los ingenieros abordar proyectos de construcción de manera eficiente y precisa. El software de ingeniería estructural, como Etabs, Midas, SAP2000 y otros, se utiliza para el análisis estático y dinámico, la optimización de diseño y la evaluación de la seguridad estructural, lo que es esencial para garantizar la seguridad y eficiencia de los proyectos (Briones Sánchez, 2019).

En cuanto a la importancia del software en la ingeniería estructural, este desempeña un

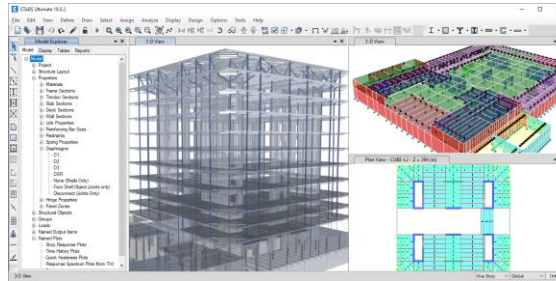
papel clave en la construcción moderna al permitir diseños y análisis precisos y eficientes. Facilita la simulación de cargas estáticas y dinámicas, optimiza los diseños y asegura el cumplimiento de las regulaciones, lo que mejora la calidad del diseño y reduce errores, resultando en estructuras más seguras y eficientes. En resumen, el software de ingeniería estructural es un recurso invaluable en este campo (Briones Sánchez, 2018).

**2. Etabs: características y capacidades.** ETABS es una herramienta esencial en la ingeniería estructural, ampliamente usada en la construcción. Sus características clave incluyen análisis estáticos y dinámicos, modelado 3D detallado, optimización de diseños, análisis pushover para resistencia sísmica y cumplimiento de códigos internacionales. También permite generar informes detallados. Es apreciado por su versatilidad en proyectos complejos.

El modelado y análisis estructural en ETABS comienza con la creación de un modelo 3D, asignación de propiedades y cargas, simulación de condiciones de borde y análisis estáticos y dinámicos para evaluar la respuesta estructural.

El diseño de concreto reforzado con ETABS implica modelado tridimensional, definición de materiales, aplicación de cargas y combinaciones, cálculo y verificación de elementos de concreto reforzado, y generación de resultados detallados. ETABS simplifica este proceso, garantizando la seguridad y eficiencia de las estructuras (Briones Sánchez, 2018).

- **Enfoque en estructuras de edificios:** ETABS está diseñado específicamente para el análisis y diseño de edificios y estructuras verticales.
- **Interfaz gráfica intuitiva:** su interfaz facilita la creación de modelos con planos de piso, lo que permite una fácil visualización de las estructuras.
- **Análisis estructural:** soporta análisis dinámico, estático y no lineal, incluyendo análisis por espectro de respuesta, carga sísmica, viento y empuje del suelo.
- **Diseño de elementos:** ETABS permite el diseño de elementos de concreto, acero y otros materiales estructurales conforme a diversas normas internacionales.
- **Cálculo y diseño automatizado:** ofrece diseño automatizado de vigas, columnas, muros de cortante y losas.
- **Integración con BIM:** se puede integrar con herramientas de modelado de información de construcción (BIM), como Revit.



*Figura 1. Interfaz ETABS*

### **C. Diseño de estructuras de concreto reforzado**

El diseño de estructuras de concreto reforzado es un proceso esencial en la Ingeniería Civil. Involucra la creación de elementos como vigas, columnas y losas que resistirán cargas y deformaciones. Este proceso se basa en comprender las propiedades del concreto y del acero de refuerzo, así como en seguir códigos de diseño y regulaciones específicas. Se lleva a cabo un análisis estructural para calcular cargas y tensiones, y se modela la estructura en software especializado para evaluar su comportamiento. La optimización del diseño se centra en lograr eficiencia y economía de materiales sin comprometer la seguridad (Cormac y Brown, 2018).

**1. Metodologías de diseño de concreto reforzado.** El diseño de concreto reforzado implica la aplicación de metodologías específicas que garantizan la seguridad y eficiencia de las estructuras. Algunos enfoques clave incluyen:

- **Método de estado límite:** establece límites para la capacidad de carga de la estructura bajo condiciones extremas.
- **Método de resistencia de materiales:** se enfoca en el análisis de esfuerzos y deformaciones para asegurar que los materiales cumplan con estándares de seguridad.
- **Diseño basado en normativas:** las regulaciones de construcción y códigos locales establecen estándares de seguridad a seguir.
- **Diseño basado en rendimiento:** evalúa el rendimiento esperado de la estructura bajo diferentes cargas y condiciones.

La elección de la metodología depende de factores como las normativas locales, la naturaleza del proyecto y las preferencias del ingeniero. La combinación de estas metodologías garantiza un diseño seguro y eficiente en diversas aplicaciones de la Ingeniería Civil.

El diseño de elementos estructurales en Ingeniería Civil y estructural abarca la creación de componentes clave, como vigas, columnas, losas y cimientos. Comienza considerando las cargas y reacciones que afectan estos elementos y selecciona materiales apropiados,

como concreto reforzado o acero. Las dimensiones y la disposición del refuerzo se determinan para cumplir con la capacidad de carga requerida. Se debe seguir los códigos de construcción y realizar un análisis de estabilidad para garantizar que los elementos sean seguros y eficientes (Villagrán de León et al., 2020).

Los requisitos de durabilidad y seguridad son esenciales para la integridad a largo plazo de las estructuras. La durabilidad se refiere a la resistencia al deterioro por exposición a factores como la intemperie, ciclos de congelación y descongelación, corrosión y cargas cíclicas. La seguridad estructural implica cumplir con códigos y regulaciones que establecen estándares de seguridad, asegurando que la estructura pueda soportar cargas previstas, como sismos, vientos y tráfico, sin riesgo de colapso. En áreas propensas a desastres naturales, las estructuras deben resistir estas amenazas.

El mantenimiento preventivo, inspecciones regulares y reparaciones oportunas son cruciales para la durabilidad. También es esencial considerar factores ambientales y asegurar la calidad de la construcción. En conjunto, estos requisitos garantizan la seguridad y eficiencia de las estructuras, protegiendo tanto la vida humana como la inversión en infraestructura (Briones Sánchez, 2018).

**2. Análisis estructural en software.** El análisis estructural en software es esencial en la Ingeniería Civil y estructural, utilizando programas especializados para evaluar el comportamiento de estructuras bajo diversas condiciones y cargas, como las gravitatorias, sísmicas y de viento. Esto implica métodos matemáticos, como el método de elementos finitos, que permiten modelar con precisión el comportamiento de la estructura y calcular parámetros críticos como esfuerzos, desplazamientos y deformaciones. El análisis en software también facilita la optimización de diseños, identificación de áreas débiles y toma de decisiones informadas para mejorar la seguridad y el rendimiento de las estructuras.

En cuanto a los métodos de análisis en software, se emplean diversos enfoques matemáticos, como el método de elementos finitos, el método matricial, el análisis dinámico y el método de empuje de tierra para evaluar el comportamiento de las estructuras bajo diferentes condiciones y cargas. Estos métodos permiten un análisis preciso de las estructuras en diversas aplicaciones (Hibbeler, 2012).

La comparación de resultados y métodos de verificación es esencial en la ingeniería estructural. Esto involucra validar la precisión de los análisis y diseños estructurales mediante la comparación de resultados de diferentes enfoques o software. La validación experimental, la comparación con normativas y códigos de diseño son prácticas importantes para garantizar la seguridad y eficiencia de las estructuras y detectar posibles errores en los resultados (Briones Sánchez, 2018).

**3. Modelado de estructuras en software.** El modelado de estructuras en software es una parte fundamental de la ingeniería estructural, permitiendo una representación detallada y precisa de las construcciones en entornos virtuales. Se logra mediante la creación de modelos computacionales que describen la geometría, materiales y conexiones de la estructura, lo que es esencial para el análisis de esfuerzos y deformaciones bajo

diversas condiciones, como cargas gravitatorias, sísmicas o de viento. Además, el modelado facilita la optimización del diseño y la identificación de áreas críticas para garantizar la seguridad y eficiencia de las estructuras (Peña Mondragón, 2010).

En ETABS se utilizan técnicas de modelado como elementos finitos y mallas tridimensionales para representar con precisión las estructuras. Esto incluye la definición de propiedades materiales y secciones transversales, así como la consideración de conexiones y restricciones de apoyo. Estas técnicas brindan a los ingenieros herramientas poderosas para análisis y diseño eficientes y seguros.

La importancia de un modelado preciso en ingeniería estructural se refleja en su papel en la toma de decisiones críticas en el diseño y análisis. Un modelado exacto garantiza seguridad, eficiencia, cumplimiento normativo, evaluación de riesgos y reducción de costos. En programas como ETABS, un modelado preciso es esencial para obtener resultados confiables y tomar decisiones informadas en la ingeniería estructural (Martín, 2021).

**4. Optimización de diseño en software.** La optimización de diseño en ingeniería estructural es esencial para mejorar la eficiencia y el rendimiento de las estructuras mediante ajustes de variables como dimensiones de elementos y materiales. Esto se logra a través de algoritmos y análisis iterativos con el objetivo de minimizar costos o maximizar la capacidad de carga, garantizando estructuras seguras y rentables que cumplan con normativas y limitaciones de materiales (Trejo Carvajal, 2018).

El uso de software para la optimización permite a los ingenieros explorar una amplia gama de diseños y variables, acelerando el proceso de diseño y ofreciendo resultados más precisos. Esto es fundamental en la ingeniería moderna para abordar desafíos de diseño complejos y cumplir con las demandas de eficiencia y sostenibilidad en la construcción de infraestructuras.

La economía de materiales en estructuras de concreto reforzado se enfoca en optimizar el uso de materiales, como concreto y acero, para minimizar costos sin comprometer la seguridad y el rendimiento. Esto implica la selección adecuada de propiedades y dimensiones de elementos para cumplir con las cargas de diseño, reduciendo el desperdicio y promoviendo la sostenibilidad. Este enfoque es crucial para lograr estructuras rentables y sostenibles en la Ingeniería Civil (Dorta et al., 2014).

**5. Análisis avanzado en software.** El análisis avanzado en software de ingeniería estructural es fundamental para evaluar la integridad y el comportamiento de estructuras en situaciones extremas. Esto incluye el análisis no lineal, que considera deformaciones grandes, material no lineal y carga inusual, y el análisis dinámico para evaluar respuestas ante cargas sísmicas. Además, se emplean técnicas avanzadas como el método de elementos finitos para lograr una modelización detallada. Estas técnicas son vitales en proyectos de ingeniería avanzada y construcciones críticas (De la Cruz, 2019).

El análisis no lineal en software permite abordar no linealidades en materiales y cargas, lo que es esencial en situaciones como terremotos o impactos. Permite una comprensión precisa del rendimiento estructural y la identificación de puntos críticos de falla (Briones Sánchez,

2018).

El análisis dinámico en software se utiliza para evaluar respuestas ante cargas cíclicas o impulsos, como sismos y vientos. Facilita la previsión del comportamiento estructural en eventos sísmicos, el diseño de sistemas de amortiguación y la comprensión de oscilaciones y aceleraciones. El modelado de vibraciones y movimientos sísmicos es esencial para entender y predecir cómo las estructuras reaccionan a cargas dinámicas, contribuyendo a la construcción de estructuras más seguras y resistentes a terremotos.(Huaraca Ramos, 2018).

#### **D. Futuro de la ingeniería estructural y tendencias**

El futuro de la ingeniería estructural se vislumbra marcado por tendencias y avances notables. La integración de tecnologías BIM (modelado de información de construcción) está revolucionando la forma en que se planifican y ejecutan proyectos, permitiendo una colaboración más eficiente y una gestión de datos más completa. Las simulaciones avanzadas y el análisis no lineal están ganando relevancia, permitiendo un mejor entendimiento del comportamiento estructural bajo condiciones extremas (Moreno, 2022).

La inteligencia artificial y el aprendizaje automático están siendo aplicados para la predicción y optimización de diseños, mejorando la eficiencia y reduciendo costos. Finalmente, el enfoque en la sostenibilidad y la construcción ecológica es una tendencia dominante, impulsando diseños más respetuosos con el medio ambiente. Estas tendencias apuntan a un futuro emocionante y desafiante para la ingeniería estructural, que requiere una adaptación continua a las tecnologías emergentes y las preocupaciones medioambientales (Acuña, 2022).

1. **Tendencias actuales en ingeniería estructural.** Las tendencias actuales en ingeniería estructural reflejan una evolución constante hacia diseños más eficientes, sostenibles y seguros. La incorporación de tecnologías de vanguardia, como el modelado de información de construcción (BIM), la inteligencia artificial y la computación en la nube, están transformando la forma en que se abordan los proyectos de construcción (Acuña, 2022).

La sostenibilidad es una tendencia dominante, con un enfoque en el diseño de estructuras amigables con el medio ambiente y la reducción de emisiones de carbono. Además, la resiliencia ante desastres naturales se ha convertido en un aspecto crítico, con un énfasis en la resistencia sísmica y la capacidad de recuperación. La prefabricación y la construcción modular están ganando terreno, acelerando los plazos de construcción y mejorando la calidad. La utilización de materiales avanzados, como concretos de alto rendimiento y materiales compuestos, también es una tendencia importante en la búsqueda de estructuras más duraderas y eficientes (Moreno, 2022).

2. **Sostenibilidad y construcción ecológica.** La sostenibilidad y la construcción ecológica son componentes fundamentales de la ingeniería estructural contemporánea, con un enfoque creciente en la reducción del impacto ambiental y la promoción de prácticas amigables con el entorno. Esto implica la adopción de diseños y materiales que minimizan

el consumo de recursos naturales y reducen las emisiones de carbono a lo largo del ciclo de vida de una estructura (Ramírez, 2002).

La utilización de materiales reciclados, la optimización de la eficiencia energética y el diseño de sistemas de agua sostenibles son ejemplos de estrategias sostenibles. Además, la construcción ecológica promueve la adaptación a los entornos naturales y la integración de espacios verdes y áreas de hábitat en proyectos de construcción. Esta tendencia refleja la creciente conciencia de la importancia de mitigar el cambio climático y preservar los recursos naturales, lo que tiene un impacto positivo tanto en la sociedad como en el entorno (Lobera y Michelutti, 2007).

**3. Simulaciones y análisis avanzados.** La ingeniería estructural contemporánea se centra en áreas clave como la simulación dinámica y estudios de vibraciones, que son esenciales para comprender y mitigar los efectos de cargas dinámicas como sismos y vientos. Estos estudios permiten la evaluación de la seguridad y la comodidad de las estructuras, así como el diseño de sistemas de amortiguación y aislamiento sísmico para mejorar la resiliencia de las edificaciones (Briones Sánchez, 2018).

El análisis no lineal y el modelado avanzado son fundamentales en la ingeniería estructural actual, permitiendo una representación precisa del comportamiento estructural en situaciones extremas, como sismos o cargas de viento intensas. Estas herramientas son cruciales para el diseño y análisis de estructuras modernas, como rascacielos y puentes de alta complejidad.

El futuro de la ingeniería estructural implicará una mayor integración de tecnologías innovadoras, como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, para optimizar estructuras de manera eficiente y precisa. La sostenibilidad seguirá siendo un enfoque central, con estructuras diseñadas para reducir su impacto ambiental. La construcción modular y la prefabricación se generalizarán para acelerar proyectos y mejorar la calidad. Además, se esperan avances en materiales, como concretos de alto rendimiento y materiales compuestos, que ofrecerán estructuras más resistentes y duraderas.

La inteligencia artificial y el machine learning están teniendo un impacto significativo en la ingeniería estructural al permitir la optimización de diseños, análisis de riesgo precisos y una toma de decisiones mejorada. Estas tecnologías modelan el comportamiento estructural en situaciones de carga dinámica y evalúan la respuesta en tiempo real ante eventos sísmicos o de viento. Además, el machine learning se emplea para predecir el comportamiento de materiales y estructuras, influyendo en la selección de materiales y métodos de construcción más eficientes (Alvarado Lemolle, 2008).

Los desarrollos en modelado de información de construcción (BIM) están transformando la ingeniería estructural al proporcionar una plataforma colaborativa y digital para el diseño, construcción y gestión de proyectos. BIM mejora la coordinación y comunicación entre equipos, reduce errores y retrasos, y facilita la gestión del ciclo de vida de las estructuras, desde el diseño hasta el mantenimiento y renovación, contribuyendo a la eficiencia y sostenibilidad en proyectos de construcción (Trejo Carvajal, 2018).

## **E. Herramientas informáticas y su aporte a la Ingeniería Civil**

En la ingeniería estructural, la verificación experimental y la calibración de software son procesos fundamentales para garantizar la precisión de los modelos y resultados. La verificación experimental implica comparar las predicciones del software con mediciones reales en laboratorios o en campo, lo que valida la capacidad del software para representar con precisión el comportamiento de las estructuras. Por otro lado, la calibración ajusta los parámetros del software para que los resultados se alineen más estrechamente con los datos experimentales, mejorando así la confiabilidad del software en situaciones prácticas (Briones Sánchez, 2018).

La calibración de modelos y parámetros en el software implica el ajuste de los parámetros del modelo, como rigidez, resistencia y amortiguación, para que coincidan con los datos experimentales, lo que mejora la precisión en el análisis estructural. Estos procesos son fundamentales para garantizar la seguridad y eficiencia de las estructuras en diversas aplicaciones, desde edificios hasta puentes y estructuras civiles complejas, y se benefician de la tecnología moderna para una interacción más efectiva entre el software y los datos experimentales (De la Cruz, 2019).

**1. Usabilidad y experiencia del usuario.** La usabilidad y la experiencia del usuario son esenciales en el software de ingeniería estructural. La usabilidad se refiere a la facilidad de aprender y utilizar el software, incluyendo la eficiencia y la claridad de la interfaz. La experiencia del usuario se centra en la satisfacción general, la personalización y la interacción intuitiva (Huaraca Ramos, 2018).

Una interfaz bien diseñada y una usabilidad adecuada permiten a los ingenieros trabajar de manera efectiva en el diseño y análisis. El diseño de la interfaz debe ser intuitivo, con herramientas de fácil acceso. La retroalimentación de los usuarios y las pruebas son cruciales para evaluar y mejorar la usabilidad.

La curva de aprendizaje y el entrenamiento son igual de importantes. Una curva de aprendizaje suave y un sólido soporte de entrenamiento, que incluye manuales y tutoriales, aceleran la familiarización de los usuarios con el software. Esto es fundamental para aplicar el software de manera efectiva en proyectos reales (Alvarado Lemolle, 2008).

La formación cubre desde conceptos básicos hasta técnicas avanzadas, asegurando que los ingenieros comprendan completamente las capacidades del software y puedan aplicarlas en proyectos de análisis y diseño estructural. En resumen, la usabilidad, la experiencia del usuario y la formación son factores críticos en el uso exitoso del software de ingeniería estructural.

**2. Evaluación de rendimiento y eficiencia.** La evaluación de rendimiento y eficiencia en ingeniería estructural es vital y abarca la medición de la velocidad y capacidad de

respuesta del software, así como la economía de materiales. Esto impacta en la duración, costos y sostenibilidad de proyectos de construcción (Briones Sánchez, 2018).

La eficiencia en el tiempo de procesamiento es crucial, con avances tecnológicos como la optimización de algoritmos que permiten análisis más rápidos y toma de decisiones eficientes. Evaluar la velocidad de procesamiento en software como Etabs es esencial para proyectos grandes. La optimización de cálculos y la obtención de resultados rápidos mejoran la productividad, especialmente en proyectos con plazos ajustados.

La economía de materiales y la sostenibilidad buscan un uso eficiente de recursos, reduciendo el impacto ambiental. La consideración de la sostenibilidad es esencial para cumplir con regulaciones y reducir la huella ecológica. Estos aspectos son fundamentales en la ingeniería estructural contemporánea (Briones Sánchez, 2019).

**3. BIM y modelado de información de construcción.** El uso de building information modeling (BIM) en proyectos de ingeniería estructural es fundamental para mejorar el proceso de diseño y análisis. BIM facilita la colaboración entre arquitectos, ingenieros y constructores en un entorno compartido, lo que mejora la comunicación y la resolución de problemas. Además, permite el diseño integrado en 3D, lo que proporciona una representación precisa de la estructura y permite una toma de decisiones informada (Alcántara Rojas, 2013); (Hurtado, 2015).

La integración con software de análisis estructural permite realizar cálculos en tiempo real y evaluar múltiples escenarios de carga de manera eficiente. BIM centraliza la información del proyecto para una gestión de datos más sencilla y actualización de diseños en todas las etapas del proyecto. También permite la visualización 4D y 5D, lo que implica la creación de secuencias temporales y análisis de costos para evaluar la planificación y presupuestos del proyecto. Además, los detalles constructivos generados a partir de modelos BIM mejoran la precisión de la construcción y reducen errores en el sitio (Trejo Carvajal, 2018); (Dorta et al., 2014).

#### 4. Integración de BIM con software de análisis.

- **Interoperabilidad:** BIM permite la transferencia fluida de datos entre el modelo 3D y el software de análisis, evitando la reentrada manual de información y reduciendo errores.
- **Modelado preciso:** los modelos BIM contienen detalles precisos de la geometría y las propiedades de los elementos estructurales, lo que es fundamental para el análisis.

Actualización en Tiempo Real: cualquier modificación en el modelo BIM se refleja instantáneamente en el software de análisis, lo que agiliza el proceso de diseño y evaluación.

- **Análisis multidisciplinario:** la integración de BIM con software estructural permite considerar las interacciones entre arquitectura y estructura.

- **Evaluación de cargas:** los datos de cargas y cargas sísmicas se importan automáticamente desde el modelo BIM al software de análisis.
  - **Optimización del diseño:** la combinación de BIM y software de análisis brinda la capacidad de evaluar diferentes escenarios de diseño y determinar la solución más eficiente.
  - **Generación de informes:** los resultados de análisis se pueden vincular nuevamente al modelo BIM, lo que facilita la generación de informes y la comunicación con partes interesadas.
5. **Aplicaciones de drones y escaneo 3D en la inspección de obras.** Los drones desempeñan un papel fundamental en la construcción de proyectos de concreto reforzado. Permiten una inspección visual detallada de la obra, documentan el progreso, generan modelos precisos de la topografía, detectan errores de construcción, verifican la calidad del trabajo y mejoran la seguridad. Además, contribuyen a la planificación logística y reducen los costos en comparación con las inspecciones manuales (Herrera et al., 2012); (Puerta, 2015); (Salas Rojas, 2022).
6. **Captura de datos en tiempo real en el campo de construcción.** La captura de datos en tiempo real en el campo de construcción es crucial y se logra mediante sensores y dispositivos conectados en la obra. Esto permite supervisar las condiciones del sitio constantemente y detectar problemas o anomalías tempranamente, respaldando decisiones informadas, optimizando recursos y reduciendo riesgos. Además, genera un registro histórico valioso y facilita la automatización de informes (Puerta, 2015).

## F. Cálculo de derivas para una edificación

El cálculo de derivas es un aspecto crucial en el diseño sísmico de edificaciones. La deriva interpiso se refiere al desplazamiento lateral relativo entre dos niveles consecutivos de una estructura, y su control es esencial para evitar daños estructurales y no estructurales, especialmente en áreas sísmicas (Villagrán de León et al., 2020).

## G. Definición de deriva inter piso

La deriva inter piso se define como la relación entre el desplazamiento lateral relativo de dos pisos consecutivos y la altura de entrepiso correspondiente:

$$\delta_i = \frac{\Delta_i - \Delta_{i-1}}{h_i}$$

donde:

- $\delta_i$  es la deriva inter piso en el nivel  $i$ .
- $\Delta_i$  es el desplazamiento lateral absoluto en el nivel  $i$ .
- $\Delta_{i-1}$  es el desplazamiento lateral absoluto en el nivel inferior ( $i - 1$ ).
- $h_i$  es la altura entre pisos en el nivel  $i$ .

Las normativas internacionales, como ASCE/SEI 7-22, y las normativas locales establecen límites permisibles para la deriva inter piso con el fin de proteger tanto la estructura como los elementos no estructurales. Generalmente, estos límites varían entre el 1 % y el 2 % de la altura de entrepiso, dependiendo del tipo de edificación y su uso (Villagrán de León et al., 2020).

## H. Método de cálculo

El cálculo de derivas sigue un procedimiento que implica los siguientes pasos:

- **Modelado estructural:** se modela la estructura en un software de análisis estructural como ETABS, definiendo las propiedades de los materiales y las secciones de los elementos estructurales.
- **Asignación de cargas:** se aplican las cargas gravitacionales y laterales, tales como el peso propio, cargas vivas y cargas sísmicas, según el espectro de diseño sísmico de la zona.
- **Análisis de desplazamientos:** mediante un análisis estático o dinámico, se obtienen los desplazamientos laterales absolutos en cada nivel de la estructura.
- **Cálculo de derivas:** con los desplazamientos obtenidos, se calculan las derivas inter piso utilizando la fórmula previamente descrita.
- **Verificación con normativas:** los resultados se comparan con los límites permisibles establecidos por las normativas para asegurar que la estructura cumple con los requisitos de seguridad.

## I. Derivas permisibles según AGIES 2018

La normativa AGIES 2018 (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica) establece límites específicos para las derivas inter piso en edificaciones con el objetivo de asegurar la estabilidad estructural y limitar los daños en elementos no estructurales durante un evento sísmico. El control de las derivas es crucial para garantizar

la seguridad y funcionalidad de las construcciones en áreas de alta actividad sísmica, como Guatemala (Villagrán de León et al., 2020).

## J. Límites de deriva, según AGIES 2018

La normativa AGIES 2018 establece que las derivas inter piso deben limitarse al 2 % de la altura de entrepiso para edificaciones comunes. Este límite se reduce al 1 % en el caso de edificaciones que contengan elementos no estructurales frágiles o que puedan ser particularmente vulnerables a los desplazamientos laterales (Villagrán de León et al., 2020).

$$\delta_{\text{máx}} = 0.02 \times h_i \text{ para edificaciones comunes}$$

$$\delta_{\text{máx}} = 0.01 \times h_i \text{ para edificaciones con elementos no estructurales frágiles}$$

## K. Verificación de derivas

El cálculo de derivas se realiza obteniendo los desplazamientos laterales absolutos mediante un análisis estructural estático o dinámico, y comparando las derivas calculadas con los límites permisibles establecidos por la normativa. Si las derivas exceden estos límites, es necesario ajustar el diseño estructural para mejorar la rigidez o modificar el sistema estructural (Villagrán de León et al., 2020).

## L. Tipos de suelo, según AGIES NSE 2018

La normativa AGIES NSE 2018 clasifica los tipos de suelo en función de sus características geotécnicas, las cuales influyen en la respuesta sísmica de una edificación. La correcta identificación del tipo de suelo es esencial para aplicar los coeficientes sísmicos adecuados en el diseño estructural (Villagrán de León et al., 2020).

**1. Clasificación de Tipos de Suelo.** AGIES NSE 2018 clasifica los suelos en cinco categorías principales, basadas en la velocidad promedio de propagación de ondas de corte, la resistencia del suelo y su perfil estratigráfico:

- **Suelo Tipo A:** roca dura con una velocidad promedio de ondas de corte mayor a 1500 m/s. Proporciona una buena respuesta sísmica con amplificaciones mínimas.
- **Suelo Tipo B:** roca blanda o suelo muy denso con una velocidad de ondas de corte entre 760 m/s y 1500 m/s. Proporciona una respuesta sísmica moderada.
- **Suelo Tipo C:** suelo denso o rocas muy fracturadas con una velocidad de ondas de corte entre 360 m/s y 760 m/s. Este tipo de suelo presenta amplificación sísmica moderada.
- **Suelo Tipo D:** suelo blando con una velocidad de ondas de corte entre 180 m/s y 360 m/s. Los suelos tipo D tienen una alta amplificación de las ondas sísmicas.

- **Suelo Tipo E:** suelo muy blando con una velocidad de ondas de corte menor a 180 m/s. Es el tipo de suelo más vulnerable, con una alta amplificación sísmica y grandes deformaciones (Barillas et al., 2018).

**2. Importancia de la clasificación.** La clasificación del tipo de suelo afecta directamente la selección del espectro de diseño sísmico. Los suelos más blandos (tipos D y E) requieren un diseño estructural más conservador, ya que amplifican significativamente las aceleraciones sísmicas y aumentan las deformaciones laterales (Barillas et al., 2018).

## M. Espectro de respuesta utilizado para la determinación de derivas y parámetros de aceleración espectral

El espectro de respuesta sísmica es una herramienta fundamental en el diseño sísmico, utilizada para evaluar la respuesta de una estructura ante un sismo. La normativa AGIES NSE 2018 establece los parámetros para la construcción del espectro de respuesta en función de la aceleración espectral, el tipo de suelo y las características sísmicas de la región. Este espectro se utiliza en el cálculo de derivas y fuerzas internas en edificaciones (Barillas et al., 2018).

## N. Parámetros de aceleración espectral

Según AGIES NSE 2018, el espectro de respuesta se define por los siguientes parámetros de aceleración espectral (Villagrán de León et al., 2020):

- **Aceleración espectral máxima en corto período ( $S_s$ ):** representa la aceleración máxima del terreno en el período corto ( $T \leq 0.2$  s). Su valor depende de la zona sísmica y del tipo de suelo.
- **Aceleración espectral en 1 segundo ( $S_1$ ):** representa la aceleración espectral en un período de 1 segundo. Se utiliza para definir la respuesta estructural en períodos largos.
- **Coefficientes de modificación del suelo ( $F_a$  y  $F_v$ ):** ajustan los valores de  $S_s$  y  $S_1$  según el tipo de suelo de la edificación (A, B, C, D o E). Estos coeficientes modifican la amplificación sísmica esperada en función de las características del suelo.

## Ñ. Construcción del espectro de respuesta

El espectro de respuesta se construye a partir de los siguientes pasos:

- 1) **Determinación de  $S_s$  y  $S_1$ :** se obtienen los valores de aceleración espectral para el

sitio, según las cartas sísmicas proporcionadas por la normativa.

- 2) **Aplicación de coeficientes de suelo:** se ajustan los valores de  $S_s$  y  $S_1$  mediante los coeficientes  $F_a$  y  $F_v$ , basados en la clasificación del tipo de suelo.
- 3) **Espectro elástico:** el espectro se define en tres zonas: zona de aceleración constante, zona de velocidad constante y zona de desplazamiento constante, según el período estructural ( $T$ ).

## O. Determinación de derivas

El espectro de respuesta generado permite calcular las fuerzas sísmicas en la estructura, lo que a su vez permite determinar los desplazamientos laterales y las derivas inter piso. Las derivas resultantes deben ser comparadas con los límites permisibles establecidos en AGIES NSE 2018 para asegurar la seguridad estructural (Villagrán de León et al., 2020).

## P. Cargas de diseño para edificaciones

El diseño estructural de edificaciones debe considerar diversas cargas que actúan sobre la estructura, tanto permanentes como transitorias. La normativa AGIES NSE 2018, enfocada en la sismicidad en Guatemala, y ACI 318-19, normativa internacional para el diseño de concreto reforzado, definen los criterios y combinaciones de cargas para garantizar la seguridad y funcionalidad de las edificaciones (Villagrán de León et al., 2020).

## Q. Cargas de diseño, según AGIES NSE 2018

AGIES NSE 2018 establece los siguientes tipos de cargas para edificaciones:

- **Cargas muertas ( $D$ ):** peso propio de los elementos estructurales y no estructurales permanentes.
- **Cargas vivas ( $L$ ):** cargas temporales impuestas por la ocupación o uso del edificio.
- **Cargas de viento ( $W$ ):** fuerzas horizontales producidas por el viento, especialmente importantes en edificaciones altas.
- **Cargas sísmicas ( $E$ ):** fuerzas inerciales generadas por la aceleración sísmica, calculadas con base en el espectro de diseño sísmico del sitio (Villagrán de León et al., 2020).

## R. Cargas de diseño según ACI 318-19

ACI 318-19 también considera cargas adicionales relevantes para el diseño en concreto reforzado:

- **Cargas de Nieve ( $S$ ):** Cargas verticales debidas a la acumulación de nieve, cuando aplique.
- **Cargas de Impacto ( $I$ ):** Cargas dinámicas generadas por equipos en movimiento o golpes en la estructura.

## S. Combinaciones de carga

Las combinaciones de carga, que integran diferentes tipos de cargas, se utilizan para asegurar que la estructura pueda resistir tanto condiciones de carga normales como extremas. AGIES NSE 2018 y ACI 318-19 recomiendan las siguientes combinaciones típicas:

- $1.4D$  (solo cargas muertas).
- $1.2D + 1.6L + 0.5(L_r \text{ o } S \text{ o } W)$  (combinación de cargas vivas y otras cargas transitorias).
- $1.2D + 1.0E + L + 0.2S$  (combinación de cargas sísmicas).

## T. Factor de importancia $i$

El factor de importancia  $I$  es un parámetro que se utiliza para ajustar las fuerzas de diseño de una edificación según su relevancia o el riesgo asociado a su falla. Según AGIES NSE 2018, este factor tiene como objetivo garantizar mayor seguridad en edificaciones críticas o de alta ocupación en caso de sismo, viento u otras acciones naturales (Villagrán de León et al., 2020).

- **Definición del factor de importancia:** el valor del factor de importancia  $I$  depende del tipo y función de la estructura:
- **Edificaciones esenciales:** incluyen hospitales, estaciones de bomberos, plantas de energía, entre otros. Para estas edificaciones,  $I = 1.5$ , debido a su importancia para la respuesta ante emergencias.
- **Edificaciones de ocupación alta:** aquellas con gran concentración de personas, como estadios o centros comerciales. En este caso,  $I = 1.25$ .
- **Edificaciones comunes:** edificios residenciales o comerciales sin una función crítica. Para estas estructuras,  $I = 1.0$ .
- **Aplicación del factor de importancia:** el factor de importancia se aplica multiplicando las fuerzas sísmicas o de viento obtenidas en el análisis estructural por el valor correspondiente de  $I$ . Esto garantiza que las edificaciones más críticas

sean diseñadas con mayores márgenes de seguridad, reduciendo el riesgo de fallos estructurales (Villagrán de León et al., 2020).

## U. Factor de modificación de respuesta $R$ para edificaciones de concreto

El factor de modificación de respuesta  $R$  es un parámetro que reduce las fuerzas sísmicas en el diseño estructural al considerar la capacidad de disipación de energía mediante deformaciones inelásticas en una estructura. Según AGIES NSE 2018, el valor de  $R$  varía según el tipo de sistema estructural y el material utilizado, y es fundamental en el diseño de edificaciones de concreto reforzado (Villagrán de León et al., 2020).

- **Definición del factor  $R$ :** para edificaciones de concreto reforzado, el valor del factor de modificación de respuesta  $R$  depende del sistema estructural y de su capacidad de disipación de energía:
- **Marcos a momento de concreto especial:**  $R = 8$ . Estos sistemas están diseñados para deformarse significativamente sin pérdida de resistencia.
- **Marcos a momento de concreto intermedio:**  $R = 5$ . Tienen una capacidad de disipación de energía moderada, pero menor que los sistemas especiales.
- **Sistemas de muros estructurales de concreto:**  $R = 5$  a  $6$ . Los sistemas de muros estructurales dependen del grado de confinamiento y ductilidad.
- **Sistemas duales (marcos + muros):**  $R = 7$ . Combinan marcos a momento y muros estructurales para mejorar la resistencia sísmica.
- **Aplicación del factor  $R$ :** el valor de  $R$  se utiliza para dividir las fuerzas sísmicas elásticas obtenidas en el análisis estructural, con el fin de reflejar el comportamiento inelástico real de la estructura durante un sismo. A mayor valor de  $R$ , mayor es la capacidad de disipación de energía de la estructura, lo que permite diseñar con menores fuerzas sísmicas.

## V. Factor de escala

El factor de escala es un coeficiente utilizado para ajustar las fuerzas obtenidas en el análisis dinámico de edificaciones de concreto. Su objetivo es garantizar que las fuerzas sísmicas calculadas no sean inferiores a un porcentaje mínimo de las fuerzas determinadas en el análisis estático equivalente, conforme a las especificaciones de AGIES NSE 2018 (Villagrán de León et al., 2020).

**Definición del factor de escala.** En el diseño estructural de edificaciones de concreto, el factor de escala se aplica en análisis dinámicos para garantizar la coherencia con los resultados del análisis estático:

- Las fuerzas sísmicas obtenidas mediante análisis dinámico deben ser comparadas

con las del análisis estático equivalente.

- Si las fuerzas dinámicas resultan inferiores al 85 % de las fuerzas estáticas, se aplica un factor de escala para aumentar las fuerzas dinámicas hasta alcanzar dicho umbral.
- El factor de escala se aplica multiplicando las fuerzas obtenidas del análisis dinámico por un coeficiente tal que las fuerzas escaladas no sean menores al 85 % de las obtenidas por el método estático. Esta corrección asegura que las edificaciones mantengan un nivel de seguridad adecuado frente a la acción sísmica.

## VII. METODOLOGÍA

### A. Recopilación de datos

**1. Diseño de concreto reforzado.** El diseño de concreto reforzado es uno de los pilares fundamentales en la Ingeniería Civil y estructural. Este proceso consiste en la planificación, análisis y cálculo de estructuras construidas principalmente de concreto, que, para mejorar su capacidad de resistir esfuerzos y deformaciones, incorpora refuerzos de acero en forma de barras o mallas. El refuerzo permite que el concreto, que es fuerte en compresión, pero débil en tensión, pueda absorber de manera eficiente las tensiones que se presentan debido a las cargas impuestas.

El diseño de concreto reforzado es esencial para garantizar la estabilidad, seguridad y durabilidad de las estructuras, como edificios, puentes, presas y otras infraestructuras, frente a las cargas a las que estarán sometidas a lo largo de su vida útil. Estas cargas incluyen fuerzas de compresión, tensión, corte y flexión, las cuales deben ser correctamente distribuidas y soportadas por el sistema estructural.

El proceso de diseño de concreto reforzado siguió una serie de pasos críticos:

- **Análisis de cargas:** en este paso se determinaron las cargas que actuarían sobre la estructura, lo cual fue crucial para garantizar su estabilidad. Las cargas se dividieron en dos categorías principales:
  - **Cargas permanentes:** fueron aquellas que actuaron continuamente sobre la estructura, como el peso propio de los elementos estructurales (vigas, columnas, losas) y de los acabados permanentes (como revestimientos, techos o equipos).
  - **Cargas variables:** estas cargas incluyeron aquellas que podían cambiar con el tiempo, como cargas vivas (personas, muebles, vehículos), cargas climáticas (viento, nieve, lluvia) y cargas accidentales (impactos, explosiones).

Cargas muertas sin consideración de peso propio		
Piso cerámico y pega	50	kg/m <sup>2</sup>
Instalaciones	10	kg/m <sup>2</sup>
Tabiques	150	kg/m <sup>2</sup>
Cielo Falso	15	kg/m <sup>2</sup>
Sistema de AC	15	kg/m <sup>2</sup>
Mobiliario y equipo fijo	20	kg/m <sup>2</sup>
Total	260	kg/m <sup>2</sup>

Figura 2. Integración de cargas muertas

Cargas vivas		
Habitaciones	200	kg/m <sup>2</sup>
Areas públicas	500	kg/m <sup>2</sup>
Pasillos	500	kg/m <sup>2</sup>

*Figura 3. Cargas vivas*

- **Selección de materiales:** este paso involucró la elección de los materiales que se utilizaron para construir la estructura. Para el concreto, se seleccionaron diferentes clases en función de su resistencia a la compresión, su durabilidad y su comportamiento frente a los agentes agresivos del ambiente. Para el refuerzo de acero, fue necesario seleccionar un tipo que tuviera la capacidad adecuada para resistir las tensiones y que cumpliera con los estándares de ductilidad, resistencia a la corrosión y soldabilidad.
- **Diseño de secciones:** las secciones estructurales (vigas, columnas, losas, muros y cimentaciones) se diseñaron para que pudieran resistir de manera adecuada las cargas aplicadas. En el diseño de estas secciones, se determinó la geometría adecuada para garantizar la capacidad de carga requerida. Este proceso implicó el uso de principios de resistencia de materiales, como el método de los estados límite, para asegurar que la estructura soportara tanto las fuerzas internas como las deformaciones.
- **Diseño de armaduras:** se definió la cantidad, distribución y disposición de las barras de refuerzo de acero dentro de los elementos de concreto. El refuerzo debía ser capaz de soportar las fuerzas de tensión y cortante, especialmente en áreas críticas de la estructura, como las zonas de máximos momentos flectores. Además, el diseño previó suficiente recubrimiento de concreto para proteger las barras de la corrosión y asegurar su adherencia.
- **Verificación de cumplimiento de códigos y normativas:** fue imprescindible que todo diseño de concreto reforzado siguiera estrictamente las normativas vigentes, las cuales variaban dependiendo de la región y las condiciones específicas del proyecto. Entre las normativas más reconocidas se encontró el ACI 318, utilizado principalmente en Estados Unidos, que estableció requisitos detallados para el diseño y construcción de estructuras de concreto reforzado.

**E** Material Property Data ×

**General Data**

Material Name: 5000Psi

Material Type: Concrete

Directional Symmetry Type: Isotropic

Material Display Color:   Change...

Material Notes: Modify/Show Notes...

**Material Weight and Mass**

Specify Weight Density       Specify Mass Density

Weight per Unit Volume: 150 lb/ft<sup>3</sup>

Mass per Unit Volume: 4.662 lb-s<sup>2</sup>/ft<sup>4</sup>

**Mechanical Property Data**

Modulus of Elasticity, E: 4030508.7 lb/in<sup>2</sup>

Poisson's Ratio, U: 0.2

Coefficient of Thermal Expansion, A: 0.0000055 1/F

Shear Modulus, G: 1679378.63 lb/in<sup>2</sup>

**Design Property Data**

Modify/Show Material Property Design Data...

**Advanced Material Property Data**

Nonlinear Material Data...      Material Damping Properties...

Time Dependent Properties...

**Modulus of Rupture for Cracked Deflections**

Program Default (Based on Concrete Slab Design Code)

User Specified

OK      Cancel

*Figura 4. Propiedades del concreto*

Ancho L1	5	m
Largo L1	5	m
Espesor L1	12	cm

*Figura 5. Predimensionamiento losa*

VP1		80,00
Factor de altura	12	(Entre 9 y 12)
Factor de base	0,5	Entre (0,5 y 0,3)
Luz Libre	9,6	m
H viga recomendado	80	cm
B viga	40	cm

Figura 6. Predimensionamiento viga principal

VS1		68,57
Factor de altura	14	Recomendado 14
Factor de base	0,5	Entre (0,5 y 0,3)
Luz Libre	9,6	m
H viga recomendado	65	cm
B viga	30	cm

Figura 7. Predimensionamiento viga secundaria

Bajos	Altos		
0,31	0,34	0,8	m
0,43	0,48	0,8	m
0,53	0,59	0,8	m
0,61	0,68	0,8	m
0,69	0,76	0,8	m

Figura 8. Predimensionamiento columnas

**2. ACI 318-19.** El ACI 318-19 es la edición más reciente del American Concrete Institute (ACI) Building Code Requirements for Structural Concrete.<sup>o</sup> Requisitos del Código ACI para Concreto Estructural". Este conjunto de normas y regulaciones es utilizado extensamente en los Estados Unidos y a nivel internacional como guía para el diseño, análisis y construcción de estructuras de concreto reforzado.

El ACI 318-19 cubre aspectos cruciales del diseño estructural, que incluyen:

- Diseño de elementos estructurales como vigas, columnas, losas y muros.
- Procedimientos de diseño sísmico, para garantizar que las estructuras resistan de manera adecuada los efectos de los terremotos.
- Requisitos de durabilidad y protección contra agentes agresivos del ambiente, como

el agua, la humedad y agentes químicos.

- Consideraciones de seguridad contra incendios, que establecen las medidas que deben tomarse para evitar el colapso estructural durante incendios.

El cumplimiento del código ACI 318-19 asegura que las estructuras de concreto reforzado sean seguras, duraderas y capaces de soportar las condiciones extremas a las que puedan estar expuestas.

3. **Cargas sísmicas.** Las cargas sísmicas son un tipo especial de carga dinámica que actúa sobre una estructura durante un evento sísmico, es decir, un terremoto. Estas cargas se deben a la aceleración del terreno causada por el movimiento de las placas tectónicas y se caracterizan por ser fuerzas oscilatorias y cíclicas.

La magnitud de las cargas sísmicas que experimenta una estructura depende de diversos factores:

- **Intensidad del sismo:** la severidad del terremoto, medida comúnmente mediante escalas como la de Richter o la de magnitud momento (Mw).
- **Geografía:** la ubicación geográfica de la estructura, ya que áreas cercanas a fallas tectónicas tienden a sufrir terremotos más intensos.
- **Condiciones del terreno:** el tipo de suelo puede amplificar o atenuar las ondas sísmicas. Suelos blandos, por ejemplo, tienden a amplificar las vibraciones sísmicas.
- **Características de la estructura:** la masa, la altura, la rigidez y la configuración estructural afectan cómo responderá una estructura a un sismo. Las estructuras más flexibles pueden disipar mejor la energía sísmica.

Diseñar estructuras que puedan resistir estas fuerzas implica seguir los lineamientos de normativas específicas para el diseño sísmico, como el ACI y el ASCE 7 (Suesca, 2007).

4. **Cargas dinámicas.** Las cargas dinámicas son fuerzas que varían con el tiempo y que pueden provocar vibraciones o movimientos en las estructuras. Se diferencian de las cargas estáticas debido a su naturaleza variable y suelen ser más complejas de analizar debido a su comportamiento temporal. Las cargas dinámicas incluyen:

- **Cargas de viento:** el viento ejerce presión sobre la estructura, lo que puede generar fuerzas variables en función de la velocidad y dirección del viento.
- **Cargas de tráfico:** en puentes y carreteras, los vehículos en movimiento imponen cargas dinámicas.
- **Cargas de máquinas:** en estructuras industriales, el movimiento de equipos y maquinaria genera fuerzas dinámicas que deben considerarse en el diseño.

El análisis de las cargas dinámicas requiere el uso de métodos avanzados, como el análisis modal o el análisis en el dominio del tiempo (Ardila Bothia, 2014).

**5. Cargas estáticas.** Las cargas estáticas son aquellas que permanecen constantes o casi constantes en el tiempo. Estas fuerzas son más sencillas de analizar en comparación con las dinámicas, ya que no cambian su magnitud ni su dirección durante el tiempo.

Ejemplos de cargas estáticas incluyen:

- **Cargas muertas:** el peso de los materiales estructurales y no estructurales que forman parte de la edificación.
- **Cargas permanentes:** elementos que forman parte integral de la estructura, como muros divisorios o equipos fijos.

Estas cargas deben considerarse durante el diseño para garantizar que la estructura no experimente deflexiones excesivas o colapse bajo estas fuerzas (Álvarez-Deulofeu, 2019).

## **B. Ordenamiento y clasificación de información**

El proceso de organización y clasificación de la información fue fundamental para asegurar la correcta interpretación de los datos recopilados en la fase previa de la investigación. Este proceso buscó estructurar de manera clara y coherente los datos obtenidos, facilitando su análisis posterior.

En este sentido, se procedió a la creación de cuadros que abordaron aspectos críticos en el diseño de estructuras de concreto reforzado, como la evaluación de derivas, desplazamientos máximos, esfuerzos y deformaciones en las estructuras bajo condiciones de carga específicas.

**1. Categorización de la información.** Una vez recopilada la información, se procedió a ordenar y clasificar los datos de la siguiente manera:

- **Definición de tipologías de suelo:** la clasificación del tipo de suelo fue un paso esencial en el análisis estructural, ya que influyó directamente en la respuesta sísmica de las estructuras. Para este estudio, se clasificó la información geotécnica en tres categorías principales, de acuerdo con las normativas internacionales y locales:
  - **Suelo tipo B:** suelos de roca o suelo muy denso, con buena capacidad portante y baja deformabilidad.
  - **Suelo tipo C:** suelos medianamente densos o rígidos, donde se esperaban deformaciones moderadas bajo carga.
  - **Suelo tipo D:** suelos blandos o altamente deformables, donde la respuesta ante cargas sísmicas fue más severa y pudo amplificar los movimientos del terreno.

La correcta clasificación del tipo de suelo permitió ajustar los espectros de respuesta sísmica y definir los parámetros de carga en los modelos estructurales.

- **Definición de parámetros estructurales:** para cada modelo estructural, se documentaron las propiedades físicas y geométricas del edificio. Estas propiedades incluyeron:
  - Tipo de material principal (concreto reforzado 5000PSI con Acero tipo ASTM A706).
  - Dimensiones de los elementos estructurales (vigas, columnas, losas).
  - Configuración del sistema estructural (marcos, pórticos, sistemas duales, entre otros).
  - Propiedades de los materiales, como la resistencia a la compresión del concreto y la resistencia del acero de refuerzo.

Estos parámetros se organizaron en tablas para facilitar la comparación entre los diferentes modelos analizados en el programa de diseño.

- **Condiciones de carga:** un paso crítico en el análisis estructural fue la definición de las cargas que actuaron sobre la estructura, ya que influyó directamente en el comportamiento de esta. Se consideraron dos tipos principales de cargas:
  - **Cargas gravitacionales:** estas cargas incluyeron las cargas muertas (peso propio de la estructura y otros elementos fijos) y las cargas vivas (cargas variables debidas a la ocupación humana o a la disposición de mobiliario y equipo).
  - **Cargas sísmicas:** las cargas sísmicas se definieron de acuerdo con los espectros de diseño aplicables a cada tipo de suelo (tipos B, C y D). Estos espectros fueron específicos para cada región geográfica y determinaron la magnitud y distribución de las fuerzas que se esperaron en un evento sísmico.

La correcta determinación de estas cargas permitió evaluar el desempeño de la estructura ante situaciones extremas y asegurar el cumplimiento de los requerimientos normativos.

- **Modelo estructural:** a continuación, se procedió a la construcción de un modelo tridimensional del edificio en el software ETABS. Este modelo incluyó todos los elementos estructurales y se le asignaron los parámetros relevantes, como:
  - **Rigidez:** se determinó la rigidez de cada elemento estructural (vigas y columnas) para asegurar que el modelo fuera representativo de la realidad.
  - **Masa:** la masa del edificio fue un factor clave para el análisis dinámico, ya que influyó en la respuesta sísmica. Se distribuyó la masa de manera apropiada en cada nivel del edificio.
  - **Geometría:** se establecieron las dimensiones y la disposición espacial de todos los niveles del edificio, asegurando que el modelo fuera una réplica precisa de la estructura real.

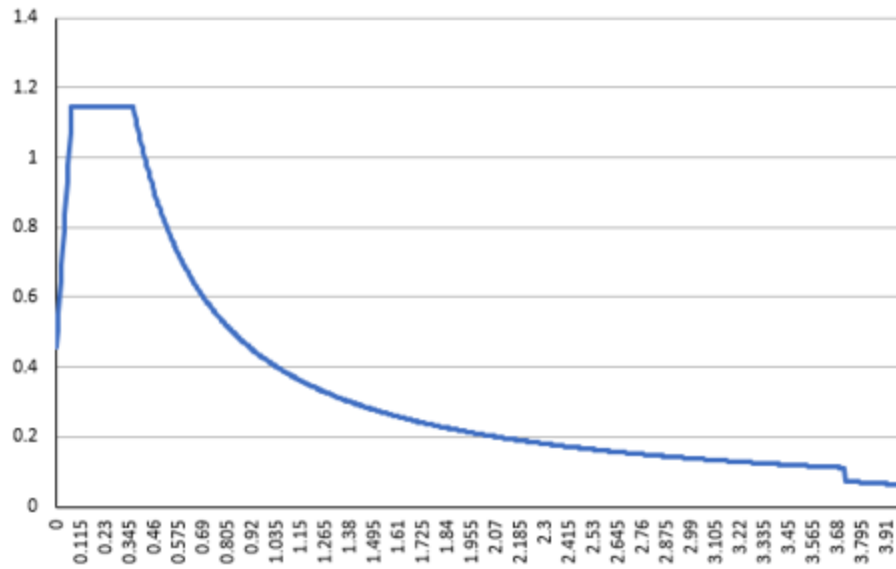


Figura 9. Espectro sísmico para Guatemala con clase de suelo tipo B

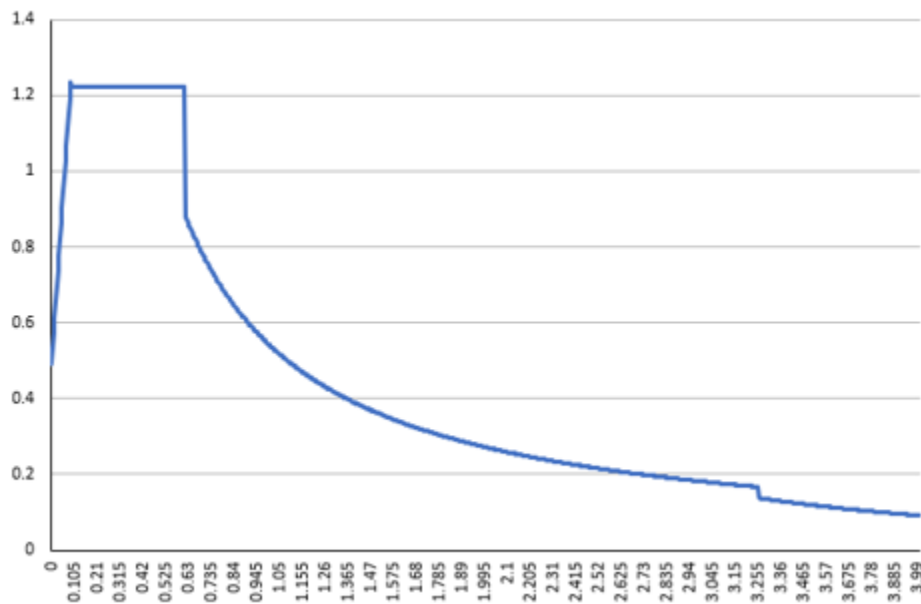


Figura 10. Espectro sísmico para Guatemala con clase de suelo tipo C

La creación del modelo tridimensional permitió analizar el comportamiento de la estructura bajo diferentes condiciones de carga.

## C. Diseño estructural

- 1. Modelado en ETABS.** El diseño de la estructura se basó en un edificio de marcos especiales a momento de 5 niveles, construido con concreto reforzado. El modelado estructural se llevó a cabo en el software ETABS, conocido por su precisión y capacidad para realizar análisis estático y dinámico de edificaciones. La estructura fue representada de manera tridimensional, lo que permitió simular con detalle el comportamiento de la edificación bajo diferentes condiciones de carga y las interacciones entre sus componentes estructurales.

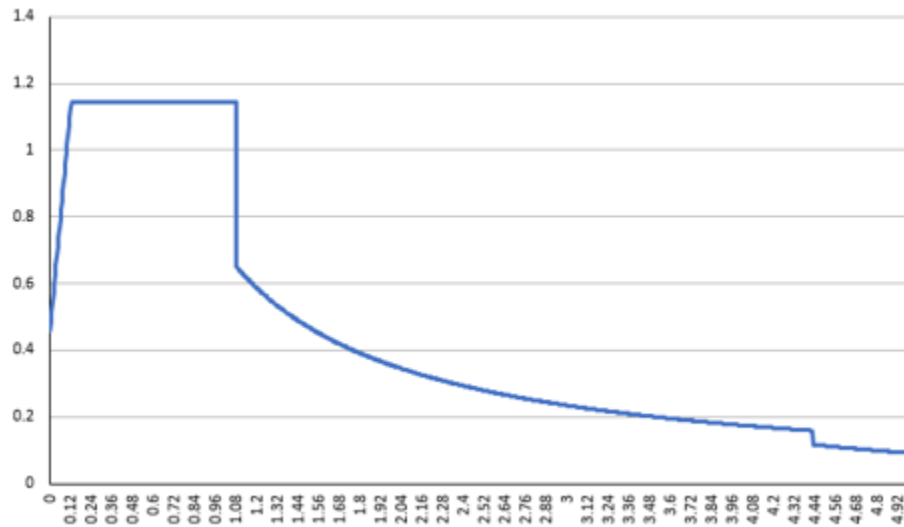


Figura 11. Espectro sísmico para Guatemala con clase de suelo tipo D

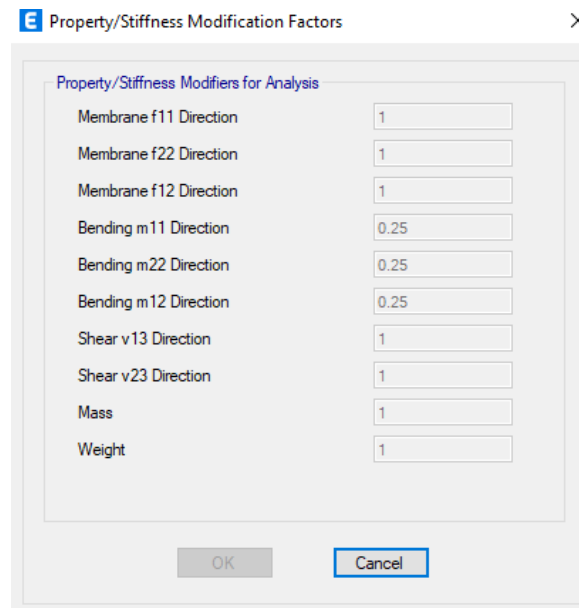


Figura 12. Modificadores de rigidez de losa

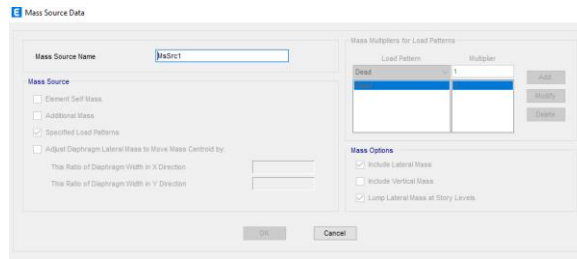


Figura 13. Asignación de masa al modelo de ETABS

2. **Definición de Elementos Estructurales.** Para el modelado, se procedió a la definición de los elementos estructurales principales:

- **Vigas:** se definieron como elementos flexibles horizontales encargados de soportar las cargas de la losa y transferirlas a las columnas. El diseño de las vigas se realizó siguiendo las especificaciones de la normativa guatemalteca, teniendo en cuenta las cargas de gravedad y sísmicas.



Figura 14. Viga secundaria

- **Columnas:** las columnas se modelaron como los principales elementos de soporte vertical de la estructura. Estas estuvieron sometidas a cargas axiales combinadas con momentos flexionantes, debido a su participación en el sistema de marcos a momento. Se garantizó que las columnas cumplieran con los requisitos de resistencia y ductilidad establecidos por las normas sismorresistentes.
- **Losas:** las losas de entrepiso fueron modeladas como elementos rígidos, encargadas de distribuir las cargas a las vigas y garantizar la estabilidad del sistema. El diseño de las

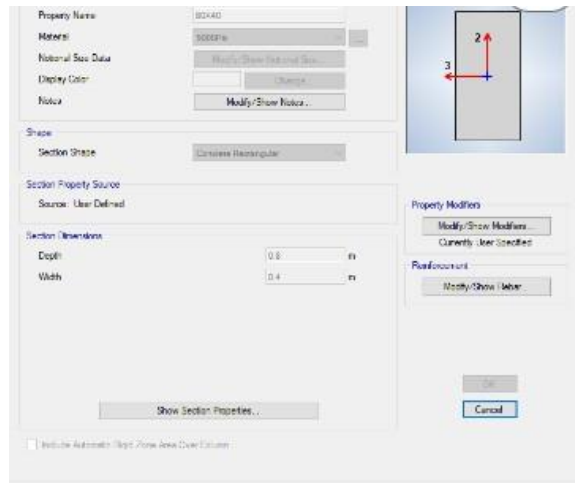


Figura 15. Viga principal



Figura 16. Columna de borde y central

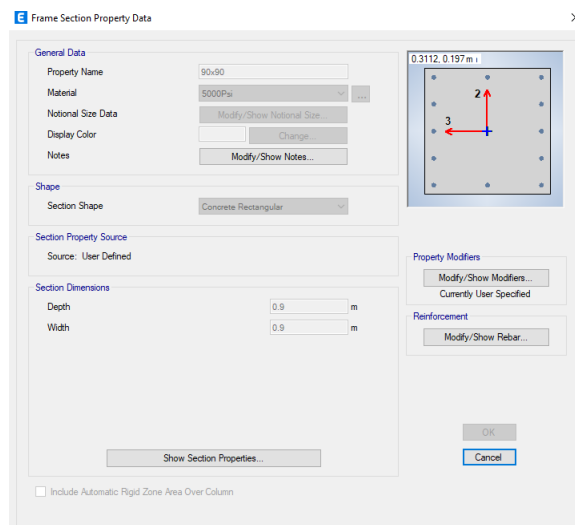


Figura 17. Columna de esquina nivel 1

losas se realizó considerando las cargas vivas y muertas, así como las posibles deformaciones durante los eventos sísmicos.

- 3. Propiedades de materiales.** Los materiales utilizados en la construcción fueron definidos con base en las propiedades establecidas en las normativas vigentes. Los principales materiales definidos en el modelo son:

**Concreto reforzado:** el concreto fue modelado con las propiedades de resistencia y rigidez adecuadas, utilizando un valor típico de resistencia a la compresión de  $f'c = 5000, psi$ . Se prestó especial atención a las relaciones esfuerzo-deformación del concreto para reflejar un comportamiento adecuado bajo cargas sísmicas.

**Acero de refuerzo:** el acero utilizado en el refuerzo fue modelado con base en su resistencia a la tracción y su capacidad de deformación, utilizando barras de refuerzo de acero ASTM

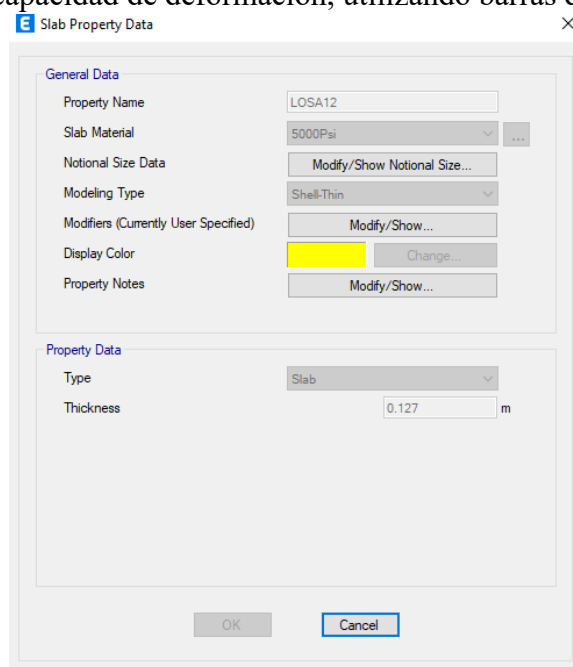


Figura 18. Losa de entrepiso y techo

A706 Grado 60. Estas propiedades fueron claves en la resistencia y ductilidad de los elementos estructurales, especialmente en las vigas y columnas.

- **Suelo:** dependiendo de la tipología de suelo (tipos B, C, o D según la clasificación de la NSE), se asignaron propiedades de rigidez y amortiguamiento al sistema para simular adecuadamente las condiciones del terreno y su influencia en el comportamiento del edificio.

**4. Asignación de cargas.** El análisis estructural consideró tanto cargas gravitacionales como sísmicas. Las cargas fueron asignadas de acuerdo con la normativa guatemalteca, garantizando que el edificio fuera capaz de resistir los efectos de eventos sísmicos severos.

**Cargas muertas:** las cargas permanentes incluyeron el peso propio de la estructura y otros elementos no estructurales (acabados, instalaciones, etc.). Estas cargas fueron calculadas y aplicadas directamente en el modelo.

**Cargas vivas:** se consideraron cargas variables como la ocupación de personas y mobiliario en el edificio. Las cargas vivas se aplicaron siguiendo los requerimientos de la normativa local.

**Cargas sísmicas:** se llevó a cabo un análisis dinámico basado en espectros de respuesta sísmica para las diferentes tipologías de suelo (roca, suelo intermedio y suelo blando). El espectro de diseño fue generado de acuerdo con la NSE y ajustado a las condiciones locales de la ciudad de Guatemala. Para simular los efectos sísmicos, se utilizó un análisis modal espectral que permitió estimar las derivas laterales del edificio.

**5. Especificaciones del proyecto de referencia.** El proyecto de referencia siguió las normas locales para el diseño sismorresistente, específicamente el Reglamento Sísmico de Guatemala (NSE), y los lineamientos internacionales como la normativa ACI 318 para diseño de concreto reforzado y la norma ASCE 7-16 para el análisis de cargas sísmicas.

Se prestó especial atención a la exactitud del modelo en ETABS, garantizando que la geometría, las cargas y las propiedades de los materiales fueran consistentes con las especificaciones del proyecto y la normativa vigente. El objetivo fue que el modelo representara de manera precisa el comportamiento real de la estructura durante eventos sísmicos.

**E** Material Property Data ×

---

**General Data**

Material Name: 5000Psi

Material Type: Concrete

Directional Symmetry Type: Isotropic

Material Display Color:  Change...

Material Notes: Modify/Show Notes...

---

**Material Weight and Mass**

Specify Weight Density       Specify Mass Density

Weight per Unit Volume: 150 lb/ft<sup>3</sup>

Mass per Unit Volume: 4.662 lb-s<sup>2</sup>/ft<sup>4</sup>

---

**Mechanical Property Data**

Modulus of Elasticity, E: 4030508.7 lb/in<sup>2</sup>

Poisson's Ratio, U: 0.2

Coefficient of Thermal Expansion, A: 0.0000055 1/F

Shear Modulus, G: 1679378.63 lb/in<sup>2</sup>

---

**Design Property Data**

Modify/Show Material Property Design Data...

---

**Advanced Material Property Data**

Nonlinear Material Data...
Material Damping Properties...
Time Dependent Properties...

---

**Modulus of Rupture for Cracked Deflections**

Program Default (Based on Concrete Slab Design Code)

User Specified

---

OK
Cancel

*Figura 19.* Propiedades del concreto

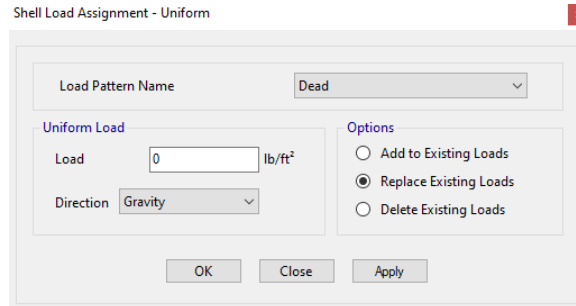


Figura 20. Asignación de cargas al modelo de ETABS

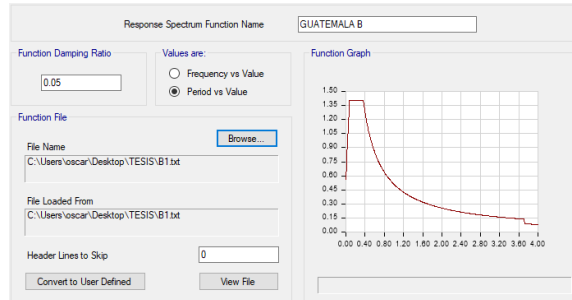


Figura 21. Espectro sísmico para suelo tipo B en Guatemala, Guatemala

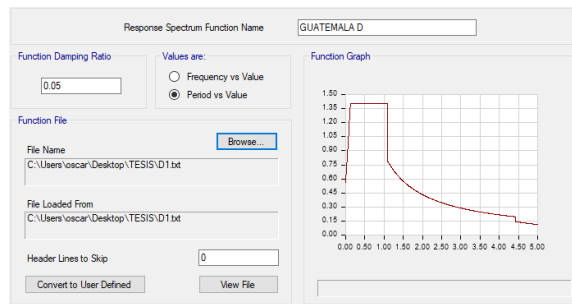


Figura 22. Espectro sísmico para suelo tipo C en Guatemala, Guatemala

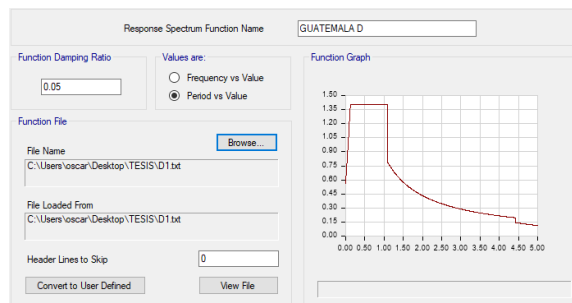


Figura 23. Espectro sísmico para suelo tipo D en Guatemala, Guatemala

## VIII. RESULTADOS

Una vez finalizado el modelado de la estructura en ETABS y asignadas las propiedades de los materiales y las cargas de diseño, se procedió a realizar un análisis detallado de la respuesta sísmica del edificio de 5 niveles. Este análisis se basó en el comportamiento estructural bajo las condiciones de tres tipologías de suelo distintas (B, C y D), con el objetivo de evaluar la variación de las derivas de entrepiso para cada caso. A continuación, se detallan los principales resultados obtenidos:

**1. Análisis modal espectral.** El análisis modal espectral fue realizado para cada tipología de suelo utilizando los espectros de respuesta de acuerdo con la normativa NSE. Este análisis permitió obtener las frecuencias naturales y modos de vibración de la estructura, los cuales son esenciales para determinar cómo responde el edificio ante un evento sísmico. Para el tipo de suelo B se obtuvo una participación del noventa por ciento de la masa en X en el modo de vibración 6 y para Y en el modo de vibración 5, para el tipo de suelo C se obtuvo una participación del noventa por ciento de la masa en Y en el modo de vibración 6 y para Y en el modo de vibración 8, para el tipo de suelo D se obtuvo una participación del noventa por ciento de la masa en X en el modo de vibración 9 y para Y en el modo de vibración 8.

TABLE: Modal Participating Mass Ratios								
Case	Mode	Period sec	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
Modal	1.00	0.87	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
Modal	2.00	0.80	0.00	0.75	0.00	0.00	0.76	0.00
Modal	3.00	0.58	0.75	0.00	0.00	0.75	0.76	0.00
Modal	4.00	0.24	0.00	0.00	0.00	0.75	0.76	0.00
Modal	5.00	0.21	0.00	0.15	0.00	0.75	0.91	0.00
Modal	6.00	0.15	0.17	0.00	0.00	0.93	0.91	0.00
Modal	7.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.93	0.91	0.00
Modal	8.00	0.10	0.00	0.06	0.00	0.93	0.97	0.00
Modal	9.00	0.07	0.05	0.00	0.00	0.97	0.97	0.00
Modal	10.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.97	0.97	0.00
Modal	11.00	0.06	0.00	0.02	0.00	0.97	0.99	0.00
Modal	12.00	0.05	0.02	0.00	0.00	0.99	0.99	0.00

Figura 24. Análisis modal y masa participante para tipo se suelo B

TABLE: Modal Participating Mass Ratios								
Case	Mode	Period sec	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
Modal	1.00	0.88	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Modal	2.00	0.80	0.00	0.73	0.00	0.00	0.74	0.00
Modal	3.00	0.58	0.73	0.00	0.00	0.73	0.74	0.00
Modal	4.00	0.24	0.00	0.00	0.00	0.73	0.74	0.00
Modal	5.00	0.21	0.00	0.15	0.00	0.73	0.88	0.00
Modal	6.00	0.15	0.17	0.00	0.00	0.90	0.88	0.00
Modal	7.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.90	0.88	0.00
Modal	8.00	0.10	0.00	0.06	0.00	0.90	0.94	0.00
Modal	9.00	0.07	0.05	0.00	0.00	0.95	0.94	0.00
Modal	10.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.95	0.94	0.00
Modal	11.00	0.06	0.00	0.02	0.00	0.95	0.96	0.00
Modal	12.00	0.05	0.02	0.00	0.00	0.96	0.96	0.00

Figura 25. Análisis modal y masa participante para tipo se suelo C

TABLE: Modal Participating Mass Ratios								
Case	Mode	Period sec	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
Modal	1.00	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Modal	2.00	0.82	0.00	0.72	0.00	0.00	0.73	0.00
Modal	3.00	0.59	0.72	0.00	0.00	0.72	0.73	0.00
Modal	4.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.72	0.73	0.00
Modal	5.00	0.22	0.00	0.15	0.00	0.72	0.88	0.00
Modal	6.00	0.16	0.17	0.00	0.00	0.89	0.88	0.00
Modal	7.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.89	0.88	0.00
Modal	8.00	0.10	0.00	0.05	0.00	0.89	0.93	0.00
Modal	9.00	0.08	0.05	0.00	0.00	0.94	0.93	0.00
Modal	10.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.94	0.93	0.00
Modal	11.00	0.06	0.00	0.02	0.00	0.94	0.95	0.00
Modal	12.00	0.05	0.02	0.00	0.00	0.95	0.95	0.00

Figura 26. Análisis modal y masa participante para tipo se suelo D

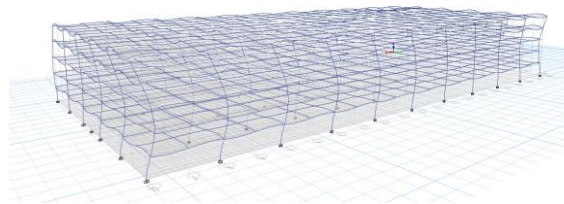


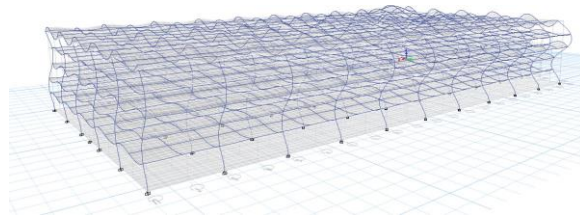
Figura 27. Deformación de estructura para suelo tipo B

- Modos de vibración:** se obtuvieron los primeros 12 modos de vibración, que explican más del 90 % de la masa activa del sistema. Los primeros modos estuvieron dominados por traslación en las direcciones X y Y.

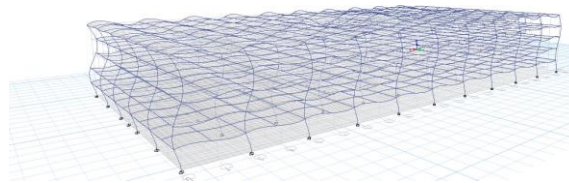
- **Frecuencias naturales:** las frecuencias naturales del edificio variaron significativamente dependiendo del tipo de suelo. Para suelo tipo B (roca), se obtuvieron frecuencias más altas debido a la mayor rigidez del terreno, mientras que para suelo tipo D (suelo blando) las frecuencias fueron más bajas, lo que indica un mayor periodo de vibración.
- **Formas modales:** las formas modales obtenidas para cada suelo mostraron un comportamiento consistente, pero con amplitudes de desplazamiento mayor en los suelos más blandos, lo que refleja la mayor flexibilidad del sistema suelo-estructura en estas condiciones.

**2. Cálculo de derivas de entrepiso.** El cálculo de las derivas de entrepiso para cada nivel del edificio se realizó en función de las cargas sísmicas aplicadas en los diferentes escenarios de suelo. Estas derivas representan el desplazamiento lateral relativo entre dos niveles consecutivos del edificio y son un indicador clave de la respuesta estructural durante un sismo.

- **Derivas máximas por nivel:** las derivas máximas ocurrieron en el nivel superior, como era de esperarse, siendo más pronunciadas en el suelo tipo D (suelo blando), donde se observó una deriva del 1.8 % de la altura de entrepiso, en comparación con el 1.2 % en suelo tipo C (intermedio) y el 0.9 % en suelo tipo B (roca).



*Figura 28.* Deformación de estructura para suelo tipo C



*Figura 29.* Deformación de estructura para suelo tipo D

<b><i>Deriva máximas por nivel</i></b>	
<b>Tipo de suelo</b>	<b>Deriva Max</b>
<b>B</b>	<b>0.01285</b>
<b>C</b>	<b>0.01651</b>
<b>D</b>	<b>0.02711</b>

Figura 30. Desplazamiento máximo por nivel

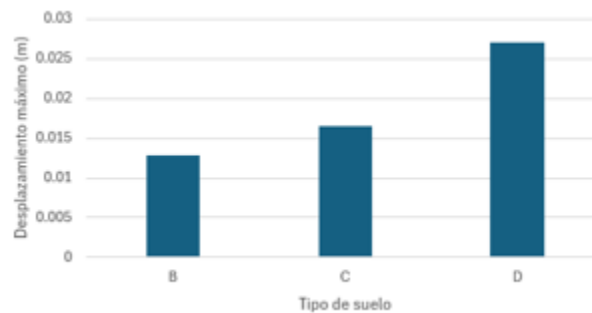


Figura 31. Desplazamiento máximo por nivel

- Distribución de derivas:** a lo largo de los cinco niveles, se observó un aumento progresivo de las derivas con la altura, siendo más evidente en los suelos blandos. Los suelos más rígidos presentaron una menor variación en las derivas de entrepiso entre los niveles inferiores y superiores.

**3. Comparación con normativas.** Los resultados de las derivas obtenidos para cada escenario de suelo fueron comparados con los límites de desplazamiento lateral establecidos en la normativa NSE. La normativa específica que las derivas de entrepiso no deben exceder el 2 % de la altura de entrepiso, con el fin de garantizar que el edificio mantenga su integridad estructural y funcionalidad durante un evento sísmico.

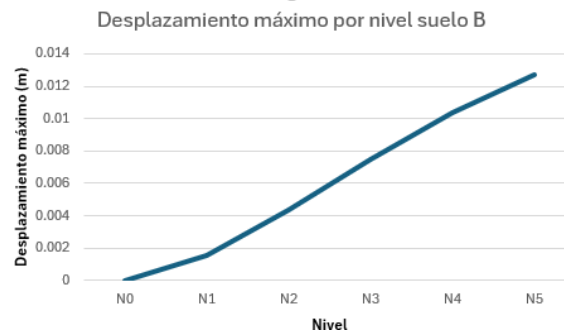


Figura 32. Distribución de derivas por nivel con tipo de suelo B



Figura 33. Distribución de derivas por nivel con tipo de suelo C



Figura 34. Distribución de derivas por nivel con tipo de suelo D

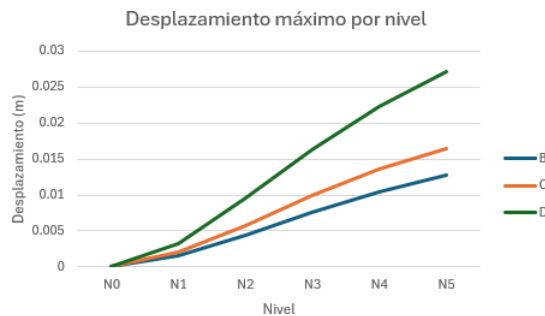


Figura 35. Resumen de distribución de derivas por nivel según tipo de suelo

- Cumplimiento normativo:** para los 3 tipos de suelo analizados, las derivas máximas se mantuvieron por debajo del límite permitido del 2 %, lo que indica que el edificio, en estos casos, cumple con los requisitos normativos de diseño sismorresistente.
- Desempeño estructural:** aunque el edificio cumple con la normativa en todos los casos, se identificó que, en suelos más blandos, el edificio presenta un mayor riesgo de sufrir daños no estructurales, debido a las mayores derivas de entrepiso. Por tanto,

se sugiere que en estos casos se apliquen medidas adicionales de reforzamiento para mejorar su comportamiento.

**4. Evaluación de los resultados.** La evaluación de los resultados permitió establecer una clara relación entre la tipología de suelo y el comportamiento estructural del edificio en términos de derivas de entrepiso. A continuación, se resumen las principales observaciones:

- **Influencia del tipo de suelo:** la rigidez del suelo juega un papel fundamental en la respuesta sísmica del edificio. En suelos más rígidos (tipo B), las derivas se mantuvieron en niveles bajos, mientras que en suelos más flexibles (tipo D), las derivas aumentaron considerablemente, debido a la mayor deformabilidad del sistema suelo-estructura.
- **Condiciones de diseño:** en suelos tipo D, si bien el edificio cumple con los requisitos normativos de deriva, las magnitudes obtenidas sugieren que puede haber problemas de funcionalidad o daños no estructurales durante un evento sísmico fuerte. Por lo tanto, se recomienda evaluar la inclusión de dispositivos disipadores de energía o un reforzamiento adicional en estos casos.
- **Soluciones de diseño:** para mitigar los efectos de las derivas elevadas en suelos blandos, se podrían proponer estrategias de reforzamiento como el uso de contravientos, amortiguadores de masa o la optimización de la rigidez lateral del sistema estructural. Estas medidas podrían reducir significativamente las derivas sin alterar de manera sustancial el diseño original del edificio.

## IX. CONCLUSIONES

- Se logró evaluar el comportamiento de las derivas de un edificio de 5 niveles en diferentes tipologías de suelo en Guatemala (B, C y D), utilizando el software ETABS, cumpliendo con los límites establecidos por la normativa sísmica local, sin exceder el dos por ciento de derivas de entrepiso.
- Se modeló de forma satisfactoria un edificio de 5 niveles en el software ETABS y se realizaron análisis estructurales bajo diferentes escenarios sísmicos, de acuerdo con la clasificación de suelos establecida en el NSE, tomando en cuenta la masa modal participante.
- Se determinaron las derivas de entrepiso para cada nivel del edificio bajo tres tipologías de suelo: tipo B (roca), tipo C (suelo intermedio) y tipo D (suelo blando), siendo de 0.013, 0.017 y 0.027 respectivamente.
- Al comparar los resultados obtenidos para cada tipología de suelo con los límites de desplazamiento lateral permitidos por la normativa guatemalteca, se logró identificar las variaciones en el comportamiento estructural, teniendo un mayor desplazamiento el suelo tipo D.
- Al momento de analizar la influencia de las características geotécnicas del suelo en las derivas del edificio, se evidenció que los suelos blandos afectan más el comportamiento sísmico en comparación con suelos más rígidos.

## X. RECOMENDACIONES

- **Realizar estudios geotécnicos exhaustivos:** es fundamental realizar estudios geotécnicos detallados antes de la construcción de cualquier edificación. Estos estudios deben incluir la caracterización del suelo, la identificación de sus propiedades mecánicas y la evaluación de la posible interacción entre la estructura y el terreno. Conocer la tipología de suelo ayudará a diseñar estructuras más seguras y adaptadas a las condiciones locales.
- **Incorporar medidas de reforzamiento en suelos blandos:** para edificaciones que se construyan sobre suelos tipo D (blandos), se recomienda implementar medidas adicionales de reforzamiento, como el uso de contravientos, amortiguadores de masa y técnicas de mejoramiento del suelo. Estas medidas ayudarán a reducir las derivas y mejorar la capacidad de la estructura para resistir cargas sísmicas.
- **Ajustar los diseños estructurales según la tipología de suelo:** los ingenieros estructurales deben ajustar los diseños de los edificios considerando las características específicas de la tipología de suelo. Esto incluye aumentar la rigidez de la estructura en suelos más blandos o aplicar técnicas de diseño que permitan una mayor flexibilidad en suelos más rígidos, asegurando así un comportamiento óptimo durante eventos sísmicos.
- **Utilizar herramientas de modelado avanzadas:** se recomienda seguir utilizando software de modelado avanzado como ETABS para la evaluación del comportamiento estructural. Además, se sugiere explorar y validar otros softwares disponibles en el mercado que permitan realizar análisis dinámicos y no lineales, ya que esto puede ofrecer perspectivas más completas sobre el desempeño de la estructura.
- **Monitorear edificaciones existentes:** para edificios ya construidos, especialmente aquellos ubicados en suelos problemáticos, se sugiere implementar un sistema de monitoreo para evaluar continuamente las derivas y el comportamiento estructural. Esto permitirá detectar problemas potenciales antes de que se conviertan en fallas críticas.
- **Promover la formación continua de profesionales en ingeniería estructural y geotécnica:** se recomienda fomentar la capacitación y actualización constante de ingenieros en temas relacionados con diseño sismorresistente, análisis de suelos y nuevas tecnologías en ingeniería. Esto contribuirá a una mayor conciencia sobre la importancia de considerar la interacción entre la estructura y el terreno en el diseño de edificaciones.
- **Trabajos futuros:** se recomienda evaluar otras tipologías de suelo para contrastar la acción de suelo blando en una estructura, sobre todo a nivel de cimentación, al igual que hacer variaciones en la resistencia del concreto o bien, variar la altura.

## XI. BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, E (2022). Análisis de las nuevas tendencias tecnológicas y la implementación de BIM en Ingeniería Civil. *Memorias del Congreso de Tecnología en Construcción*.
- Alcántara Rojas, R (2013). Metodología para minimizar las deficiencias de diseño basada en la construcción virtual usando tecnologías BIM. *Actas del Congreso de Tecnología en Construcción*, 40-50.
- Alvarado Espinoza, V. V (2021). Análisis comparativo del diseño estructural de un edificio residencial utilizando los softwares Etabs y Sap2000, en la Urbanización Vista Alegre, Trujillo. *Actas del Congreso Nacional de Ingeniería Civil*, 1-10.
- Alvarado Lemolle, J (2008). Análisis y diseño de un edificio de concreto reforzado estructurado con el sistema losa plana en zona I del D.F. bajo uso de software de diseño (Saad Pro 2007 y ETABS V.9.0). *Memorias del Congreso Nacional de Construcción*.
- Álvarez-Deulofeu, R (2019). Influencia de las cargas muertas y el tipo de suelo en el diseño de cimentaciones aisladas en zonas sísmicas. *Ciencia en su PC*, 16-32.
- Ardila Bothia, J (2014). Efecto de la carga viva en el diseño sísmico de estructuras de almacenamiento de un piso. *Actas del Congreso de Ingeniería Civil*.
- Barillas, E., Vásquez, A., Gómez, L., y Morales, M (2018). Normas Sísmicas de Edificación de Guatemala (NSE-2018) [Guatemala: Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda]. *Memorias del Congreso de Normativas de Construcción*.
- Briones Sánchez, A. C (2018). Comparación del modelamiento, análisis y diseño estructural en concreto armado utilizando los Software Etabs y Robot Structural Analysis, para un edificio de cinco niveles (cuatro pisos y un semisótano). *Actas del Congreso Internacional de Estructuras*.
- Briones Sánchez, A. C (2019). Análisis Comparativo del Diseño Estructural de un Edificio de Concreto Armado de 4 Niveles, por Método Clásico y los Programas Etabs y Cypecad. *Memorias del Congreso de Ingeniería Estructural*, 1-12.
- Cormac, J. C. M., y Brown, R. H (2018). Diseño de Concreto Reforzado. *Actas del Congreso de Diseño Estructural*.
- De la Cruz, J. L. P (2019). Software educativo para la automatización del análisis no lineal estático pushover en estructuras de concreto armado. *Tesis de Doctorado, Pontificia Universidad Católica del Perú*.
- Dorta, J., Chaves Assef, M., y Méndez, R (2014). Building Information Modeling (BIM): una oportunidad para transformar la industria de la construcción. *Spanish Journal of Building Information Modeling*, 12-18.
- Herrera, R., Navarrete, J., Esquivel, R., Cabrera, F., Moguel, C., y Salazar, R (2012). Drones: Aplicaciones en Ingeniería Civil y geociencias. *Actas de la Conferencia Internacional de Drones en Ingeniería*, 326-331.
- Hibbeler, R (2012). Análisis estructural. *Memorias del Congreso de Análisis Estructural*.
- Huaraca Ramos, A (2018). Análisis comparativo aplicando el software robot Structural Analysis y ETABS para evaluar el comportamiento estructural de viviendas

- autoconstruidas. *Actas del Simposio Nacional de Ingeniería Civil*.
- Hurtado, J (2015). La gerencia BIM como sistema de gestión para proyectos de construcción. *Gerencia tecnológica informática*, 15-22.
- Lamus, F., y Andrade, S (2015). Concreto reforzado: fundamentos. *Actas del Congreso de Materiales de Construcción*.
- Lobera, J., y Michelutti, A (2007). Construcción sostenible y construcción de la sostenibilidad: una experiencia en comunidades rurales de El Salvador. *Revista Internacional de Tecnología, Sostenibilidad y Humanismo*, 53-68.
- Martín, H (2021). Comparativa de cálculo estructural entre dos softwares: ETABS y SAP2000. *Actas del Congreso de Ingeniería Civil*, 1-10.
- Moreno, S (2022). Mega tendencias e industria 4.0-Tendencias tecnológicas en la Ingeniería Civil. *Memorias del Congreso de Tecnología en Construcción*.
- Peña Mondragón, M (2010). Estrategias para el modelado y el análisis sísmico de estructuras históricas. *Actas del Simposio de Ingeniería Sísmica*, 43-63.
- Puerta, C (2015). Tecnología drone en levantamientos topográficos. *Actas del Congreso de Topografía*, 151-158.
- Ramírez, A (2002). La construcción sostenible. *Física y sociedad*, 30-33.
- Salas Rojas, R (2022). Análisis comparativo sobre levantamientos topográficos mediante drones respecto a levantamientos topográficos convencionales. *Actas del Congreso Internacional de Geociencias*, 20-30.
- Suesca, A (2007). Modelación estructural para cargas sísmicas. *Actas del Congreso de Ingeniería Estructural*, 25-38.
- Trejo Carvajal, L (2018). Estudio de impacto del uso de la metodología BIM en la planificación y control de proyectos de ingeniería y construcción. *Actas del Congreso de Gestión de Proyectos*, 75-80.
- Villagrán de León, J., Martínez, R., Barillas, E., y Rodríguez, J (2020). Normas para el Diseño y Construcción de Edificios Sismorresistentes (AGIES) [Guatemala: AGIES]. *Actas del Congreso de Ingeniería Estructural*.

## XII. APÉNDICES

Tabla 3.7.1-1 — Cargas vivas para edificaciones

Tipo de ocupación o uso	Wv (kg/m <sup>2</sup> )	Pv (kg)
<b>Vivienda</b>		
Balcones	300 [R]	
Habitaciones y pasillos	200 [R]	
Escaleras	300	
<b>Oficina</b>		
Pasillos y escaleras	300	
Oficinas	250 [R]	800
Áreas de cafetería	500	
<b>Hospitales</b>		
Pasillos y rampas	500	450
Clínicas y encamamiento	250 [R]	
Servicios médicos y laboratorio	350 [R]	800
Farmacia	500	
Escaleras	500	
Cafetería y cocina	500	

Figura 36. Cargas vivas según NSE 2.1

Tipo de ocupación o uso	Wv (kg/m <sup>2</sup> )	Pv (kg)
<b>Hoteles, carga de escaleras y de elevadores</b>		
Habitaciones	200 [R]	450
Servicios y áreas públicas	500	800
<b>Educativos</b>		
Aulas	200 [R]	400
Pasillos y escaleras	500	
Salones de lectura de biblioteca	200 [R]	400
Área de estanterías de biblioteca	700	800
<b>Áreas de reunión</b>		
Escaleras privadas	300 [R]	Ver 3.2 (d)
Escaleras públicas	500	Ver 3.2 (d)
Balcones	500	
Vestíbulos públicos	500	
Plazas a nivel de la calle	500	800
Salones con asiento fijo	300 [R]	
Salones sin asiento fijo	500	800
Escenarios y circulaciones	500	
<b>Estacionamientos</b>		
Garajes para automóviles de pasajeros	250	Ver 3.2 (c)
Garajes para automóviles de carga (2000 Kg.)	500	Ver 3.2 (c)
Rampas vehiculares de uso colectivo	500	Ver 3.2 (c)
Áreas de circulación vehicular	250	Ver 3.2 (c)
Áreas de servicio y reparación	500	Ver 3.2 (c)
<b>Instalaciones deportivas públicas</b>		
Zonas de circulación	500	
Zonas de asientos fijos	400	
Zonas sin asientos	800	
Canchas deportivas	Ver nota [a]	

Figura 37. Cargas vivas según NSE 2.1 (Continuación)

Tipo de ocupación o uso	Wv (kg/m <sup>2</sup> )	Pv (kg)
<b>Almacenes</b>		
Minoristas	500	800
Mayoristas	600	1200
<b>Bodegas</b>		
Cargas livianas	600	800
Cargas pesadas	1200	1200
<b>Fábricas</b>		
Industrias livianas	500	800
Industrias pesadas	1000	1200
<b>Cubiertas pesadas (Inciso 3.3 (g))</b>		
Azoteas de concreto con acceso	200	
Azoteas sin acceso horizontal o inclinadas	100	
Azoteas con inclinación mayor de 20°	75 <sup>[b]</sup>	
Azoteas usadas para jardín o para reuniones	500	
<b>Cubiertas livianas (Inciso 3.3 (h))</b>		
Techos de láminas, tejas, cubiertas plásticas, lonas, etc. (aplica a la estructura que soporta la cubierta final)	50 <sup>[b][c]</sup>	135

[a] Carga depende del tipo de cancha

[b] Sobre proyección horizontal

[c] Carga no reducible

[R] Puede aplicar reducción de carga viva según Sección 3.5.

**3.7.2** Para pasarelas o puentes peatonales, la carga viva mínima es de 500 kg/m<sup>2</sup>. No aplica reducción de carga viva.

**3.7.3** Para cargas no contempladas en la Tabla 3.7.1-1 referirse a la Tabla 4.3-1 o Tabla C4.3-1 de ASCE/SEI 7 – 2016.

Figura 38. Cargas vivas según NSE 2.1 (continuación)

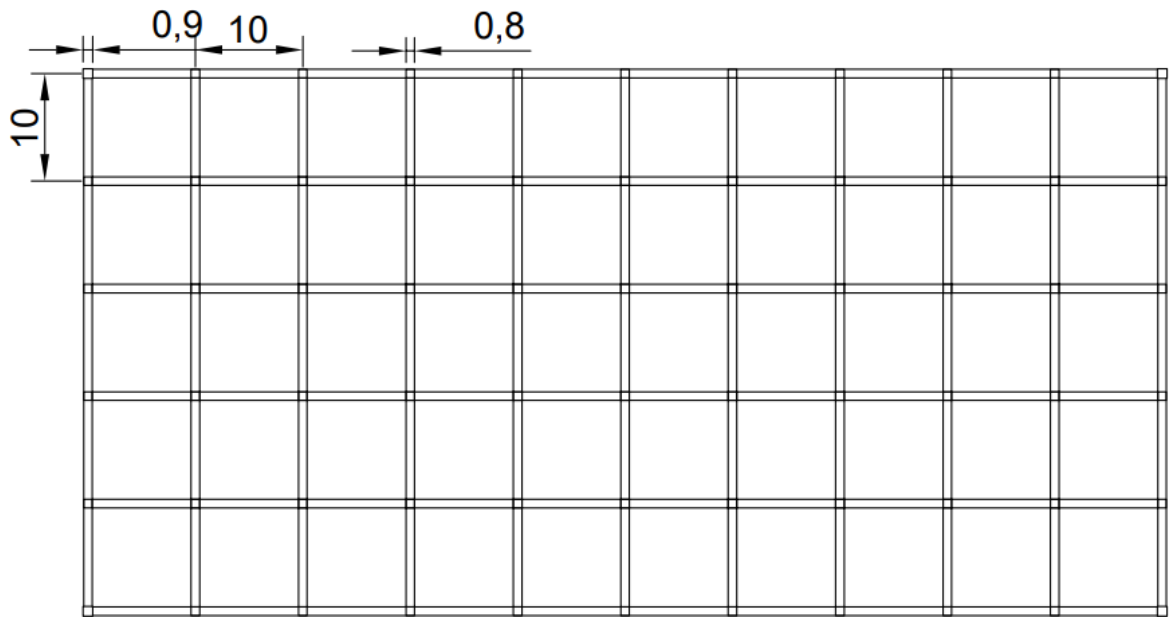


Figura 39. Planta de proyecto hotel

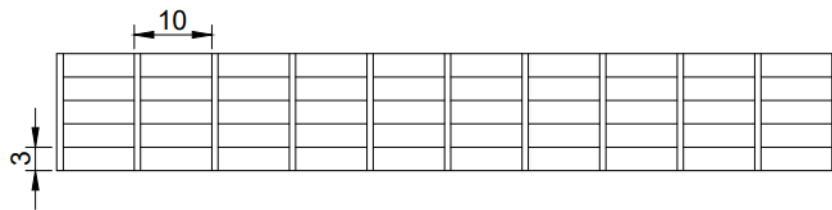


Figura 40. Elevación norte

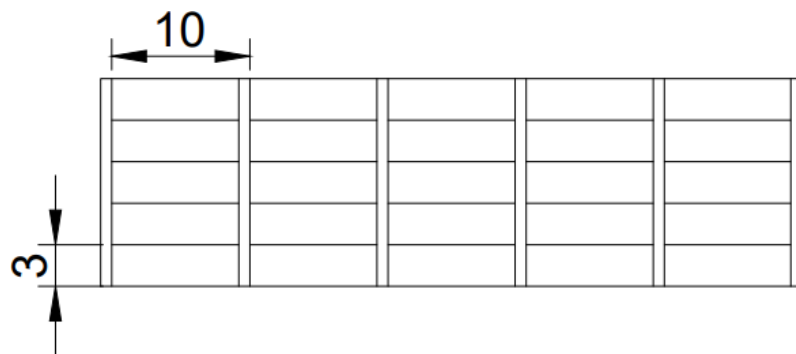


Figura 41. Elevación este

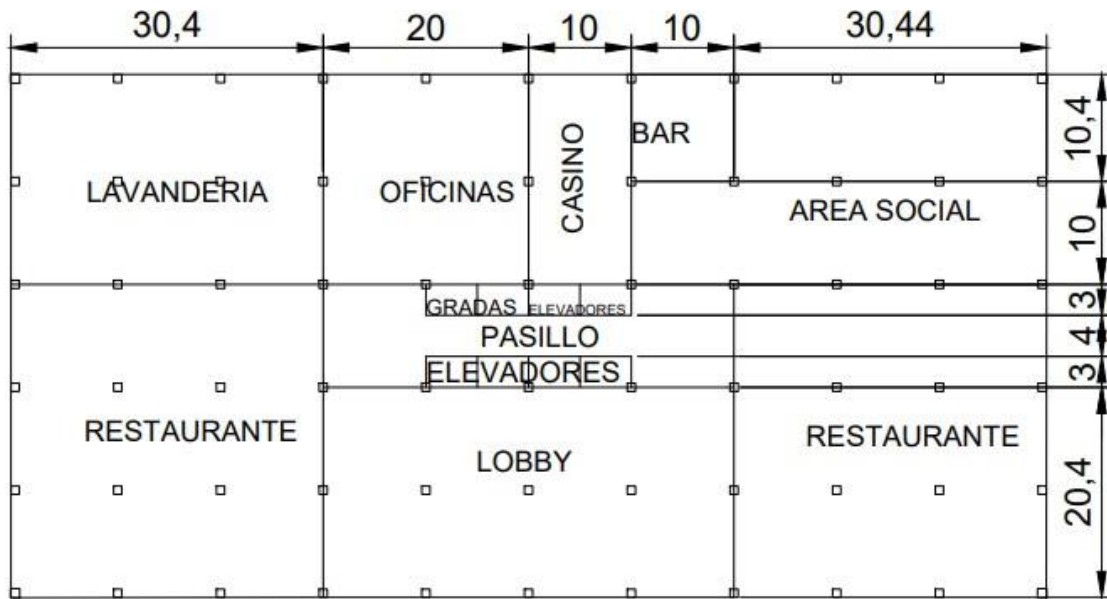


Figura 42. Planta nivel 1

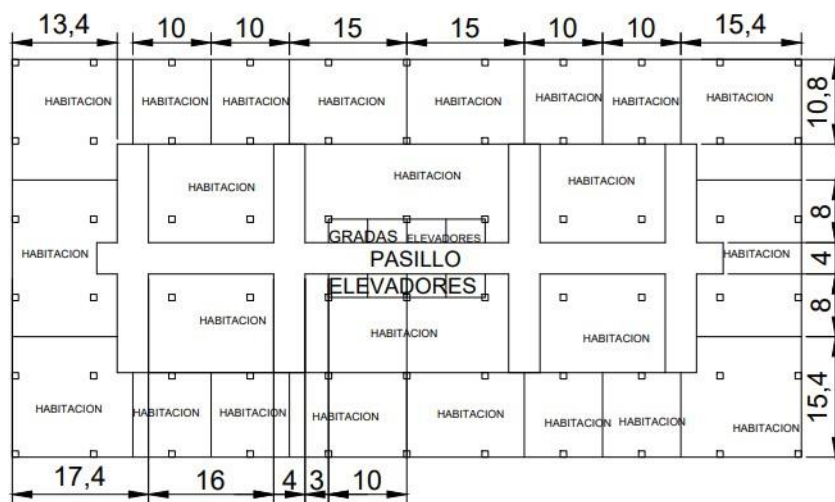


Figura 43. Planta nivel 2-5

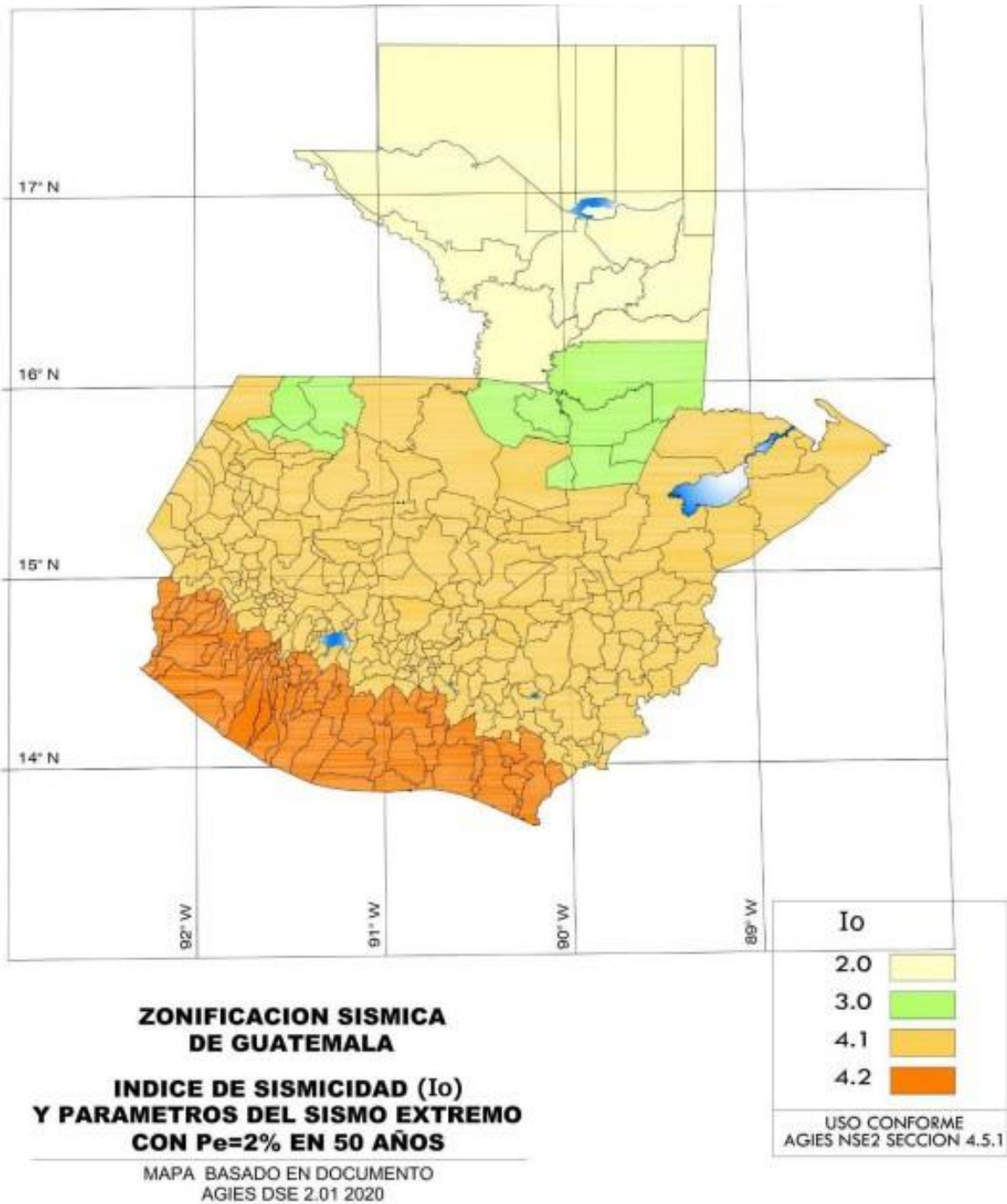
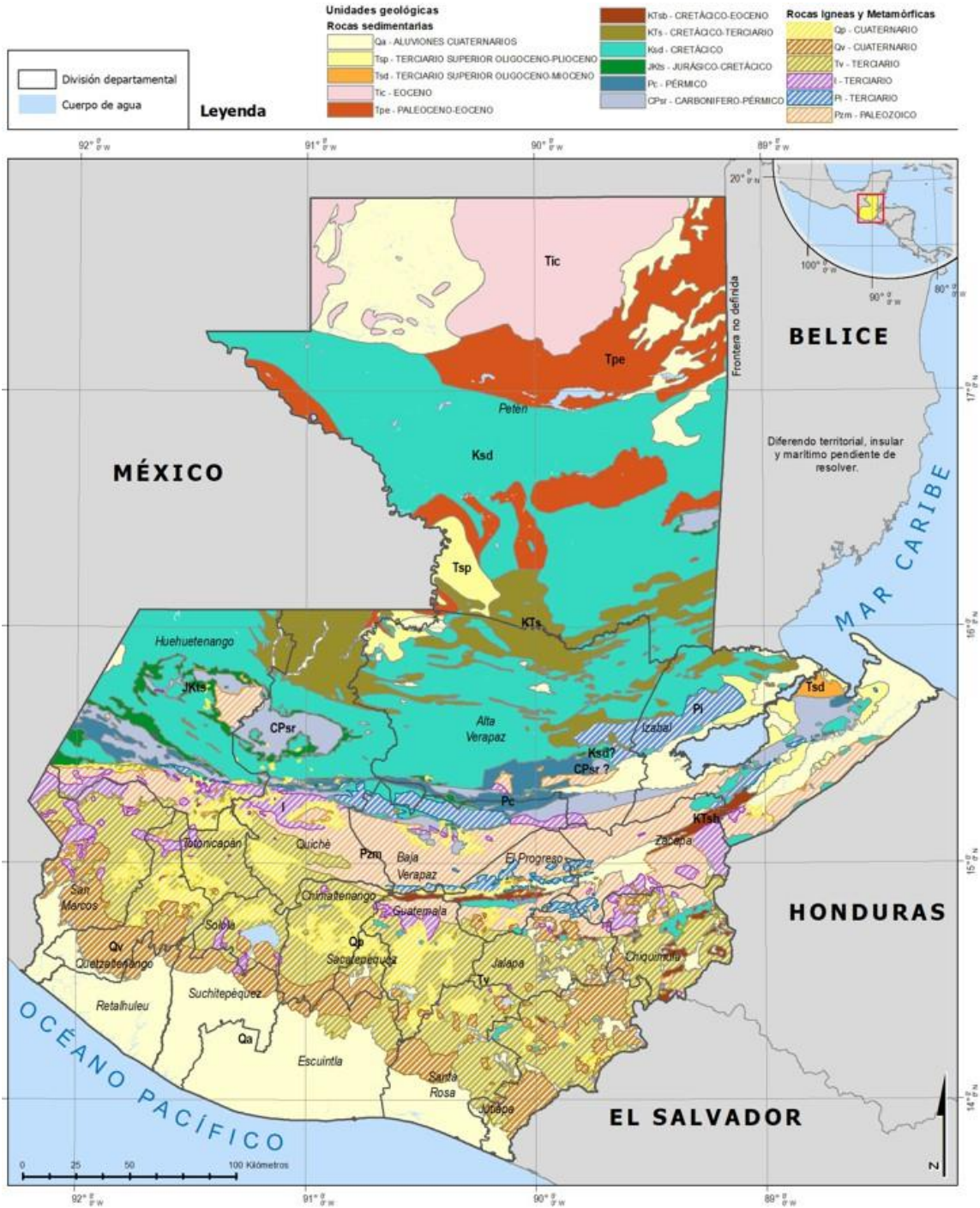


Figura 44. Mapa de zonificación sísmica de Guatemala



Perfil Ambiental de Guatemala 2022

Fuente: Elaboración propia con base en mapas topográficos del Instituto Geográfico Nacional a escala 1:50,000 y 250,000 y Unidad de Planificación Geográfica y Gestión de Riesgo (Upgr-MAGA), 2005.

Figura 45. Mapa geológico de Guatemala

No.	Municipio	Departamento	I <sub>b</sub>	Suelo Tipo A			Suelo Tipo B			Suelo Tipo C			Suelo Tipo D			Suelo Tipo E			Velocidad básica de viento (Km/h)
				S <sub>cr</sub>	S <sub>tr</sub>	T <sub>L</sub>	S <sub>cr</sub>	S <sub>tr</sub>	T <sub>L</sub>	S <sub>cr</sub>	S <sub>tr</sub>	T <sub>L</sub>	S <sub>cr</sub>	S <sub>tr</sub>	T <sub>L</sub>	S <sub>cr</sub>	S <sub>tr</sub>	T <sub>L</sub>	
76	Guanagazapa	Escuintla	4.2	1.68	0.51	3.58	1.68	0.57	3.06	1.80	0.74	3.09	1.77	1.16	3.84	1.59	1.92	3.90	110
77	Guastatoya	El Progreso	4.1	1.16	0.43	3.48	1.38	0.48	3.43	1.87	0.71	2.90	1.63	1.19	3.48	1.31	1.65	3.75	100
78	Guatemala	Guatemala	4.1	1.28	0.47	2.48	1.43	0.52	2.43	1.53	0.68	2.69	1.43	0.88	3.26	1.28	1.66	3.49	100
79	Guazacapán	Santa Rosa	4.2	1.68	0.51	3.57	1.68	0.57	3.06	1.80	0.75	3.09	1.78	1.16	3.85	1.59	1.94	4.04	110
80	Huehuetenango	Huehuetenango	4.1	1.31	0.43	4.51	1.54	0.53	4.45	2.04	0.90	3.69	1.78	1.28	4.27	1.43	1.85	4.43	100
81	Huitán	Quetzaltenango	4.1	1.36	0.47	2.50	1.43	0.52	2.51	1.53	0.68	2.56	1.52	0.79	3.48	1.28	1.23	3.95	100
82	Huité	Zacapa	4.1	1.12	0.43	3.53	1.35	0.48	3.43	1.81	0.70	2.90	1.58	1.16	3.49	1.30	1.65	3.75	100
83	Ipala	Chiquimula	4.1	1.51	0.43	2.51	1.69	0.53	2.41	2.06	0.88	2.21	1.76	1.27	2.78	1.37	1.68	3.00	100
84	Ixcán	Quiché	4.1	1.21	0.35	4.51	1.35	0.49	4.45	1.80	0.79	3.69	1.62	1.00	4.27	1.33	1.62	4.46	100
85	Ixchiguan	San Marcos	4.1	1.38	0.47	2.56	1.43	0.52	2.96	1.53	0.68	3.26	1.54	0.85	4.26	1.33	1.67	4.33	100
86	Iztapa	Escuintla	4.2	1.61	0.51	3.54	1.61	0.57	3.04	1.74	0.83	3.25	1.75	1.22	3.92	1.56	1.98	4.25	110
87	Jacaltenango	Huehuetenango	4.1	1.40	0.43	3.64	1.63	0.54	3.54	1.94	0.89	3.00	1.69	1.28	3.45	1.34	1.65	3.68	100
88	Jalapa	Jalapa	4.1	1.11	0.43	2.49	1.24	0.48	2.59	1.36	0.62	2.81	1.36	0.87	3.47	1.19	1.61	3.57	100
89	Jalpatagua	Jutiapa	4.1	1.51	0.47	2.73	1.51	0.52	2.58	1.80	0.68	2.69	1.66	1.08	3.27	1.49	1.82	3.51	100
90	Jerez	Jutiapa	4.1	1.45	0.47	2.57	1.45	0.52	2.57	1.61	0.68	2.69	1.58	0.98	3.26	1.37	1.79	3.50	100
91	Jocotán	Chiquimula	4.1	1.11	0.43	2.93	1.28	0.48	2.85	1.74	0.62	2.45	1.52	1.01	3.06	1.27	1.65	3.28	100
92	Jocotenango	Sacatepéquez	4.1	1.36	0.47	2.50	1.43	0.52	2.49	1.70	0.68	2.69	1.52	0.99	3.26	1.28	1.81	3.50	100
93	Joyabaj	Quiché	4.1	1.28	0.47	2.75	1.43	0.52	2.84	1.53	0.68	2.98	1.43	0.80	3.01	1.28	1.48	3.37	100
94	Jutiapa	Jutiapa	4.1	1.31	0.47	2.55	1.43	0.52	2.47	1.53	0.68	2.69	1.49	1.03	3.26	1.32	1.82	3.51	100
95	La Blanca	San Marcos	4.2	1.66	0.51	3.09	1.66	0.57	3.07	1.84	0.82	3.10	1.75	1.20	4.29	1.58	1.98	4.34	110
96	La Democracia	Escuintla	4.2	1.66	0.51	3.54	1.66	0.57	3.04	1.78	0.83	3.28	1.77	1.22	3.94	1.56	1.98	4.25	110
97	La Democracia	Huehuetenango	4.1	1.22	0.43	3.26	1.48	0.48	3.12	1.51	0.81	3.13	1.51	1.13	3.44	1.28	1.65	3.70	100
98	La Esperanza	Quetzaltenango	4.1	1.48	0.47	2.57	1.48	0.52	2.57	1.60	0.68	2.66	1.61	0.84	3.25	1.38	1.39	3.88	100
99	La Gomera	Escuintla	4.2	1.55	0.51	3.39	1.57	0.57	3.08	1.76	0.84	3.25	1.72	1.28	4.36	1.59	1.98	4.46	110
100	La Libertad	Huehuetenango	4.1	1.15	0.43	4.03	1.36	0.48	3.84	1.59	0.79	3.68	1.59	1.25	4.27	1.31	1.65	4.48	100
101	La Libertad	Petén	2	0.46	0.17	3.82	0.59	0.19	3.97	0.71	0.32	4.42	0.76	0.43	4.43	1.19	0.63	4.41	100
102	La Reforma	San Marcos	4.2	1.64	0.51	3.60	1.64	0.57	3.03	1.76	0.74	2.87	1.75	1.08	3.77	1.57	1.79	4.18	100
103	La Unión	Zacapa	4.1	1.11	0.43	3.38	1.24	0.48	3.24	1.38	0.62	2.75	1.38	0.89	3.40	1.20	1.65	3.48	100
104	Lanquín	Alta Verapaz	3	0.94	0.37	4.46	1.05	0.41	4.39	1.20	0.57	3.71	1.20	0.89	4.26	1.13	1.55	4.35	100

Figura 46. Listado de amenaza sísmica y velocidad de viento de Guatemala