

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Análisis de Sensibilidad de Parámetros Normativos Locales e Internacionales en el Desempeño Sísmico: Optimización de Estrategias de Reforzamiento en una Edificación de Cinco Pisos Ubicado en el Cantón Guayaquil, Provincia del Guayas – Ecuador.

PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previo la obtención del Título de:

Magister en Estructuras Civiles Sismorresistentes

Presentado por:

Uvidia Leguísamo Marcelo Geovanny

Sadaka Alvarez Josue Abraham

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2024

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mi madre, hermana, mis sobrinos y mi pareja.

Ing. Sadaka Alvarez Josue Abraham

El presente proyecto lo dedico a mis padres, mis hermanas, mi sobrina y a mis amigos.

Ing. Uvidia Leguísamo Marcelo Geovanny

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento en primer lugar a Dios por darme la oportunidad de cumplir con esta meta, a mi tutor académico y a todos que aquellos a que me impulsaron día a día.

Ing. Sadaka Alvarez Josue Abraham

Mi más sincero agradecimiento a aquellos que me animaron a incursionar en este proceso de aprendizaje.

Ing. Uvidia Leguísamo Marcelo Geovanny

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Uvidia Leguísamo Marcelo Geovanny y Sadaka Alvarez Josue Abraham damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Uvidia Leguísamo Marcelo Geovanny
C.I. 1500750193

Sadaka Alvarez Josue Abraham
C.I. 0942787953

EVALUADORES

Ing. Quijano Arteaga Nadia Rosaura
PROFESOR DE LA MATERIA

**Ing. Hidalgo Astudillo Samantha
Elizabeth**
PROFESOR DE LA MATERIA

Ing. Carofilis Gallo Wilson Wladimir
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Este proyecto analiza la sensibilidad de parámetros normativos sísmicos utilizados en desempeño estructural de una estructura con pórticos resistentes a momento de hormigón armado ubicada en Guayaquil - Ecuador. Se comparan las normativas NEC-15, E.30-18, ASCE-22 y la NTC-18 mediante un análisis de sensibilidad aplicada al modelado estructural desarrollado en ETABS identificando los parámetros que más influyen en la respuesta sísmica. Finalmente se proponen estrategias de reforzamiento optimizadas para mejorar la seguridad estructural de la estructura estudiada.

Palabras Clave: Sensibilidad, Pórtico, Reforzamiento, Etabs.

ABSTRACT

This project analyzes the sensitivity of seismic regulatory parameters used in the structural performance of a reinforced concrete moment-resisting frame located in Guayaquil, Ecuador. The NEC-15, E.30-18, ASCE-22, and NTC-18 standards are compared through a sensitivity analysis applied to the structural model developed in ETABS, identifying the parameters that most influence the seismic response. Finally, optimized reinforcement strategies are proposed to improve the structural safety of the studied structure.

Keywords: *Sensitivity, Frame, Reinforcement, ETABS.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
CAPÍTULO 1.....	9
INTRODUCCIÓN.....	9
1.1. Antecedentes	10
1.2. Localización.....	13
1.3. Estudios previos	14
1.4. Problemática a resolver.....	14
1.5. Justificación.....	15
1.6. Objetivos	17
1.6.1. Objetivo General.....	17
1.6.2. Objetivos Específicos.....	17
CAPÍTULO 2.....	19
DESARROLLO DEL PROYECTO	19
2.1. Marco conceptual	19
2.1.1. Desempeño Sísmico de Estructuras.....	19
2.1.2. Normativas Sísmicas	20
2.1.3. Factores de Reducción de Respuesta (R)	20
2.1.4. Irregularidades Estructurales	21
2.1.5. Análisis de Sensibilidad	22
2.1.6. Optimización de Estrategias de Reforzamiento	27

2.2.	Marco metodológico	29
2.2.1.	Recopilación de Información Técnica	30
2.2.2.	Trabajo de Oficina.....	34
CAPÍTULO 3.....		47
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		47
3.1.	Resultados	47
3.1.1.	Análisis Comparativo de Normativas Sísmicas.....	47
3.1.2.	Análisis de Sensibilidad	48
3.1.3.	Resultados del Análisis Estructural con ETABS	48
3.1.4.	Necesidades de Reforzamiento	55
3.2.	Análisis de Resultados	56
3.2.1.	Comportamiento Estructural y Cumplimiento Normativo	56
3.2.2.	Rotaciones en Rótulas Plásticas.....	56
3.2.3.	Eficacia de las Estrategias de Reforzamiento.....	57
3.2.4.	Implicaciones para la Ingeniería Sísmica y Normativas	57
3.2.5.	Limitaciones del Estudio	58
CAPÍTULO 4.....		59
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		59
4.1.	Conclusiones.....	59
4.2.	Recomendaciones.....	60
BIBLIOGRAFÍA.....		64
PLANOS Y ANEXOS.....		67

ABREVIATURAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
AISC	American Institute of Steel Construction
ACI	American Concrete Institute
ASCE	American Society of Civil Engineers
C	Hormigón (Concreto)
CEN	Comité Europeo de Normalización
EERI	Earthquake Engineering Research Institute
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ETABS	Extended 3D Analysis of Building Systems
E.030	Norma Peruana E.030 de Diseño Sismorresistente
FEMA	Federal Emergency Management Agency
FRP	Fiber Reinforced Polymer (Polímero Reforzado con Fibra)
ISO	International Organization for Standardization
NEC-15	Norma Ecuatoriana de la Construcción – Última actualización 2015
NTC	Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 (Normativa Italiana)
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
MIDUVI	Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (Ecuador)
RC	Reinforced Concrete (Hormigón Armado)
S	Acero (Steel)
IDR	Interstory Drift Ratio (Relación de Deriva entre Pisos)

SIMBOLOGÍA

m.	Metro
g.	Aceleración Gravitatoria
R	Coeficiente de Reducción
DE	Deriva de Entrepiso
E	Módulo de Elasticidad
f'c	Resistencia a la Compresión del Concreto
Fy	Límite Elástico del Acero
G	Módulo de Rigidez
I	Índice de Importancia Estructural
Kg	Kilogramo
KN	Kilonewtons
M	Momento
PGA	Peak Ground Acceleration (Aceleración Máxima del Terreno)
R	Factor de Reducción de Respuesta
Sa	Espectro de Aceleraciones
Sd	Desplazamiento Sísmico
T	Periodo Fundamental de Vibración
V	Cortante Basal

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estados Límites de Ocupación Estructural, (Magazine, 2022)	19
Figura 2. Normativa Aplicada en este Proyecto, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)	20
Figura 3. Factor de Reducción de Resistencia, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)	21
Figura 4. Colapso de estructura con irregularidad en elevación, (ResearchGate, s/f)...	22
Figura 5. Análisis de Sensibilidad, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)	22
Figura 6. Esquema de Metodología Empleada para el Desarrollo del Proyecto, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)/	29
Figura 7. Vista en Planta de la Estructura de Estudio, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024).	32
Figura 8. Vista en Planta del Modelo, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024).	34
Figura 9. Modelo 3D Inicial	37
Figura 10. Definición del Espectro de Sitio, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)	38
Figura 11. Asignación de valores limites en las rótulas, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)	39
Figura 12. Simbología Utilizada para Definir la Ubicación de Rotulas, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)	40
Figura 13. Gráfica de Desplazamiento máximo [cm], (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)	43
Figura 14. Gráfica de Deriva de Entre Piso [%], (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)	44
Figura 15. Ejemplo de Reforzamiento de Viga. (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024).....	45
Figura 16. Gráfica Comparativa entre las Normas, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)...	48
Figura 17. Gráfica Comparativa entre las Normas, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)...	52
Figura 18. Relación entre Limites de Derivas de las Normativas, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)	53
Figura 19. Rótulas Generadas en Columnas Push en Y, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)	53
Figura 20. Rótulas Generadas en Vigas Push en Y, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024).	54
Figura 21. Rótulas Generadas en Columnas Push en X, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)	54
Figura 22. Rótulas Generadas en Vigas Push en X, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024).	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Normativas Utilizada para el Análisis de Sensibilidad	30
Tabla 2. Características de los Materiales de la Estructura.....	33
Tabla 3. Características Generales de la Edificación	33
Tabla 4. Factor de Reducción de Respuesta (R o q)	34
Tabla 5. Coeficiente de Importancia.....	35
Tabla 6. Factores de Amplificación y Clasificación de Suelos.....	35
Tabla 7. Penalizaciones por Irregularidades	35
Tabla 8. Espectro de Respuesta y Aceleración Sísmica.....	35
Tabla 9. Rotaciones Máximas Permisibles.....	36
Tabla 10. Rotaciones Máximas Permisibles (ASCE 41, 22).....	36
Tabla 11. Secciones de columnas del Eje E2	40
Tabla 12. Área de Acero de Refuerzo Provisto en Columnas del Eje E2.....	41
Tabla 13. Demandas a Flexión en columnas del Eje E2.....	41
Tabla 14. Comparación de Parámetros Sísmicos entre Normativas.....	47
Tabla 15. Cumplimiento de Derivas	49
Tabla 16. Rotaciones Máximas y Rótulas Plásticas Push en Y	49
Tabla 17. Rotaciones Máximas y Rótulas Plásticas Push en X	50
Tabla 18. Resumen de Estrategias de Reforzamiento	56

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Ecuador, situado en el Cinturón de Fuego del Pacífico (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, 2015), es una zona con alta vulnerabilidad a terremotos, donde la seguridad estructural es crucial para mantener la integridad de sus construcciones y la vida de sus ocupantes. En este escenario, las regulaciones sísmicas juegan un rol crucial al definir los estándares y parámetros de diseño que aseguran un rendimiento apropiado de las estructuras frente a sucesos telúricos (Chopra, 2017). En su más reciente edición del 2015, la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC, 15) se consolida como el estándar nacional para el diseño resistente a terremotos (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2015); no obstante, muestra diferencias notables en relación con regulaciones internacionales como la norma de Estados Unidos (ASCE 7, 22) (American Society of Civil Engineers, 2022), la Norma Técnica Peruana (E.030, 18) (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú, 2018) y la Norma Técnica de Construcción Italiana (NTC, 2018) (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2018).

Estas discrepancias se manifiestan en aspectos fundamentales como los factores de reducción de respuesta R , los coeficientes de penalización o reducción por irregularidades en la estructura y las capacidades máximas permitidas en los componentes estructurales. La implementación de regulaciones internacionales en proyectos locales, en ocasiones sin una correcta adaptación, puede tener un impacto significativo en la valoración del rendimiento estructural y en el diseño de las estrategias de fortalecimiento sísmico (Chopra, 2017). Esto suscita preguntas acerca de la relevancia y efectividad de los criterios establecidos, además del efecto en los gastos y recursos destinados al fortalecimiento de estructuras.

El presente estudio se enfoca en analizar la sensibilidad de los parámetros normativos locales e internacionales y su efecto en el desempeño sísmico de una edificación de cinco pisos de hormigón armado, ubicada en el cantón Guayaquil, provincia del Guayas (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, 2015). La estructura, diseñada originalmente siguiendo los lineamientos de la (NEC, 15), servirá como caso de estudio

para evaluar cómo las variaciones en los parámetros normativos afectan las estrategias de reforzamiento y la respuesta sísmica de la edificación.

A través de la elección de componentes representativos del análisis por rendimiento y parámetros de demanda sísmica, se llevará a cabo un análisis comparativo empleando diversas regulaciones. Luego, se realizará un estudio de sensibilidad modificando la cantidad de estos parámetros para establecer su influencia en la estructura del refuerzo estructural, incluyendo las dosis de materiales y las dimensiones de los componentes de las estrategias aplicadas (Zhou & Gen, 2011). Este método facilitará la identificación de qué parámetros tienen un impacto significativo en las técnicas de reforzamiento y cuáles poseen un impacto reducido en el caso de estudio escogido.

La relevancia de este estudio reside en la necesidad de un enfoque completo y minucioso para valorar y mejorar el rendimiento sísmico de construcciones en Ecuador, teniendo en cuenta tanto las regulaciones locales como las internacionales. Los resultados alcanzados no solo ayudarán a incrementar la seguridad estructural de los edificios, sino que también facilitarán la optimización de los recursos y costos relacionados con el refuerzo sísmico. Además, los descubrimientos podrán funcionar como punto de referencia para futuras modificaciones normativas y prácticas de diseño resistente a terremotos en la nación.

Este estudio tiene como objetivo contribuir al saber técnico-científico en el campo de la ingeniería sísmica, ofreciendo instrumentos y criterios que habiliten a los expertos del campo a tomar decisiones fundamentadas en la elección y uso de regulaciones y estrategias de reforzamiento, ajustadas a las condiciones particulares de las construcciones y áreas sujetas a terremotos en Ecuador.

1.1. Antecedentes

Durante la historia, los sismos han representado uno de los peligros naturales más graves para las comunidades, provocando grandes pérdidas humanas y modificando el paisaje de las ciudades y regiones (Chopra, 2017). Diversos sucesos catastróficos demuestran la envergadura de este reto. Por ejemplo, el sismo de L'Aquila en Italia del 2009, de magnitud 6.3, causó más de 300 muertes y cuestionó la eficacia de los marcos

regulatorios en aquel momento (Fardis, 2009). Este acontecimiento subrayó el valor de normas sismorresistentes renovadas y en concordancia con las experiencias internacionales.

En América, Estados Unidos ha experimentado terremotos emblemáticos como el de Northridge en California, del año 1994 con una magnitud de 6.7, que, a pesar de su magnitud moderada, causó daños significativos en infraestructuras que estaban bajo cierto grado de regulación (American Society of Civil Engineers, 2022). El suceso motivó revisiones en la legislación de Estados Unidos, especialmente en la renovación de estándares como la ASCE 7. Estas medidas ayudaron a fortalecer el marco normativo y a subrayar la importancia de diseñar teniendo en cuenta niveles apropiados de ductilidad y disipación de energía (Chopra, 2017).

A escala regional, Perú ha sufrido sismos significativos, como el sismo de Pisco del 2007, con magnitud 8.0. Este desastre, con impactos devastadores en hogares y construcciones, puso de manifiesto las deficiencias en la implementación adecuada de regulaciones sísmicas e impulsó la evolución de la Norma Peruana E.030, persiguiendo un mayor rigor en el diseño y detalle estructural, además de una adaptación a la realidad geotécnica y sísmica del país (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú, 2018).

Estos aprendizajes a nivel mundial, desde Italia hasta Estados Unidos y Perú, evidencian que la efectividad de las normas sismorresistentes no es inmutable ni homogénea, sino que se transforma en base a las enseñanzas adquiridas en catástrofes previas, la investigación científica y los avances tecnológicos. Por lo tanto, comprender y contrastar diversas regulaciones sísmicas se convierten en tareas esenciales para asegurar construcciones más seguras, resistentes y capaces de enfrentar la variedad de amenazas sísmicas existentes en cada zona (Fardis, 2009).

Ecuador, localizado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, presenta esta propensión al sismo debido a la interacción entre las placas tectónicas de Nazca y Sudamérica (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, 2015). Durante su historia, el país ha sufrido numerosos terremotos de gran envergadura.

Uno de los sismos más antiguos y devastadores tuvo lugar en Riobamba en 1797, provocando la ruina de la ciudad y resultando en miles de personas afectadas (Egred, 2004). Durante el siglo XX, el sismo de 1906 en la costa de Esmeraldas, estimado en 8.8 Mw, es uno de los sismos más grandes documentados a nivel global y originó un tsunami que impactó las costas de Ecuador y Colombia (Kanamori, 1982).

El sismo del 16 de abril de 2016, de magnitud 7.8 Mw con epicentro en las provincias de Manabí y Esmeraldas, se destaca como uno de los sucesos más recientes y devastadores, provocando la muerte de más de 650 personas y daños considerables en edificaciones (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, 2016). Este suceso demostró la fragilidad de las construcciones actuales y la urgencia de renovar y fortalecer las regulaciones de edificación.

Estos sucesos de terremotos han subrayado la relevancia de disponer de regulaciones de edificación sismo-resistentes apropiadas y renovadas. La Norma Ecuatoriana de la Construcción ha progresado para incluir progresos en la ingeniería de terremotos y las enseñanzas obtenidas de sucesos históricos. La versión actual, (NEC, 15), define los estándares y requerimientos para el diseño resistente a terremotos en la nación (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2015).

A nivel internacional, normativas como la (ASCE 7, 22) en Estados Unidos proporcionan lineamientos detallados para cargas mínimas de diseño y criterios asociados para edificios y otras estructuras (American Society of Civil Engineers, 2022). En Europa, el Eurocódigo 8 es la norma que establece los requisitos para el diseño sismo-resistente de estructuras (Comité Europeo de Normalización (CEN), 2004). En países vecinos, la Norma Técnica (E.030, 18) de Diseño Sismorresistente de Perú ofrece directrices adaptadas a las condiciones sísmicas de la región (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú, 2018).

Hay diferencias notables entre la (NEC, 15) y las regulaciones internacionales respecto a aspectos como los factores de disminución de respuesta, sanciones por anomalías y capacidades máximas de los componentes estructurales. Estas divergencias pueden llevar a cambios en el diseño estructural y en el rendimiento sísmico de los edificios. Por ejemplo, el uso de diversos factores de comportamiento sísmico puede conducir a

diseños más o menos prudentes, impactando la seguridad y el gasto en edificación (Morales, 2017).

Es fundamental el estudio de la sensibilidad de estos parámetros para comprender su influencia en el rendimiento estructural y para perfeccionar las tácticas de reforzamiento. Varios métodos de reforzamiento, tales como la inclusión de muros de corte, reforzamientos con materiales compuestos y sistemas de aislamiento sísmico, se han utilizado para incrementar la resistencia sísmica de las estructuras ya existentes (Fardis, 2009).

La ciudad de Guayaquil, que es uno de los núcleos urbanos y económicos más importantes de Ecuador, enfrenta retos específicos debido a su localización geográfica y particularidades geotécnicas (Paz & Leigh, 2004). La investigación de construcciones comunes en esta ciudad, como edificaciones de cinco pisos de hormigón armado con pórticos resistentes, es esencial para formular estrategias de reforzamiento eficaces y ajustadas al entorno local.

Este estudio tiene como objetivo examinar la sensibilidad de las regulaciones locales e internacionales en el rendimiento sísmico y perfeccionar las tácticas de fortalecimiento en una construcción emblemática en Guayaquil. Los hallazgos ayudarán a perfeccionar las prácticas de diseño resistente a terremotos y a incrementar la seguridad estructural en Ecuador (Zhou & Gen, 2011).

1.2. Localización

El presente proyecto se basa en analizar una edificación de cinco pisos de hormigón armado, ubicada en el cantón Guayaquil, provincia del Guayas, Ecuador. Esta edificación se encuentra en la Zona Sísmica V con respecto al mapa sísmico de la (NEC, 15), así mismo se encuentra cimentada sobre un suelo tipo E. Debido a la confidencialidad y derechos de diseño del proyecto, no se pudo definir la ubicación exacta del proyecto, la misma que no es indispensable para el desarrollo del presente trabajo de titulación.

1.3. Estudios previos

El desarrollo del presente proyecto se basa en una serie de estudios y datos recopilados previamente, los cuales son fundamentales para el análisis estructural y sísmico de la edificación de cinco pisos ubicada en el cantón Guayaquil. A continuación, se detallan los estudios previos más relevantes:

Se tiene la información del estudio geotécnico, el cual fue realizado en el terreno donde se ubica la edificación, con el objetivo de caracterizar las propiedades del suelo y determinar su influencia en el comportamiento estructural y sísmico de la construcción. Así mismo se cuenta con los planos arquitectónicos y estructurales originales de la edificación.

Por otro lado se han revisado las normativas vigentes que regirán el análisis y diseño en el proyecto: NEC-15, ASCE 7-22 para comparar y analizar diferencias en parámetros sísmicos y criterios de diseño, la E.030 y NTC 2018 para ampliar el análisis comparativo y considerar prácticas internacionales reconocidas. La comprensión de las normativas permite identificar las discrepancias en los parámetros de diseño y evaluar su influencia en el desempeño sísmico de la edificación, objetivo central de este estudio.

La recopilación y análisis de estos estudios previos proporcionan una base sólida para el desarrollo del proyecto. Al contar con información detallada sobre las condiciones geotécnicas, sísmicas y estructurales, es posible realizar un análisis riguroso y preciso de la edificación. Además, permite identificar los parámetros críticos que influirán en la optimización de las estrategias de reforzamiento, asegurando que las soluciones propuestas sean efectivas y adecuadas al contexto específico de la edificación y su entorno.

1.4. Problemática a resolver

La problemática existente se basa en que la normativa sísmica nacional (NEC, 15) con respecto a las normas internacionales; (ASCE 7, 22), (E.030, 18) y la (NTC, 2018), presentan diferencias significativas en términos de parámetros de evaluación sísmica. Por citar algunos: factores de reducción de respuesta, factores de penalización por irregularidad de la configuración estructural y capacidades máximas en elementos

estructurales. Debido a las limitantes de la norma local, se acostumbra a adoptar normas internacionales que se asemejan al contexto local o normativas que han desarrollado avances investigativos entorno a criterios sismorresistentes. Lo que puede influir en los resultados de la evaluación del desempeño estructural y configuración de técnicas de reforzamiento de manera considerable.

Para esto se plantea seleccionar elementos representativos del análisis por desempeño de estructuras y parámetros de demanda sísmica, para posteriormente realizar el reforzamiento de un caso de estudio teniendo en cuenta estas variables. El caso de estudio constituye un edificio de cinco pisos de hormigón armado, con pórticos resistentes a momento, siguiendo los lineamientos vigentes de la Norma ecuatoriana de la construcción. Finalmente se realizará el análisis de sensibilidad que consiste en variar la magnitud de estos parámetros para determinar cómo se vería afectada la configuración del reforzamiento estructural, por ejemplo cantidades de materiales o dimensiones de los elementos de la estrategia implementada. Así mismo como cambiaría su respuesta sísmica. De esta manera se podrá establecer que parámetros influyen considerablemente dentro de la técnica de reforzamiento y cuales tienen menor impacto para el caso de estudio seleccionado.

En resumen, la problemática aborda la necesidad de un enfoque integral y detallado para evaluar y optimizar el desempeño sísmico para el caso de estudio, considerando tanto la normativa local como internacionales. Este enfoque no solo mejora la seguridad estructural, sino que también optimizará los recursos y costos asociados al reforzamiento sísmico.

1.5. Justificación

Es fundamental resolver esta problemática para mejorar la seguridad sísmica de las edificaciones en Ecuador, un país altamente vulnerable a eventos telúricos. Las diferencias entre la NEC-15 y normativas internacionales pueden llevar a diseños estructurales inadecuados, afectando la integridad de las construcciones y la seguridad de las personas. Analizar la sensibilidad de los parámetros normativos y optimizar las estrategias de reforzamiento permite resolver problemas prácticos de ingeniería al diseñar estructuras más seguras y eficientes.

Ecuador, como país en vías de desarrollo, enfrenta limitaciones en la investigación y desarrollo de su propia normativa sismorresistente, lo que lo lleva a adoptar regulaciones y estándares internacionales. Sin embargo, los parámetros de estas normas suelen estar definidos en función de contextos geográficos, geotécnicos y económicos distintos a los ecuatorianos, generando el reto de ajustar o reinterpretar esos criterios para responder adecuadamente a las condiciones y necesidades locales.

Este enfoque contribuye directamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible:

- ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura
Meta 9.1: Desarrollar infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes y de calidad para apoyar el desarrollo económico y el bienestar humano.

Contribución del proyecto:

1. Al optimizar estrategias de reforzamiento sísmico, el proyecto mejora la resiliencia y seguridad de las infraestructuras existentes.
2. Promueve prácticas de ingeniería innovadoras al analizar y comparar normativas sísmicas locales e internacionales, fomentando la modernización y eficiencia en la construcción.

- ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles
Meta 11.1: Asegurar el acceso de todas las personas a viviendas y servicios básicos adecuados, seguros y asequibles.

Contribución del proyecto:

1. Mejora la seguridad de las edificaciones residenciales, garantizando viviendas más seguras frente a eventos sísmicos.
2. Reduce el riesgo de pérdidas humanas y materiales en comunidades urbanas densamente pobladas como Guayaquil.

Meta 11.b: Aumentar el número de ciudades y asentamientos humanos que adoptan e implementan políticas y planes integrados para la inclusión, la eficiencia

de los recursos, la mitigación y adaptación al cambio climático, y la resiliencia a los desastres.

Contribución del proyecto:

1. Proporciona información valiosa para la actualización y mejora de normativas sísmicas, promoviendo políticas que incrementen la resiliencia urbana.
2. Fomenta la planificación urbana sostenible al considerar la gestión de riesgos en el diseño estructural.

Al abordar esta problemática, se mejora la resiliencia urbana, se protegen vidas y bienes, y se optimiza el uso de recursos en proyectos de construcción, generando un impacto positivo en la sociedad y en el desarrollo sostenible del país.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo General

Analizar la sensibilidad de los parámetros normativos sísmicos locales e internacionales en el desempeño sísmico de una edificación de cinco pisos, identificando los parámetros que influyen significativamente en la configuración del reforzamiento, con el fin de mejorar la seguridad estructural y la eficiencia en el uso de recursos en proyectos de ingeniería sísmica.

1.6.2. Objetivos Específicos

Para lograr el objetivo general propuesto, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Comparar los parámetros sísmicos clave entre las normas propuestas, enfocándose en: factores de reducción de respuesta, penalizaciones por irregularidades en la configuración estructural y capacidades máximas permitidas en elementos estructurales.
- Evaluar el desempeño sísmico de la edificación de cinco pisos utilizando los parámetros de las normativas seleccionadas, mediante: Modelado estructural detallado de la edificación.

- Identificar los parámetros normativos que influyen significativamente en las estrategias de reforzamiento y en el desempeño sísmico, así como aquellos con menor impacto, del análisis de sensibilidad.
- Optimizar las estrategias de reforzamiento estructural basándose en los hallazgos obtenidos, considerando la eficiencia en el uso de materiales y recursos, la reducción de costos asociados al reforzamiento y el cumplimiento de los niveles de seguridad estructural requeridos.

CAPÍTULO 2

DESARROLLO DEL PROYECTO

2.1. Marco conceptual

El presente estudio se fundamenta en una serie de conceptos clave que integran el ámbito de la ingeniería sísmica, el análisis estructural y la optimización de recursos en el reforzamiento de edificaciones. A continuación, se detallan los elementos conceptuales esenciales que sustentan la investigación:

2.1.1. Desempeño Sísmico de Estructuras

El desempeño sísmico se refiere a la capacidad de una edificación para resistir y responder adecuadamente a las solicitaciones impuestas por movimientos sísmicos, minimizando daños estructurales y no estructurales, y protegiendo la vida de los ocupantes (Chopra, 2017; Fardis, 2009; Moehle, 2015; Priestley et al., 2007). Este concepto es fundamental para garantizar la seguridad y funcionalidad de las construcciones ubicadas en zonas de alta actividad sísmica, como es el caso de Guayaquil (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, 2015).

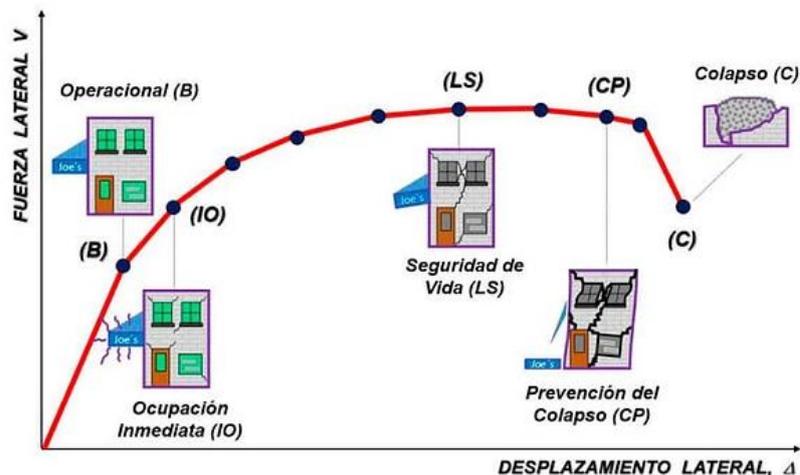


Figura 1. Estados Límites de Ocupación Estructural, (Magazine, 2022)

La evaluación del desempeño sísmico permite establecer criterios de diseño que aseguren que las estructuras puedan soportar los efectos de los sismos previstos durante su vida útil (Panagiotakos & Fardis, 1999). Esto implica considerar la ductilidad,

capacidad de disipación de energía y deformaciones aceptables, garantizando que, tras un evento sísmico, la edificación conserve su integridad estructural y funcionalidad operativa (Priestley et al., 2007).

2.1.2. Normativas Sísmicas

Las normativas sísmicas son conjuntos de regulaciones que establecen los criterios y parámetros para el diseño sismo-resistente de edificaciones. Incluyen directrices sobre cargas sísmicas, métodos de análisis, detallado estructural y requisitos de materiales. La (NEC, 15) es la normativa local en Ecuador, mientras que normativas internacionales como la norma de Estados Unidos (ASCE 7, 22), la Norma Peruana (E.030, 18) y la Norma Italiana (NTC, 2018) ofrecen enfoques alternativos y actualizados basados en investigaciones recientes y experiencias globales (Chopra & Goel, 1999; Pauley & Priestley, 1992).

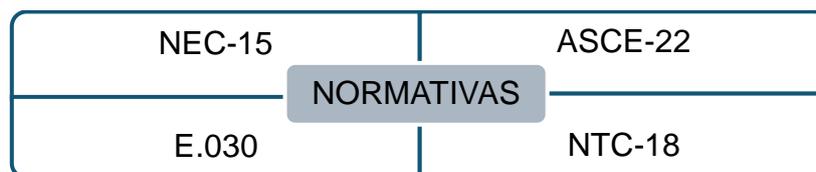


Figura 2. Normativa Aplicada en este Proyecto, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)

Estas normativas buscan asegurar un nivel aceptable de seguridad estructural, adaptándose a las características sísmicas de cada región. La comparación y análisis de diferentes normativas permiten identificar discrepancias y oportunidades de mejora en los criterios de diseño locales, promoviendo prácticas más robustas y eficientes (Erduran & Ruicon, 2010; Pampanin, 2012).

2.1.3. Factores de Reducción de Respuesta (R)

Los factores de reducción de respuesta, comúnmente denominados factores R, representan la capacidad de una estructura para disipar energía a través de deformaciones inelásticas, permitiendo reducir las fuerzas sísmicas de diseño en comparación con un comportamiento elástico ideal (Fardis, 2009). Estos factores dependen del sistema estructural, la ductilidad y la redundancia, variando entre normativas y tipos de estructuras (Miranda & Bertero, 1994).

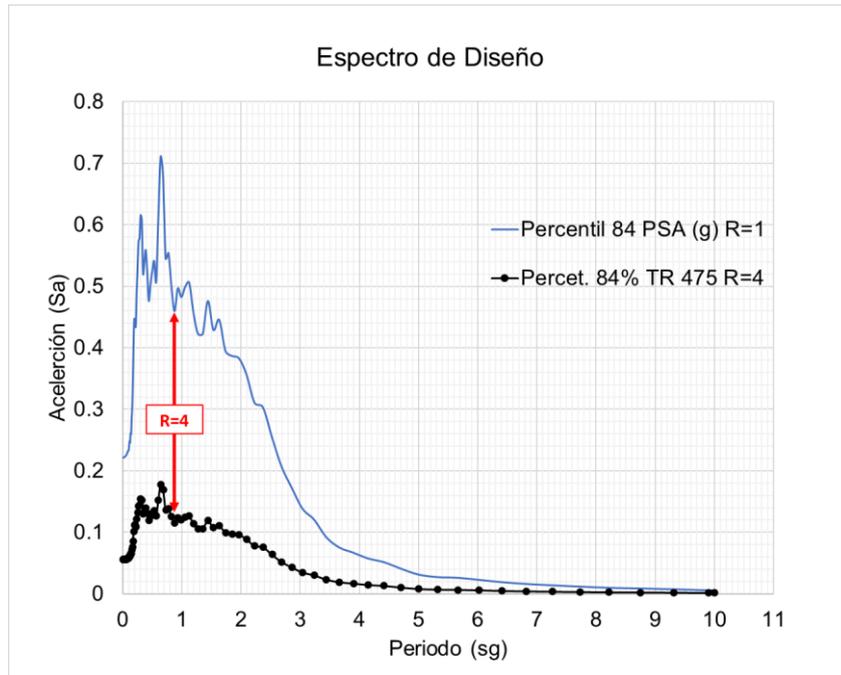


Figura 3. Factor de Reducción de Resistencia, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)

La correcta aplicación de los factores R es crucial para lograr un equilibrio entre seguridad y economía en el diseño (Priestley et al., 2007). Un valor apropiado de R garantiza que la estructura pueda soportar deformaciones significativas sin colapsar, aprovechando su capacidad de ductilidad y evitando sobredimensionamientos que incrementen innecesariamente los costos.

2.1.4. Irregularidades Estructurales

Las irregularidades estructurales, tanto en planta como en elevación, afectan el comportamiento sísmico al generar concentraciones de esfuerzos y deformaciones no deseadas (Paz & Leigh, 2004). Estas irregularidades pueden deberse a variaciones en la rigidez, masa, resistencia o geometría de la estructura, provocando respuestas asimétricas y potenciales puntos débiles (Chopra & Goel, 1999).

Las normativas sísmicas penalizan estas irregularidades mediante factores de modificación o requisitos adicionales de diseño para mitigar los efectos adversos (ASCE 7, 22; E.030, 18; NTC, 2018). Por ello, identificar y cuantificar las irregularidades es esencial para garantizar un desempeño sísmico adecuado, permitiendo implementar soluciones que equilibren la respuesta estructural y eviten daños excesivos.



Figura 4. Colapso de estructura con irregularidad en elevación, (ResearchGate, s/f)

2.1.5. Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad es una técnica que evalúa cómo la incertidumbre en la salida de un modelo numérico o sistema puede atribuirse a diferentes fuentes de incertidumbre en sus entradas (Saltelli et al., 2008). En ingeniería estructural y sísmica, permite determinar cómo las variaciones en los parámetros de diseño, materiales, cargas y otras variables afectan el comportamiento y desempeño de una estructura bajo cargas sísmicas (Chan, 2000).

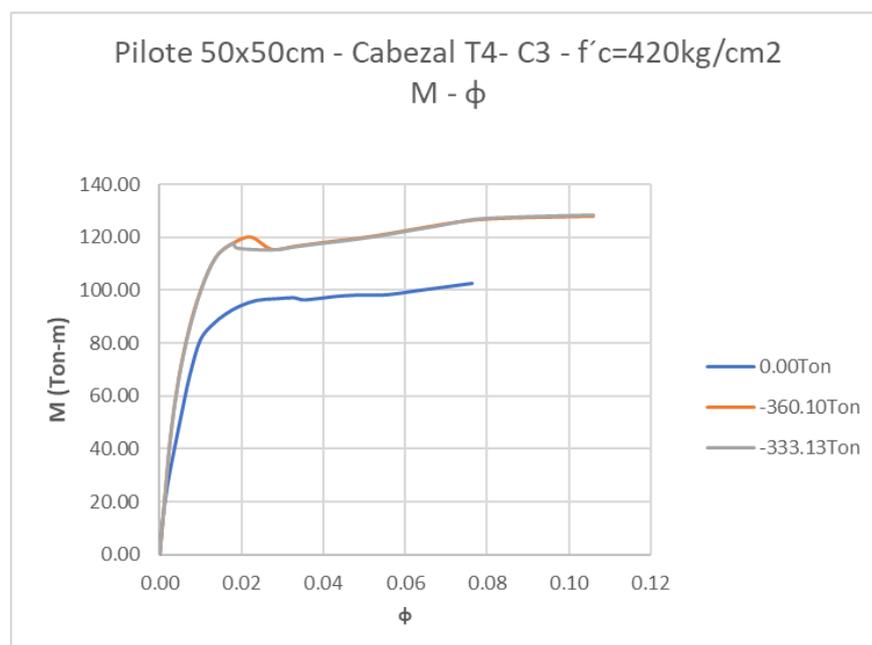


Figura 5. Análisis de Sensibilidad, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)

Comprender la sensibilidad de un sistema estructural a diferentes variables es esencial para garantizar que los diseños sean robustos y seguros (Maffei & Yuen, 2007). Al identificar los parámetros con mayor impacto en la respuesta estructural, los ingenieros pueden optimizar el diseño y el reforzamiento de las edificaciones para resistir mejor los eventos sísmicos.

2.1.5.1. Importancia en Ingeniería Sísmica:

El análisis de sensibilidad desempeña un papel crucial en la ingeniería sísmica por varias razones fundamentales:

Identificación de Parámetros Críticos

Una de las principales ventajas del análisis de sensibilidad es su capacidad para identificar los parámetros que tienen mayor influencia en la respuesta estructural (Zhou & Gen, 2011). Al determinar cuáles variables afectan más significativamente el comportamiento de la estructura ante cargas sísmicas, es posible enfocar los esfuerzos de diseño y reforzamiento en optimizar estos aspectos específicos. Por ejemplo, si se descubre que la rigidez de ciertos elementos es un factor crítico, se pueden implementar medidas para aumentarla, mejorando así el desempeño sísmico general (Priestley et al., 2007).

Optimización del Diseño y Reforzamiento

El análisis de sensibilidad facilita la selección de estrategias de diseño y reforzamiento más eficientes. Al comprender cómo diferentes variables influyen en el comportamiento estructural, los ingenieros pueden elegir materiales, secciones estructurales y técnicas constructivas que maximicen la resistencia y ductilidad de la edificación. Esto no solo mejora la seguridad, sino que también puede resultar en ahorros significativos de costos al evitar sobre diseños o intervenciones innecesarias (Priestley et al., 2007).

Gestión de la Incertidumbre

En ingeniería sísmica, existe una incertidumbre inherente en varios parámetros, como las propiedades exactas de los materiales, la intensidad y características del evento sísmico y las condiciones del suelo. El análisis de sensibilidad permite cuantificar el efecto de estas incertidumbres, proporcionando una medida de cómo las variaciones en

los parámetros de entrada pueden afectar la respuesta estructural. Esto es vital para desarrollar diseños más robustos que mantengan su desempeño incluso cuando las condiciones reales difieren de las estimadas (Saltelli et al., 2008).

2.1.5.2. Metodologías de Análisis de Sensibilidad:

Existen varias metodologías para llevar a cabo un análisis de sensibilidad, cada una con sus propias ventajas y limitaciones:

2.1.5.2.1. Análisis Univariado (One-at-a-Time)

Este enfoque consiste en variar un parámetro mientras se mantienen los demás constantes, observando el efecto en la salida del modelo. Es sencillo de implementar y proporciona una visión directa de la influencia individual de cada variable. Sin embargo, no captura las interacciones entre variables, lo que puede ser una limitación en sistemas donde los parámetros están interrelacionados (Helton & Davis, 2003).

2.1.5.2.2. Análisis Multivariado

El análisis multivariado implica la variación simultánea de múltiples parámetros, permitiendo evaluar interacciones y efectos combinados. Aunque es más complejo y requiere mayor capacidad computacional, ofrece una comprensión más completa y realista del sistema. Es especialmente útil cuando se sospecha que las variables pueden tener efectos sinérgicos o contrapuestos en la respuesta estructural (Chan, 2000).

2.1.5.3. Herramientas y Técnicas Utilizadas para el Análisis de Sensibilidad

En este proyecto, se empleará el software ETABS para realizar el análisis estructural y sísmico de la edificación. ETABS es una herramienta avanzada que permite modelar estructuras complejas y simular su comportamiento bajo diferentes escenarios de carga, incluyendo cargas sísmicas (Mazzoni et al., 2006). El uso de ETABS nos permite:

- **Modelado Estructural:** ETABS facilita la creación de modelos tridimensionales precisos de la edificación, incorporando las propiedades de materiales, geometría, condiciones de soporte y cargas aplicadas.

- **Análisis Sísmico:** Permite realizar análisis estáticos y dinámicos, lineales y no lineales, para evaluar la respuesta de la estructura ante eventos sísmicos.
- **Variación de Parámetros:** El software posibilita la modificación de parámetros clave, como las propiedades de los materiales, secciones estructurales y condiciones de carga, lo que es esencial para el análisis de sensibilidad.

La Integración con el Análisis de Sensibilidad nos permite:

- **Automatización de Simulaciones:** Mediante el uso de secuencias de comandos o herramientas de automatización, se pueden realizar múltiples simulaciones variando los parámetros de interés.
- **Análisis de Resultados:** ETABS proporciona resultados detallados que pueden ser exportados y analizados para determinar el impacto de las variaciones en los parámetros sobre la respuesta estructural.

2.1.5.4. Aplicación en el Proyecto:

En este estudio, el análisis de sensibilidad se empleará para:

2.1.5.4.1. Evaluación del Impacto de Parámetros Normativos

Se analizará cómo las variaciones en los parámetros normativos afectan el desempeño sísmico de la edificación. Esto incluye factores como los factores de reducción de respuesta (R), las penalizaciones por irregularidades estructurales y las capacidades máximas de los elementos. Al comprender el impacto de estos parámetros, se puede evaluar la adecuación de las normativas actuales y proponer ajustes que mejoren la seguridad y eficiencia del diseño (Fardis, 2009).

2.1.5.4.2. Optimización de Estrategias de Reforzamiento

El análisis de sensibilidad ayudará a identificar los parámetros que más influyen en la configuración y efectividad del reforzamiento. Esto permitirá enfocar los esfuerzos en soluciones que ofrezcan mayores beneficios en términos de seguridad y costo. Por ejemplo, si se determina que el refuerzo de ciertas columnas mejora significativamente el comportamiento sísmico, estas intervenciones pueden priorizarse en el plan de reforzamiento (Fardis, 2009).

2.1.5.4.3. Informar Decisiones de Diseño

Al proporcionar información cuantitativa sobre el impacto de diferentes variables, el análisis de sensibilidad apoyará la toma de decisiones informadas en el diseño estructural. Esto incluye priorizar intervenciones que mejoren significativamente el desempeño sísmico y la eficiencia en el uso de recursos, y justificar técnicamente las elecciones de diseño ante las autoridades y partes interesadas (Fardis, 2009).

2.1.5.5. Beneficios y Limitaciones del Análisis de Sensibilidad:

2.1.5.5.1. Beneficios

Además de los aspectos ya mencionados, el análisis de sensibilidad ofrece otros beneficios importantes, los cuales son:

- **Mejora de la Comprensión del Sistema:** Proporciona una visión más profunda de cómo funciona la estructura y cómo responde a diferentes estímulos, lo que es valioso para la formación y desarrollo profesional (Chan, 2000; Chopra & Goel, 1999; Saltelli et al., 2008).
- **Detección de Errores Modelísticos:** Al variar sistemáticamente los parámetros, es posible identificar inconsistencias o errores en el modelo que podrían pasar desapercibidos de otra manera (Chan, 2000; Chopra & Goel, 1999; Saltelli et al., 2008).
- **Apoyo en la Validación y Verificación:** Los resultados del análisis de sensibilidad pueden compararse con datos experimentales o de campo, ayudando a validar el modelo y aumentar la confianza en sus predicciones (Chan, 2000; Chopra & Goel, 1999; Saltelli et al., 2008).

2.1.5.5.2. Limitaciones

Es importante tener en cuenta que el análisis de sensibilidad también tiene limitaciones:

- **Requerimientos Computacionales:** Los análisis multivariados y probabilísticos pueden ser exigentes en términos de tiempo y recursos computacionales.
- **Complejidad en la Interpretación:** Los resultados pueden ser complejos de interpretar, especialmente cuando hay interacciones significativas entre variables.

- Calidad de los Datos de Entrada: La precisión del análisis depende de la calidad y fiabilidad de los datos de entrada. Incertidumbres significativas en los parámetros pueden afectar la utilidad de los resultados.

2.1.6. Optimización de Estrategias de Reforzamiento

La optimización de las estrategias de reforzamiento busca encontrar la mejor solución posible dentro de un conjunto de alternativas, considerando criterios como eficacia, costo y factibilidad (Zhou & Gen, 2011). En el contexto del reforzamiento estructural, implica seleccionar técnicas y materiales que maximicen el desempeño sísmico mientras minimizan costos y recursos, adaptándose a las condiciones específicas de la edificación y su entorno (Priestley et al., 2007).

En este proyecto, para las técnicas de reforzamiento se considerará el modo de falla de cada elemento estructural, utilizando hojas de cálculo en Excel. Este enfoque permitirá analizar detalladamente el comportamiento individual de vigas, columnas y otros componentes, identificando las posibles fallas y diseñando intervenciones específicas para cada caso (Fardis, 2009).

2.1.6.1. Enfoques de Optimización

2.1.6.1.1. Optimización Mono-Objetivo

Se enfoca en un solo criterio, como minimizar el costo o maximizar la seguridad estructural. Aunque simplifica el problema, puede no capturar la complejidad de las decisiones prácticas que involucran múltiples factores (Zhou & Gen, 2011).

2.1.6.1.2. Optimización Multi-Objetivo

Considera simultáneamente múltiples criterios, buscando un equilibrio entre ellos (por ejemplo, costo y desempeño sísmico). Este enfoque es más realista y aplicable en situaciones donde se deben satisfacer diversas restricciones y objetivos (Zhou & Gen, 2011).

2.1.6.2. Técnicas de Reforzamiento Basadas en el Modo de Falla

2.1.6.2.1. Análisis del Modo de Falla

- Identificación de Modos de Falla: Mediante hojas de cálculo en Excel, se analizará el comportamiento de cada elemento estructural bajo las solicitaciones sísmicas, determinando los modos de falla más probables (flexión, cortante, pandeo, etc.) (Pauley & Priestley, 1992).
- Diseño de Intervenciones Específicas: Con base en el modo de falla identificado, se seleccionarán técnicas de reforzamiento adecuadas para cada elemento, optimizando su capacidad y asegurando un comportamiento dúctil (Pauley & Priestley, 1992).

2.1.6.2.2. Métodos Convencionales

- Incremento de Secciones: Aumento de las dimensiones de vigas y columnas para mejorar su capacidad resistente (Pauley & Priestley, 1992).
- Adición de Armadura de Refuerzo: Incremento del refuerzo longitudinal o transversal para mejorar la resistencia a flexión y cortante (Pauley & Priestley, 1992).
- Mejora del Detallado Estructural: Corrección de deficiencias en el anclaje y confinamiento del refuerzo (Pauley & Priestley, 1992).

2.1.6.2.3. Métodos Innovadores

- Uso de Materiales Compuestos (FRP): Aplicación de láminas o tejidos de fibra de carbono o vidrio para incrementar la resistencia y rigidez sin aumentar significativamente el peso (Maffei & Yuen, 2007).
- Dispositivos de Disipación de Energía: Instalación de amortiguadores o disipadores que absorben parte de la energía sísmica, reduciendo las demandas sobre la estructura principal (Maffei & Yuen, 2007).

2.1.6.3. Aplicación en el Proyecto

La optimización de las estrategias de reforzamiento se basará en los resultados del análisis de sensibilidad y del análisis detallado de los modos de falla de los elementos estructurales:

- A través del análisis en ETABS y el estudio de fallas en Excel, se determinarán los elementos que requieren intervención prioritaria.

2.2. Marco metodológico

En esta sección se describe de manera detallada la metrología empleada para alcanzar los objetivos propuestos, la Figura 6 presenta un resumen de las actividades y procesos realizados como parte del marco metodológico:

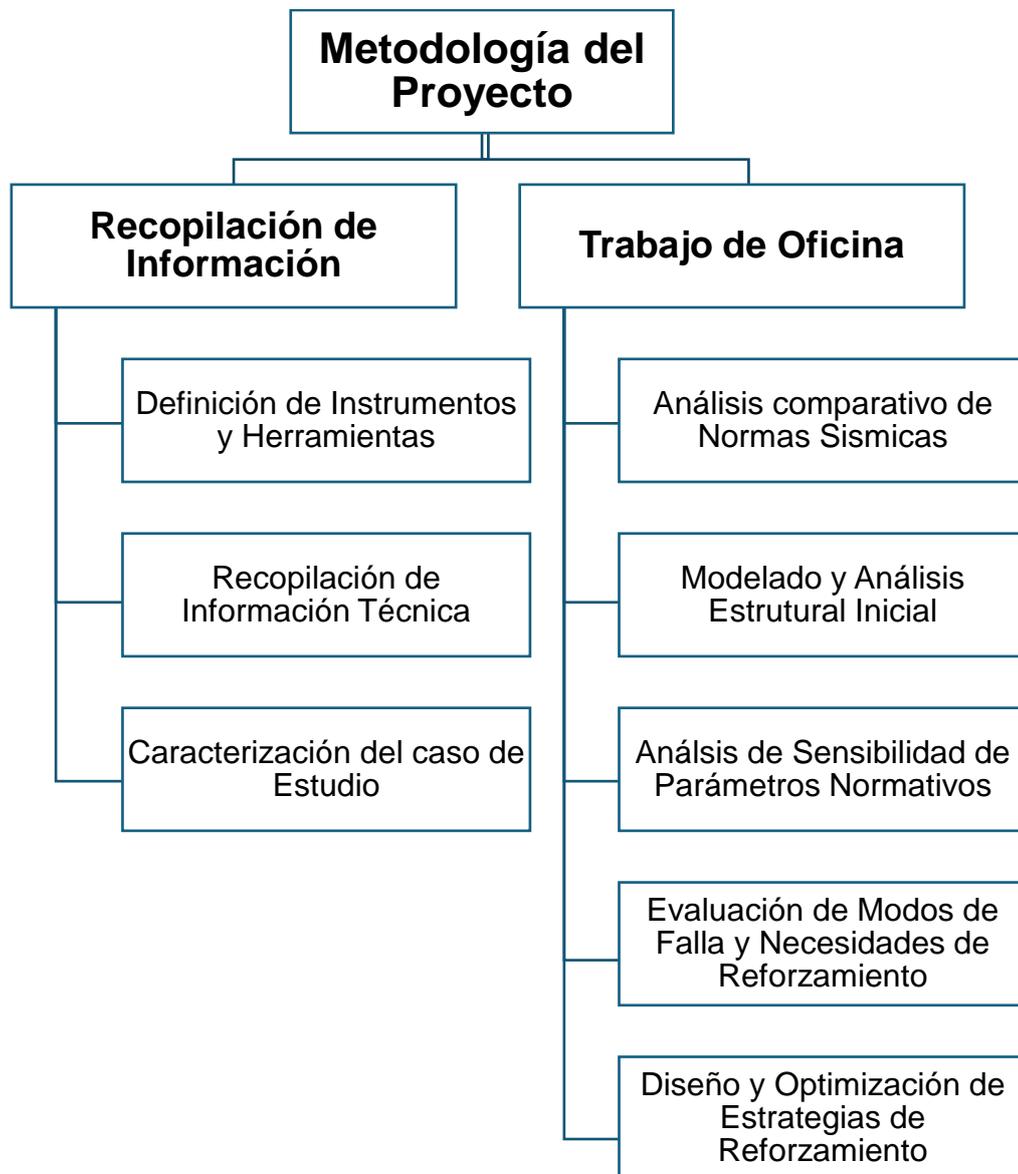


Figura 6. Esquema de Metodología Empleada para el Desarrollo del Proyecto, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)/

A continuación se detallan cada uno de los procesos enlistados en la Ilustración anterior:

2.2.1. Recopilación de Información Técnica

Esta sección abarca las actividades realizadas en el sitio de estudio para recopilar los instrumentos, herramientas e información esencial sobre la edificación y su entorno.

2.2.1.1. Definición de Instrumento y Herramientas

Inicialmente se definen los instrumentos y herramientas utilizados para elaborar el presente trabajo de titulación, los mismo que se enlistan a continuación:

2.2.1.1.1. Software de Análisis Estructural

Como se mencionó con anterioridad el software utilizado para la modelación y análisis estructural fue ETABS, el cual permitió simular el comportamiento sísmico de la edificación bajo diferentes escenarios y parametrizaciones normativa.

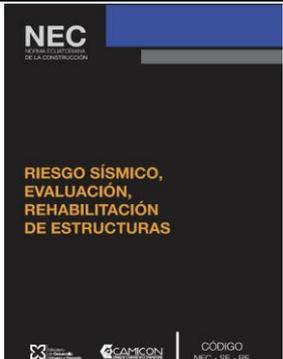
2.2.1.1.2. Software para Cálculos Matemáticos

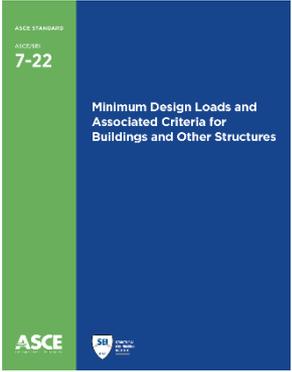
Para el análisis a detalle de los modos de falla de los elementos estructurales analizados y para la evaluación e implementación de estrategias de reforzamiento, se implementó hojas de cálculo de Microsoft Excel.

2.2.1.1.3. Normativas para la Selección Paramétrica

A continuación de enlistan las normas utilizadas para determinar los parámetros normativos:

Tabla 1. Normativas Utilizada para el Análisis de Sensibilidad

	<ul style="list-style-type: none">• Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC, 15): Norma base para el diseño sismorresistente en el contexto nacional, reflejando las condiciones geotécnicas, sísmicas y constructivas ecuatorianas.
---	---

	<ul style="list-style-type: none"> • Norma de Estados Unidos (ASCE 7, 22): Estándar internacionalmente reconocido por su rigor técnico y actualización constante. Ofrece lineamientos detallados para cargas sísmicas y criterios de diseño, constituyendo un referente clave en la ingeniería estructural y sismorresistente.
	<ul style="list-style-type: none"> • Norma Peruana de la Construcción (E.030, 18): Proveniente de un país con condiciones sísmicas similares a las de Ecuador, esta normativa aporta un marco para edificaciones de tipologías comparables (pórticos de hormigón armado con muros de mampostería), permitiendo contrastar requerimientos y enfoques adaptados a la realidad andina.
	<ul style="list-style-type: none"> • Norma Italiana de la Construcción (NTC, 2018): Proporciona una perspectiva europea en el diseño sismorresistente, lo que facilita el análisis comparativo y la identificación de diferencias en parámetros clave. Su aplicación resulta útil para examinar cómo otros contextos con marcos normativos avanzados enfrentan el diseño de pórticos de hormigón.

Autor: (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)

2.2.1.2. Descripción General de la Edificación

Posteriormente se recopiló la información técnica necesaria para poder realizar el análisis de sensibilidad y la implementación de las técnicas de reforzamiento, la información mencionada es la siguiente:

2.2.1.2.1. Ubicación Precisa del Proyecto

La edificación se encuentra ubicada en el cantón Guayaquil, provincia del Guayas, Ecuador. Como se había mencionado anteriormente, esta edificación se encuentra en la Zona V con respecto al mapa sísmico de la NEC-15, así mismo se encuentra cimentada sobre un suelo tipo E. Debido a la confidencialidad y derechos de diseño del proyecto,

no se puede mencionar la ubicación exacta del proyecto, la misma que no es indispensable para el desarrollo del presente trabajo de titulación.

2.2.1.2.2. Información Arquitectónica

La edificación se encuentra conformada arquitectónicamente por 6 plantas, cuenta con un área de implantación aproximada de 550 m², la cual se repite en los 3 niveles altos y la terraza accesible, así como el nivel de subsuelo y planta baja. La altura entre piso es de 3.50 m en la mayoría de los niveles llegando a una altura total de la edificación de 22.50 m, considerando la sobrecubierta por encima de la terraza accesible.



Figura 7. Vista en Planta de la Estructura de Estudio, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024).

2.2.1.2.3. Uso y Funcionalidad:

El subsuelo del edificio está destinado a parqueos de los usuarios del edificio, contando con un total de 23 parqueos y un área destinada para cuartos de máquinas o instalaciones necesarias para el funcionamiento de la edificación. La planta baja y el mezanine son destinados al uso comercial con 5 locales comerciales por planta. En los pisos superiores (3 niveles altos) se instalan las oficinas. Finalmente la terraza presenta otras instalaciones como enfermería, auditorio y servicios varios, combinados con un área verde exterior.

2.2.1.2.4. Sistema Estructural:

El sistema estructural de la edificación está constituido por pórticos resistentes a momentos de hormigón armado, los cuales tienen la capacidad de resistir las fuerzas

laterales producidas por el sismo de diseño. La cimentación está formada por pilotes de hormigón pretensado.

Los materiales y resistencias utilizadas para el diseño del Bloque E se muestran a continuación:

Tabla 2. Características de los Materiales de la Estructura

Material	Descripción	Elementos	Características
Hormigón	fc 280	Columnas Vigas Losas Otros elementos	$f_c = 280 \text{ kgf/cm}^2$ $E = 252671 \text{ kgf/cm}^2$ $\gamma_c = 2.40 \text{ T/m}^3$
Acero Estructural	ASTM A36	Pérgolas	$F_y = 2520 \text{ kgf/cm}^2$ $E = 2.100,000 \text{ kgf/cm}^2$ $\gamma_s = 7.85 \text{ T/m}^3$
Acero de Refuerzo	Fy 4200	Columnas Vigas Losas Otros elementos	$F_y = 4200 \text{ kgf/cm}^2$ $E = 2.100,000 \text{ kgf/cm}^2$ $\gamma_s = 7.85 \text{ T/m}^3$

Autor: (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)

En la Tabla 3, se muestra el resumen ejecutivo de las características generales de la edificación:

Tabla 3. Características Generales de la Edificación

Ubicación	Cantón Guayaquil, provincia del Guayas, Ecuador
Uso y Funcionalidad	Destinadas para uso de locales, oficinas, y residencias
Sistema Estructural	Pórticos de hormigón armado resistentes a momento
Vigas	Vigas Principales con Sección VP 30x50 cm Vigas Secundarias con Sección V 25X40 cm
Columnas	Columnas de Sección C 50x40 cm
Losa	Losa Nervada de 20 cm

Autor: (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)

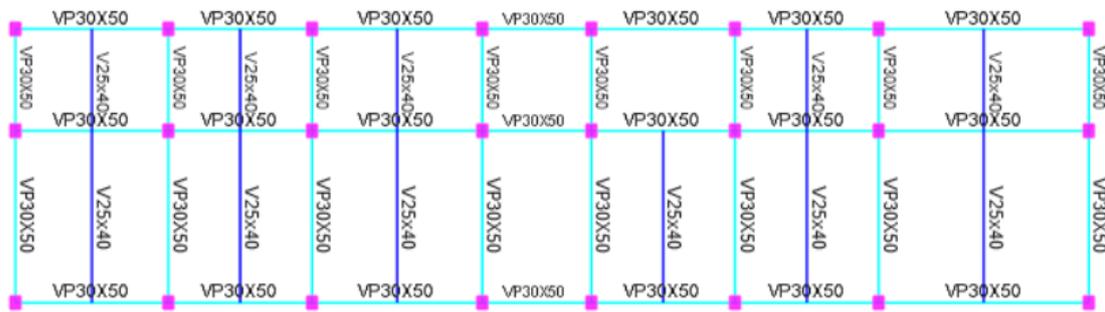


Figura 8. Vista en Planta del Modelo, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024).

2.2.2. Trabajo de Oficina

Este capítulo se centra en las actividades de análisis y modelado estructural realizadas en un entorno computacional, equiparado al trabajo de laboratorio.

2.2.2.1. Análisis Comparativo de Normativas Sísmicas

Se llevó a cabo una revisión detallada de las normativas sísmicas, comenzando con el estudio de la NEC-15 para analizar los parámetros sísmicos y los requisitos de diseño específicos en Ecuador. Seguidamente, se examinaron las normativas internacionales seleccionadas para la parametrización. A través de esta revisión, se identificaron parámetros clave como el factor de reducción de respuesta (R o q), los espectros de respuesta sísmica, las penalizaciones por irregularidades estructurales, los límites de derivas permisibles y los requisitos de detallado y capacidad de los elementos estructurales. Posteriormente, se elaboraron tablas comparativas con valores específicos de cada normativa para facilitar un análisis crítico de las discrepancias y evaluar su posible impacto en el diseño y desempeño estructural.

Tabla 4. Factor de Reducción de Respuesta (R o q)

Sistema Estructural	NEC-15 (R)	ASCE 7-22 (R)	E.030 (R)	NTC (q)
Pórticos especiales de hormigón armado	5	8	7	4
Pórticos intermedios de hormigón armado	3.5	5	-	-
Muros estructurales de hormigón armado	4	6.5	6	3
Sistemas duales (pórticos y muros)	5	7	7	-

Pórticos de acero con alta ductilidad	-	8	-	5
---------------------------------------	---	---	---	---

Autor: (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)
Fuente: (ASCE 7, 22; E.030, 18; NEC, 15; NTC, 2018)

Tabla 5. Coeficiente de Importancia

Categoría de Edificación	NEC-15 (I)	ASCE 7-22 (Ie)	Norma Peruana E.030 (U)	NTC (Cu)
Edificios esenciales	1.50	1.50	1.30	1.30
Edificios importantes	1.25	1.25	1.10	-
Edificios comunes	1.00	1.00	1.00	1.00
Edificios de baja importancia	0.80	-	-	0.90

Autor: (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)
Fuente: (ASCE 7, 22; E.030, 18; NEC, 15; NTC, 2018)

Tabla 6. Factores de Amplificación y Clasificación de Suelos

Tipo de Suelo	NEC-15 (Fa)	ASCE (Fa)	ASCE (Fv)	E.030 (S)	NTC (S)	NTC (Clase de Suelo)
Suelo duro / Roca	1.00	0.8 - 1.0	0.8 - 1.0	1.10	1.00	A
Suelo intermedio	1.20	1.00	1.00	1.20	1.20	B
Suelo blando	1.30	1.20	1.50	1.35	1.15	C
Suelo muy blando	1.40	1.40	2.00	1.50	1.35	D

Autor: (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)
Fuente: (ASCE 7, 22; E.030, 18; NEC, 15; NTC, 2018)

Tabla 7. Penalizaciones por Irregularidades

Tipo de Penalización	NEC-15	ASCE 7-22	Norma Peruana E.030	NTC
Reducción del factor R o q	Hasta un 20% ($R' = 0.8 \times R$)	Uso de $\Omega_0 = 2.5$ para diseño por capacidad	Hasta un 30% ($R' = 0.7 \times R$)	Reducción de q en un 20% o más ($q' = 0.8 \times q$)
Requerimientos adicionales de análisis	Sí, análisis más detallado	Sí, puede requerir análisis dinámico	Sí, puede exigir métodos de análisis avanzados	Sí, restricciones en métodos de análisis

Autor: (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)
Fuente: (ASCE 7, 22; E.030, 18; NEC, 15; NTC, 2018)

Tabla 8. Espectro de Respuesta y Aceleración Sísmica

Parámetro	NEC-15	ASCE 7-22	Norma Peruana E.030	NTC
-----------	--------	-----------	---------------------	-----

Aceleración sísmica máxima (a_g, A_o, S_s)	$a_g = \text{hasta } 0.50g$	S_s variable S_1 variable	$A_o = \text{hasta } 0.45g$	$a_g = \text{hasta } 0.25g$
Factor de suelo (S, F_a, F_v)	$S = 1.0 - 1.4$	F_a y F_v dependen de S_s y tipo de suelo	$S = 1.0 - 1.5$	$S = 1.0 - 1.35$
Aceleración espectral elástica (S_a)	$S_a = S \times a_g \times F_s$	$SDS=2/3 SMS$	$S_{ae} = A_o \times S \times C \times P$	$S_e(T) = a_g \times S \times F_0 \times \eta$
Factor de amplificación máxima (F_0, C)	-	-	$C = \text{hasta } 2.5$	$F_0 = 2.5$

Autor: (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)

Fuente: (ASCE 7, 22; E.030, 18; NEC, 15; NTC, 2018)

Finalmente se determinó que el único parámetro que no dependía del sitio para poder realizar un análisis de sensibilidad adecuado eran las rotaciones en las rótulas plásticas:

Tabla 9. Rotaciones Máximas Permisibles

Normativa	Rotaciones Plásticas Máximas Definidas	Comentario
NEC-15 (Ecuador)	No especifica valores directos	La NEC-15 establece derivas máximas y criterios de ductilidad, no rotaciones plásticas directas.
ASCE-22 (EE. UU.)	Especifica valores de rotaciones	Las rotaciones plásticas suelen derivarse de ASCE 41 u otros documentos.
Norma Peruana E.030	No especifica valores directos	E.030 define derivas y requisitos de detallado, no rotaciones plásticas explícitas.
NTC 2018 (Italia)	No especifica valores directos	La NTC Italiana se enfoca en derivas, ductilidad y esfuerzos globales. No establece rotaciones plásticas límite de forma explícita.

Autor: (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)

Fuente: (ASCE 7, 22; E.030, 18; NEC, 15; NTC, 2018)

Tabla 10. Rotaciones Máximas Permisibles (ASCE 41, 22)

Elemento	Nivel de Desempeño	Rotación Máxima (rad) aprox.
Viga (Hormigón)	Operación Inmediata (IO)	0.005 rad
Viga (Hormigón)	Seguridad de Vida (LS)	0.020 rad
Viga (Hormigón)	Prevención de Colapso (CP)	0.035 rad
Columna (Hormigón)	Operación Inmediata (IO)	0.003 rad
Columna (Hormigón)	Seguridad de Vida (LS)	0.015 rad
Columna (Hormigón)	Prevención de Colapso (CP)	0.030 rad

Autor: (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)

Fuente: (ASCE 7, 22; E.030, 18; NEC, 15; NTC, 2018)

2.2.2.2. Modelado Estructural Inicial con ETABS

El modelo estructural inicial de la edificación se realizó utilizando el software ETABS. Este programa permitió crear un modelo preciso de la estructura, incorporando las geometrías de los elementos, las propiedades mecánicas de los materiales y las condiciones de apoyo. Se asignaron las cargas gravitatorias y sísmicas conforme a las normativas analizadas, facilitando el análisis del comportamiento estructural bajo distintos escenarios y sirviendo como base para el posterior análisis de sensibilidad y optimización de estrategias de reforzamiento.

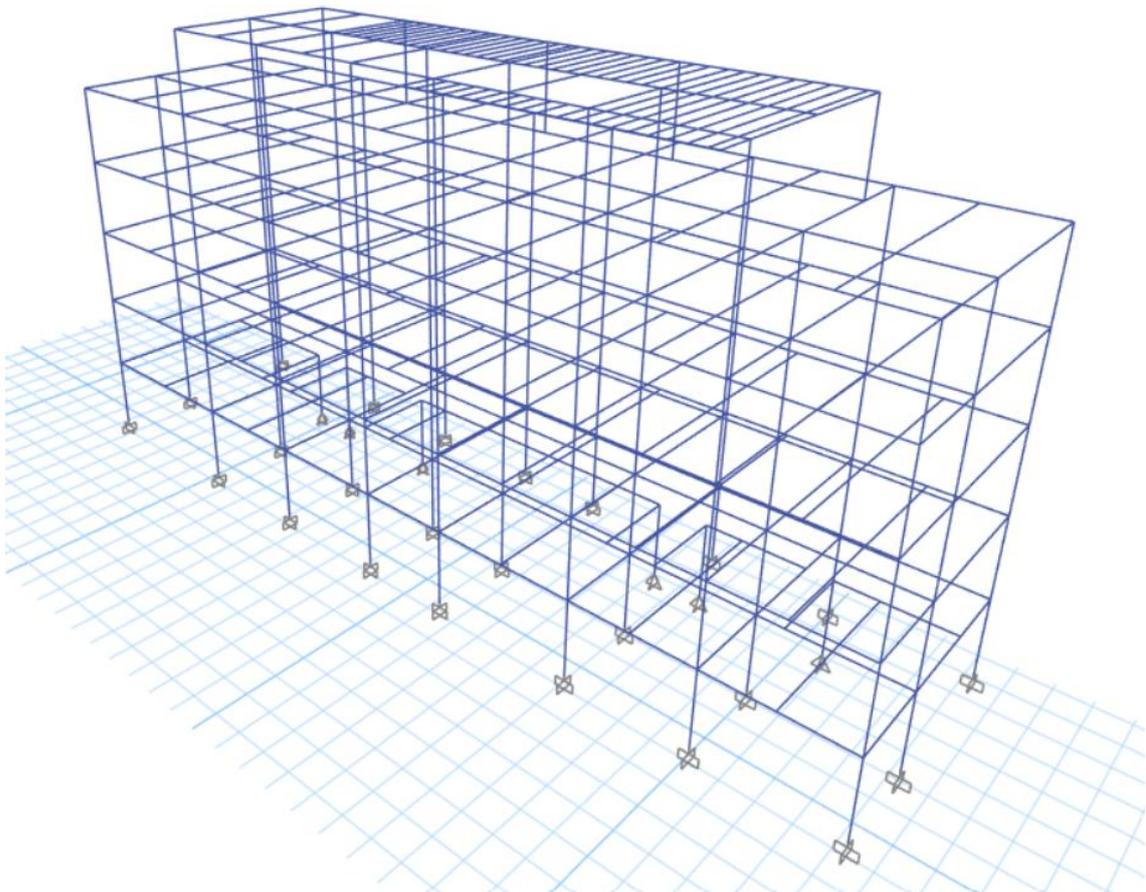


Figura 9. Modelo 3D Inicial

De la misma manera el espectro utilizado es el obtenido en el sitio mediante los ensayos respectivos de laboratorio.

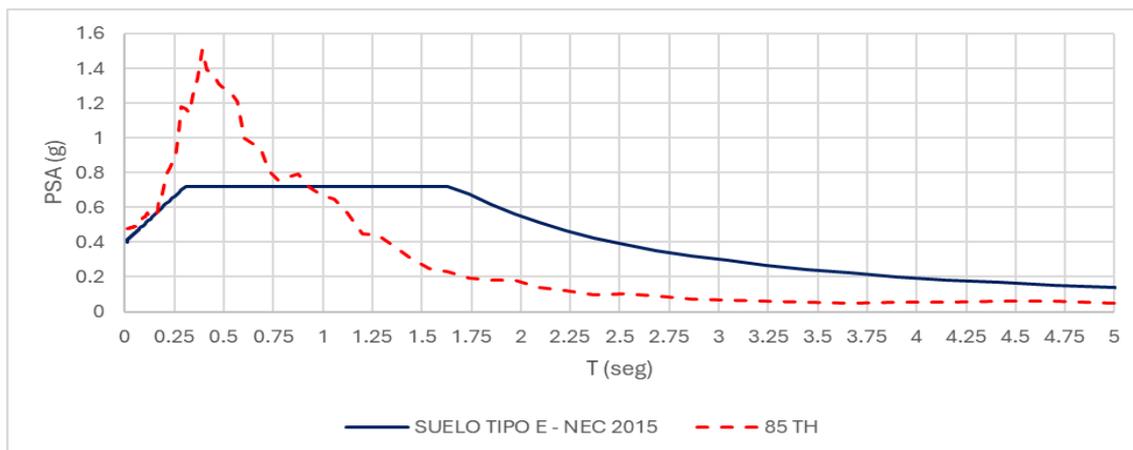


Figura 10. Definición del Espectro de Sitio, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)

2.2.2.3. Análisis de Sensibilidad

2.2.2.3.1. Análisis de Sensibilidad Normativo mediante Rotaciones en Rótulas Plásticas

En el desarrollo del proyecto, se aplicó un análisis de sensibilidad normativo enfocado en comparar las rotaciones en las rótulas plásticas de los elementos estructurales, utilizando la herramienta de rótulas plásticas (hinge) disponible en ETABS. Este enfoque permitió evaluar cómo las distintas normativas sísmicas influyen en el comportamiento inelástico de la estructura, específicamente en la capacidad de rotación de las vigas y columnas bajo cargas sísmicas.

La implementación de las rótulas plásticas en el modelo tridimensional de ETABS fue esencial para simular el comportamiento no lineal de los elementos estructurales. En principio se tendría que haber definido las propiedades de las rótulas basadas en los criterios establecidos por cada normativa analizada (NEC-15, ASCE 7-22, Norma Peruana E.030 y NTC Italiana), incluyendo las curvas momento-rotación y los límites de rotación permisibles para diferentes niveles de desempeño sísmico. Pero en su mayoría estas normas no cuentan con un análisis de rotaciones en rotulas (Ver tabla 9), haciendo énfasis en el análisis por derivas. Estas propiedades consideran factores como la resistencia de los materiales, la ductilidad esperada y los detalles de confinamiento. Por lo que se realizó un análisis de sensibilidad aumentando y disminuyendo los parámetros según el nivel de desempeño con la finalidad de obtener una idea el comportamiento de la estructura ante estos cambios.

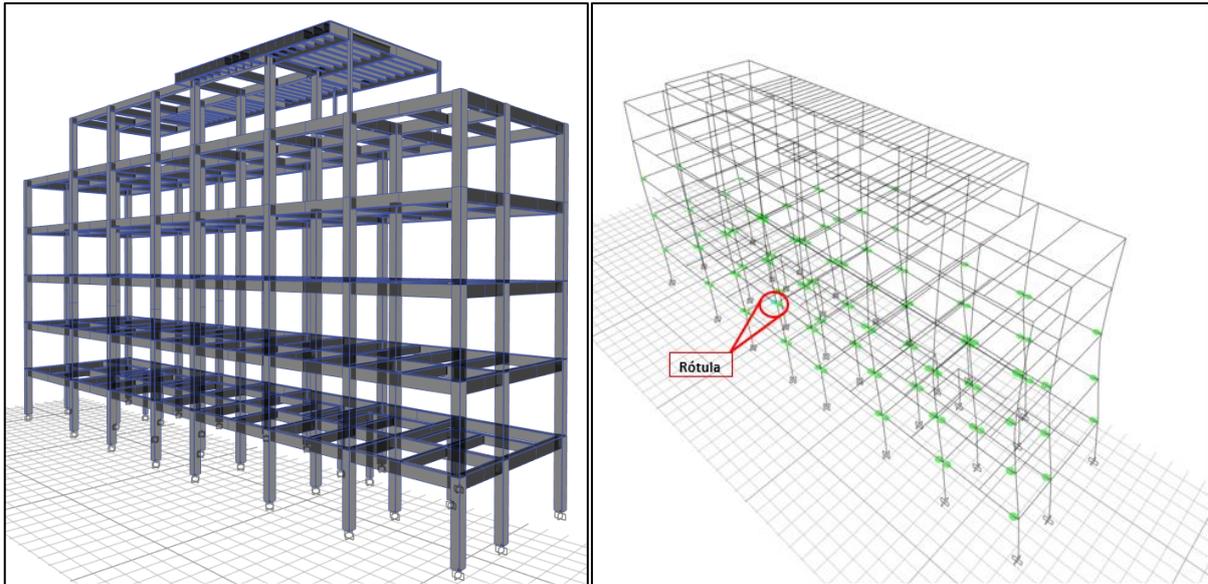


Figura 11. Asignación de valores límites en las rótulas, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)

Al ejecutar análisis estáticos no lineales (pushover) y dinámicos, se obtuvieron las rotaciones desarrolladas en las rótulas plásticas durante el sismo. Estas rotaciones se compararon con los límites definidos por cada normativa para los distintos estados límite, como operación inmediata, seguridad de vida y prevención de colapso. Esta comparación permitió identificar los elementos que superaban las rotaciones permisibles, evidenciando posibles zonas críticas y necesidades de reforzamiento.

Con el propósito de delimitar el alcance del estudio y reducir el tiempo de ejecución de las simulaciones en el software, se decidió analizar únicamente el modelo 3D sin hacer énfasis en algún pórtico en especial.

A cada elemento se le asignaron las propiedades específicas del acero de refuerzo, incluyendo la resistencia a la fluencia (F_y), el módulo de elasticidad (E) y otros parámetros relevantes que caracterizan el comportamiento mecánico del material (Ver Tablas 11, 12 y 13). Asimismo, se definieron las rótulas plásticas en las vigas y columnas, utilizando los parámetros establecidos por las normativas sísmicas correspondientes. Esto implicó la incorporación de modelos de rótulas basados en las curvas momento-rotación proporcionadas por las normativas (ASCE 41, 22), que consideran aspectos como la ductilidad, la capacidad de deformación y los factores de reducción de resistencia.

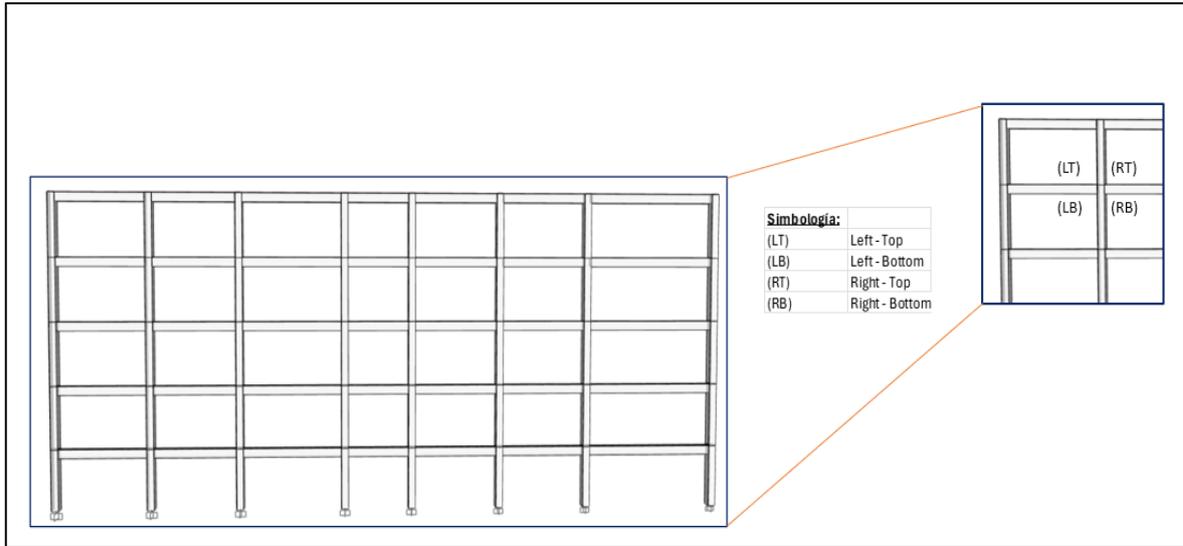


Figura 12. Simbología Utilizada para Definir la Ubicación de Rotulas, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)

Tabla 11. Secciones de columnas del Eje E2

Nivel	Eje EG	Eje EF	Eje EE	Eje ED	Eje EC	Eje EB	Eje EA	Eje AA
	cm							
P4	(CT)							
	50x40							
	(CB)							
	50x40							
P3	(CT)							
	50x40							
	(CB)							
	50x40							
P2	(CT)							
	50x40							
	(CB)							
	50x40							
P1	(CT)							
	50x40							
	(CB)							
	50x40							
MZ	(CT)							

	50x40							
	(CB)							
	50x40							

Autor: Uvidia Marcelo, Sadaka Josue, 2024

Tabla 12. Área de Acero de Refuerzo Provisto en Columnas del Eje E2

Nivel	Eje EG	Eje EF	Eje EE	Eje ED	Eje EC	Eje EB	Eje EA	Eje AA
	(cm2)							
P4	(CT)							
	20,35	20,35	20,35	20,35	20,35	20,35	20,35	20,35
	(CB)							
	20,35	20,35	20,35	20,35	20,35	20,35	20,35	20,35
P3	(CT)							
	20,35	20,35	20,35	20,35	20,35	20,35	20,35	20,35
	(CB)							
	20,35	20,35	20,35	20,35	20,35	20,35	20,35	20,35
P2	(CT)							
	20,35	20,35	20,35	20,35	20,35	20,35	20,35	20,35
	(CB)							
	20,35	20,35	20,35	20,35	30,41	30,41	30,41	30,41
P1	(CT)							
	20,35	20,35	20,35	20,35	30,41	30,41	30,41	30,41
	(CB)							
	20,35	20,35	20,35	20,35	30,41	30,41	30,41	30,41
MZ	(CT)							
	20,35	20,35	20,35	20,35	30,41	30,41	30,41	30,41
	(CB)							
	20,35	20,35	20,35	20,35	30,41	30,41	30,41	30,41

Autor: Uvidia Marcelo, Sadaka Josue, 2024

Tabla 13. Demandas a Flexión en columnas del Eje E2

Nivel	Eje EG	Eje EF	Eje EE	Eje ED	Eje EC	Eje EB	Eje EA	Eje AA
-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

	(Ton-m)							
P4	(CT)							
	10,47	3,49	4,73	8,07	5,28	4,52	7,94	18,29
	(CB)							
	7,82	3,03	3,74	7,32	4,98	3,88	6,38	13,38
P3	(CT)							
	6,85	5,21	6,25	9,68	7,33	6,45	7,53	8,98
	(CB)							
	6,38	4,61	5,6	9,39	6,93	5,78	7,23	9,66
P2	(CT)							
	7,9	6,71	7,35	10,99	8,92	7,56	9,14	10,38
	(CB)							
	7,57	6,44	7,17	11,14	8,95	7,37	8,96	10,14
P1	(CT)							
	7,6	7,13	7,54	11,24	9,32	7,82	9,29	9,9
	(CB)							
	8,6	8,45	8,57	12,57	10,46	8,96	10,6	11,32
MZ	(CT)							
	4,99	8,45	4,88	7,5	6,05	5,05	6,08	9,11
	(CB)							
	10,02	9,61	9,94	11,37	10,62	9,96	10,58	11,12

Autor: Uvidia Marcelo, Sadaka Josue, 2024

La implementación de este enfoque permitió simular de manera detallada el comportamiento inelástico de los elementos estructurales bajo cargas sísmicas, centrando el análisis en los componentes más representativos y críticos de la estructura. Al limitar el estudio a dos pórticos, se logró optimizar el uso de recursos computacionales y agilizar el proceso de simulación, sin comprometer la precisión ni la integridad de los resultados.

Este procedimiento facilitó la evaluación comparativa del desempeño sísmico de los pórticos bajo distintos escenarios normativos y parámetros de diseño, permitiendo

identificar las influencias significativas de los parámetros normativos en la respuesta estructural y orientar eficazmente las estrategias de reforzamiento.

2.2.2.3.2. Análisis de Derivas a partir del Modelo 3D

Además de las rotaciones en las rótulas plásticas, se analizaron las derivas de entrepiso obtenidas del modelo tridimensional en ETABS. Las derivas son un indicador clave del comportamiento sísmico de una estructura, ya que reflejan las deformaciones relativas entre pisos y están directamente relacionadas con el daño potencial en elementos no estructurales y la comodidad de los ocupantes.

Las derivas calculadas se compararon con los límites máximos permisibles establecidos por cada normativa. Este análisis permitió evaluar si la estructura cumplía con los criterios de desempeño en términos de rigidez lateral y control de desplazamientos. Se prestó especial atención a las diferencias en los límites de deriva entre las normativas, lo que evidenció cómo variaciones en estos parámetros pueden afectar significativamente el diseño y la evaluación de la seguridad estructural.

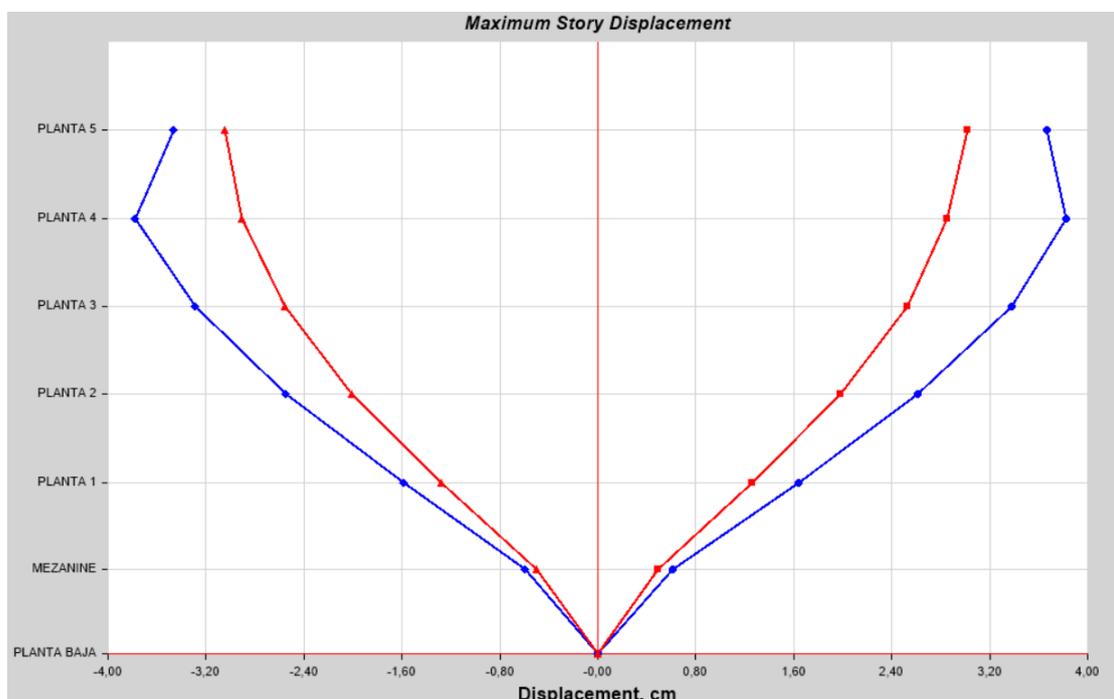


Figura 13. Gráfica de Desplazamiento máximo [cm], (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)

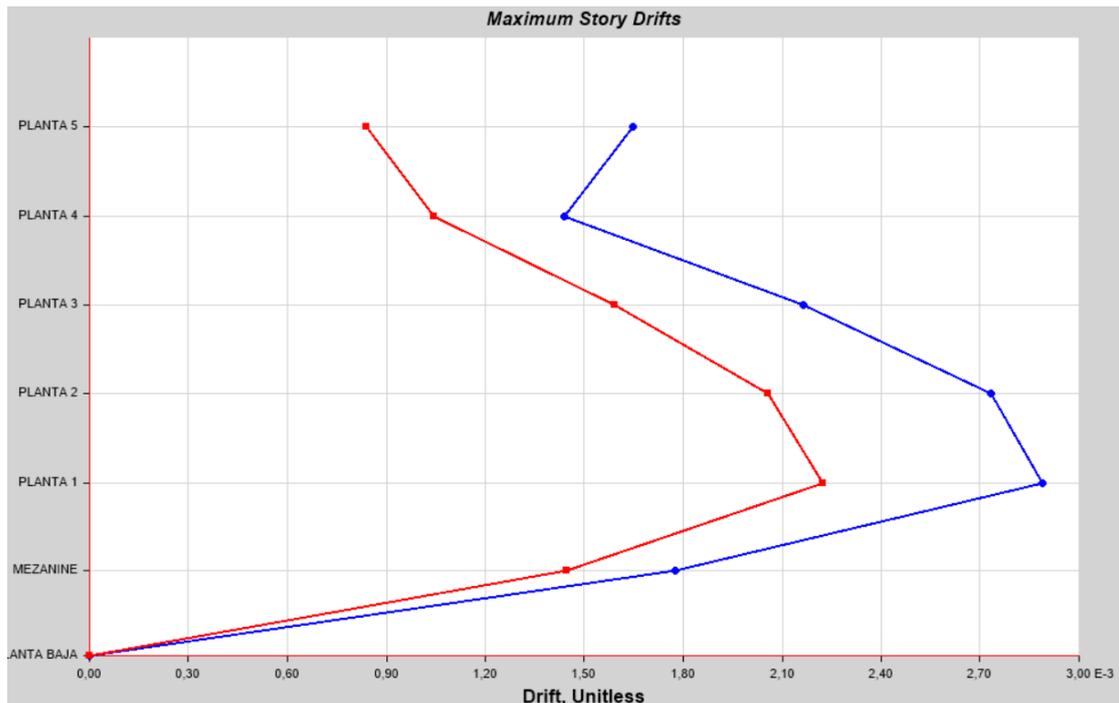


Figura 14. Gráfica de Deriva de Entre Piso [%], (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)

2.2.2.4. Evaluación de los mecanismos de falla y determinación de la necesidades de reforzamiento

2.2.2.4.1. Evaluación de Modos de Falla mediante Hojas de Cálculo en Excel

Para evaluar los modos de falla de los elementos estructurales y determinar la necesidad de reforzamiento, se implementaron hojas de cálculo en Excel que permiten un análisis detallado y sistemático de las secciones de todas las vigas y columnas en estado crítico. Este enfoque complementa el análisis numérico realizado en ETABS, proporcionando una herramienta versátil para el cálculo manual y la verificación de resultados.

2.2.2.4.2. Desarrollo de las Hojas de Cálculo

Las hojas de cálculo fueron diseñadas para incorporar las dimensiones geométricas, propiedades de los materiales y las solicitaciones a las que están sometidos los elementos estructurales. Se introdujeron los datos de sección transversal, longitud efectiva, características del hormigón y acero de refuerzo, así como los esfuerzos obtenidos del análisis estructural (momentos flectores, fuerzas cortantes, cargas axiales).

2.2.2.4.3. Determinación del reforzamiento

Mediante las hojas de cálculo, se procedió a:

- a) Cálculo de Capacidades Resistentes:
 - Se calcularon los momentos resistentes de las vigas y columnas según las normas de diseño, considerando el momento último (M_u) y el momento actuante (M_a).
 - Se evaluó la capacidad a cortante, calculando la fuerza cortante última (V_u) y comparándola con la fuerza cortante actuante (V_a).
 - Para las columnas, se analizaron las cargas críticas de pandeo y la capacidad a compresión axial, considerando esbeltez y condiciones de apoyo.
- b) Comparación de Demandas y Capacidades: Se compararon los esfuerzos actuantes con las capacidades resistentes para cada modo de falla, determinando los índices de utilización o factores de seguridad.
- c) Identificación del Modo de Falla Crítico: El modo de falla predominante se identificó como aquel en el que el elemento presenta el índice de utilización más alto, es decir, donde la demanda está más cercana o supera la capacidad resistente.

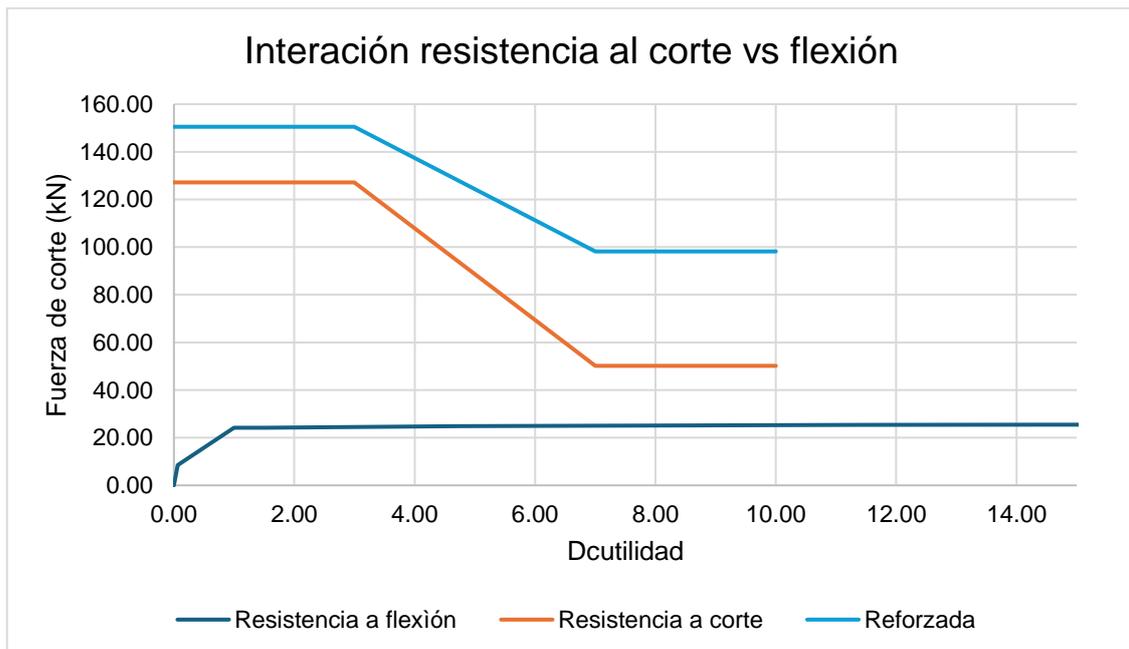


Figura 15. Ejemplo de Reforzamiento de Viga. (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)

2.2.2.4.4. Determinación de la Necesidad de Reforzamiento

Los elementos que no cumplen con los factores de seguridad o presentan índices de utilización superiores a la unidad fueron catalogados como elementos críticos que requieren reforzamiento estructural. La identificación precisa del modo de falla permitió diseñar soluciones de reforzamiento específicas, enfocadas en mejorar la capacidad resistente en el modo de falla identificado (por ejemplo, aumentar la resistencia a flexión mediante refuerzo adicional de acero, o mejorar la capacidad a cortante incrementando el estriado).

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados

3.1.1. Análisis Comparativo de Normativas Sísmicas

3.1.1.1. Tabulación de Parámetros Normativos

Se realizó una comparación detallada de los parámetros sísmicos clave entre la NEC-15 y las normativas internacionales ASCE 7-22, Norma Peruana E.030 y NTC 2018. Los resultados se resumen en la Tabla 14.

Tabla 14. Comparación de Parámetros Sísmicos entre Normativas

Parámetro	NEC-15	ASCE 7-22	E.030	NTC 2018	Observación
Factor de Reducción de Respuesta (R)	5	8	7	4	Dependen del sitio
Aceleración Sísmica de Diseño (a_g)	0.40g	0.40g	0.30g	0.25g	Dependen del sitio
Límite de Deriva Permisible (%)	2.0	1.0	0.7	0.75	
Penalizaciones por Irregularidades	No	No	No	No	
Requisitos de Detallado Específicos	Medio	Alto	Medio	Alto	

Autor: (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)

3.1.1.2. Interpretación de los Resultados

Los resultados obtenidos con respecto al primer objetivo específico muestran que existe una marcada diferencia entre los parámetros establecidos por las distintas normativas analizadas. Si bien no es posible realizar una comparación directa, debido a que muchos de estos parámetros dependen de las condiciones sísmicas particulares del sitio, se aprecia que las normas internacionales presentan límites más exigentes, especialmente en cuanto a derivas entre pisos. En otras palabras, comparadas con la normativa local, las regulaciones extranjeras resultan significativamente más rigurosas y estrictas, lo que denota un mayor control sobre las deformaciones admisibles y la respuesta sísmica de las estructuras.

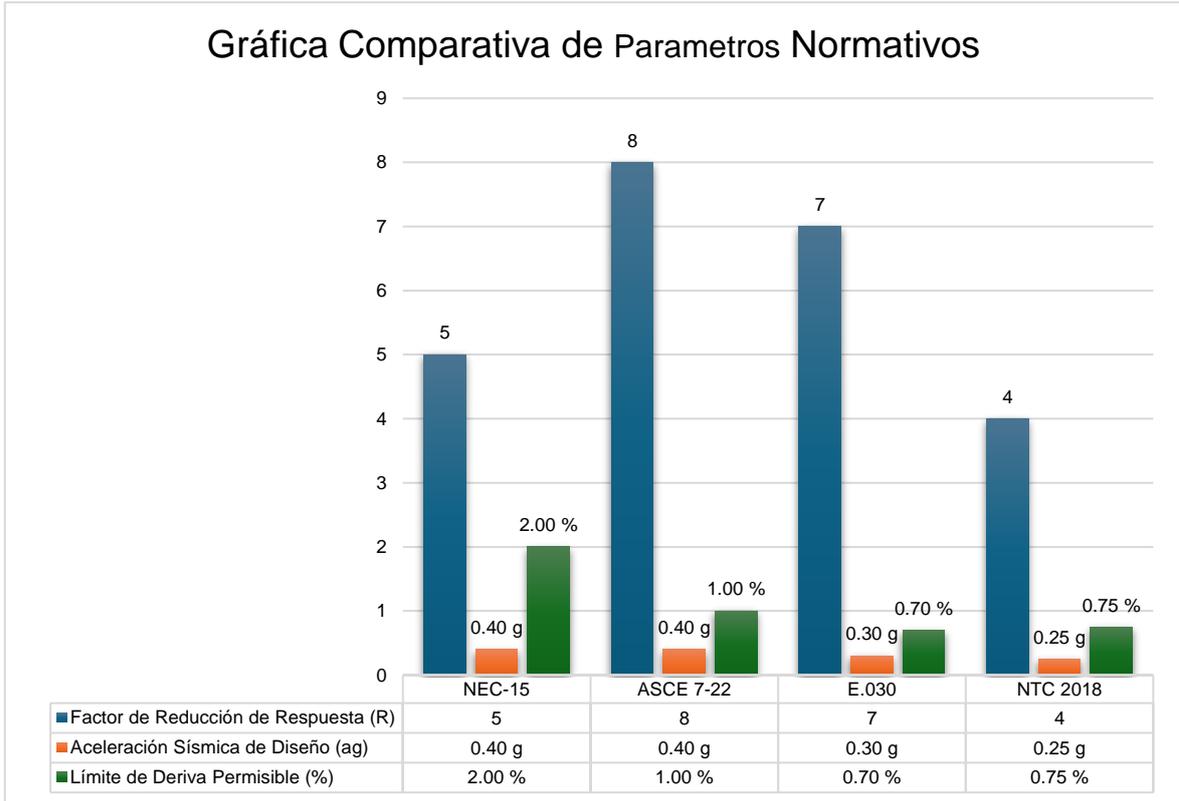


Figura 16. Gráfica Comparativa entre las Normas, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)

3.1.2. Análisis de Sensibilidad

3.1.3. Resultados del Análisis Estructural con ETABS

Se modeló la estructura 3D, asignando propiedades de material y definiendo rótulas plásticas según los parámetros normativos.

3.1.3.1. Desplazamientos y Derivas

Se procedió a realizar el cálculo de las derivas reales y a comparar los resultados:

Eje X: Deriva Máxima en la Planta 1

$$\delta_{\max X} = \delta_{\max R} \times R \rightarrow 0.00289 \times 5 \delta_{\max X} = 0.01445$$

Eje Y: Deriva Máxima en la Planta 1

$$\delta_{\max Y} = \delta_{\max R} \times R \rightarrow 0.00222 \times 5 \rightarrow \delta_{\max Y} = 0.0111$$

Los desplazamientos y derivas obtenidos se resumen en la Tabla 15.

Tabla 15. Cumplimiento de Derivas

Parámetro	NEC-15	ASCE 7-22	E.030	NTC 2018
Límite de Deriva Permisible (%)	2	1	0.7	0.75
Cumple Criterio de Deriva	Sí	No	No	No
Porcentaje por Encima del Límite en X	72%	145%	206%	193%
Porcentaje por Encima del Límite en Y	56%	111%	159%	148%
Relación Con la Norma Local	Parámetro de Referencia	50%	35%	38%

Autor: (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)

3.1.3.2. Rotaciones en la Rótulas Plásticas

Se evaluaron las rotaciones en las rótulas plásticas de vigas y columnas, mediante Push en las direcciones X y Y, teniendo los siguientes resultados:

Tabla 16. Rotaciones Máximas y Rótulas Plásticas Push en Y

CASO 1							
Push Y (OI, OL, OC) Push Y (0.003, 0.012, 0.015)	COLUMNAS					Rotación Máxima	Unique Name
	A	B	C	D	E	Rad	
		106				0.022878	569
	VIGAS					Rotación Máxima	Unique Name
	A	B	C	D	E	Rad	
		122	1			0.025062	145
CASO 2							
Push Y (OI, OL, OC) Push Y (0.0045, 0.012, 0.015)	COLUMNAS					Rotación Máxima	Unique Name
	A	B	C	D	E	Rad	
		106				0.022878	569
	VIGAS					Rotación Máxima	Unique Name
	A	B	C	D	E	Rad	
		123	1			0.025062	145
CASO 3							
Push Y (OI, OL, OC) Push Y (0.003, 0.018, 0.015)	COLUMNAS					Rotación Máxima	Unique Name
	A	B	C	D	E	Rad	
		107				0.023055	569
	VIGAS					Rotación Máxima	Unique Name
	A	B	C	D	E	Rad	
		122	2			0.024937	145
CASO 4							
Push Y (OI, OL, OC) Push Y (0.003, 0.012, 0.0225)	COLUMNAS					Rotación Máxima	Unique Name
	A	B	C	D	E	Rad	

		107				0.022863	569
	VIGAS					Rotación Máxima	Unique Name
	A	B	C	D	E	Rad	
		123	1			0.024792	145
CASO 5							
Push Y (OI, OL, OC) Push Y (0.0015, 0.012, 0.015)	COLUMNAS					Rotación Máxima	Unique Name
	A	B	C	D	E	Rad	
		106				0.022877	569
	VIGAS					Rotación Máxima	Unique Name
	A	B	C	D	E	Rad	
	123	1			0.025047	145	
CASO 6							
Push Y (OI, OL, OC) Push Y (0.003, 0.006, 0.015)	COLUMNAS					Rotación Máxima	Unique Name
	A	B	C	D	E	Rad	
		106				0.022877	569
	VIGAS					Rotación Máxima	Unique Name
	A	B	C	D	E	Rad	
	123				0.025047	145	
CASO 7							
Push Y (OI, OL, OC) Push Y (0.003, 0.012, 0.0075)	COLUMNAS					Rotación Máxima	Unique Name
	A	B	C	D	E	Rad	
		106				0.022877	569
	VIGAS					Rotación Máxima	Unique Name
	A	B	C	D	E	Rad	
	124	1			0.025047	145	

Autor: (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)

Tabla 17. Rotaciones Máximas y Rótulas Plásticas Push en X

CASO 1							
Push X (OI, OL, OC) Push X (0.003, 0.012, 0.015)	COLUMNAS					Rotación Máxima	Unique Name
	A	B	C	D	E	Rad	
		82				0.020488	516
	VIGAS					Rotación Máxima	Unique Name
	A	B	C	D	E	Rad	
	141	1	1		0.030562	121	
CASO 2							
Push X (OI, OL, OC) Push X (0.0045, 0.012, 0.015)	COLUMNAS					Rotación Máxima	Unique Name
	A	B	C	D	E	Rad	
		82				0.020493	516
	VIGAS					Rotación Máxima	Unique Name
	A	B	C	D	E	Rad	
	140	1	1		0.030572	121	

CASO 3							
Push X (OI, OL, OC) Push X (0.003, 0.018, 0.015)	COLUMNAS					Rotación Máxima	Unique Name
	A	B	C	D	E	Rad	
		82				0.020493	516
	VIGAS					Rotación Máxima	Unique Name
	A	B	C	D	E	Rad	
	140	1	1		0.030572	121	
CASO 4							
Push X (OI, OL, OC) Push Y (0.003, 0.012, 0.0225)	COLUMNAS					Rotación Máxima	Unique Name
	A	B	C	D	E	Rad	
		82				0.020486	516
	VIGAS					Rotación Máxima	Unique Name
	A	B	C	D	E	Rad	
	140	1	1		0.030559	121	
CASO 5							
Push X (OI, OL, OC) Push X (0.0015, 0.012, 0.015)	COLUMNAS					Rotación Máxima	Unique Name
	A	B	C	D	E	Rad	
		82				0.020493	516
	VIGAS					Rotación Máxima	Unique Name
	A	B	C	D	E	Rad	
	140	1	1		0.030572	121	
CASO 6							
Push X (OI, OL, OC) Push X (0.003, 0.006, 0.015)	COLUMNAS					Rotación Máxima	Unique Name
	A	B	C	D	E	Rad	
		82				0.020486	516
	VIGAS					Rotación Máxima	Unique Name
	A	B	C	D	E	Rad	
	140	1	1		0.030559	121	
CASO 7							
Push X (OI, OL, OC) Push X (0.003, 0.012, 0.0075)	COLUMNAS					Rotación Máxima	Unique Name
	A	B	C	D	E	Rad	
		82				0.020493	516
	VIGAS					Rotación Máxima	Unique Name
	A	B	C	D	E	Rad	
	140	1	1		0.030572	121	

Autor: (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)

3.1.3.1. Interpretación de los Resultados

De los resultados obtenidos en cumplimiento del segundo objetivo específico se interpreta que:

a) La deriva de la edificación propuesta en este proyecto cumple con la normativa local siendo estas un 72% de la deriva máxima permisible en el eje x y de un 56% de la deriva máxima permisible en el eje Y. Así mismo la deriva de la edificación propuesta en este proyecto supera las normativas internacionales sometidas al análisis de sensibilidad, tal como se aprecia en la figura a continuación:

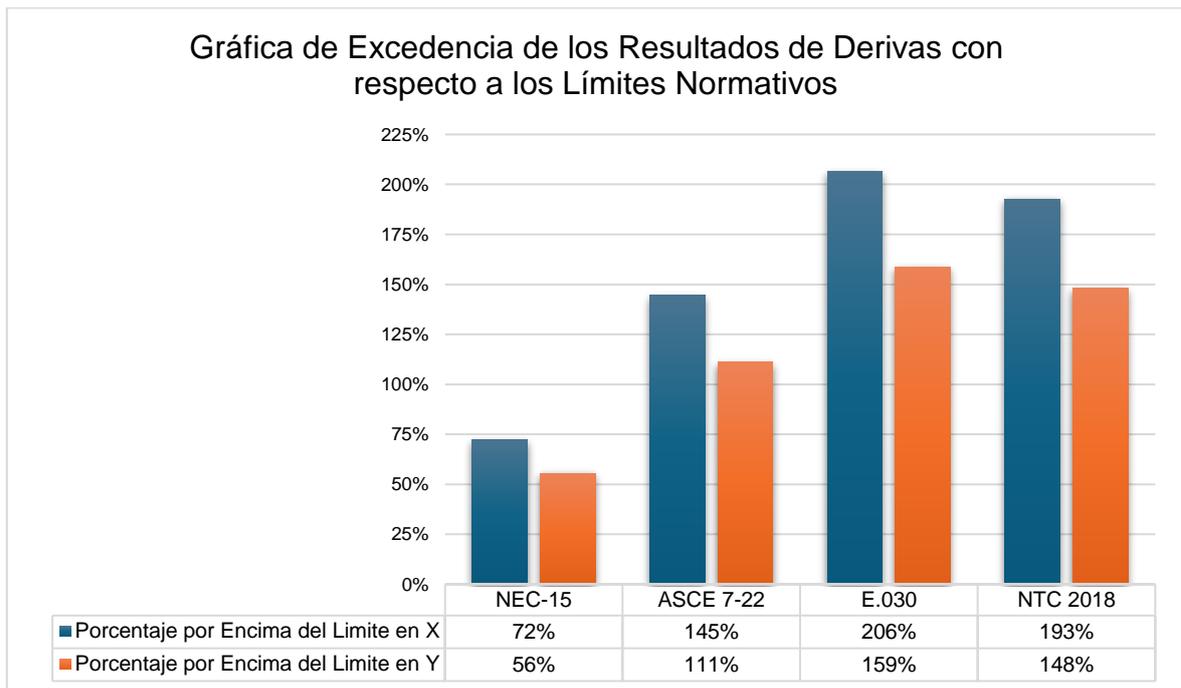


Figura 17. Gráfica Comparativa entre las Normas, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)

b) Si comparamos los límites de derivas de las normas aplicables para el caso de estudios podemos notar que: la deriva máxima de la ASCE 7-22 es del 50% del valor propuesto por la NEC, la deriva de la E. 030 es del 35% de la NEC y por último la NTC 18 es del 38% de la NEC.

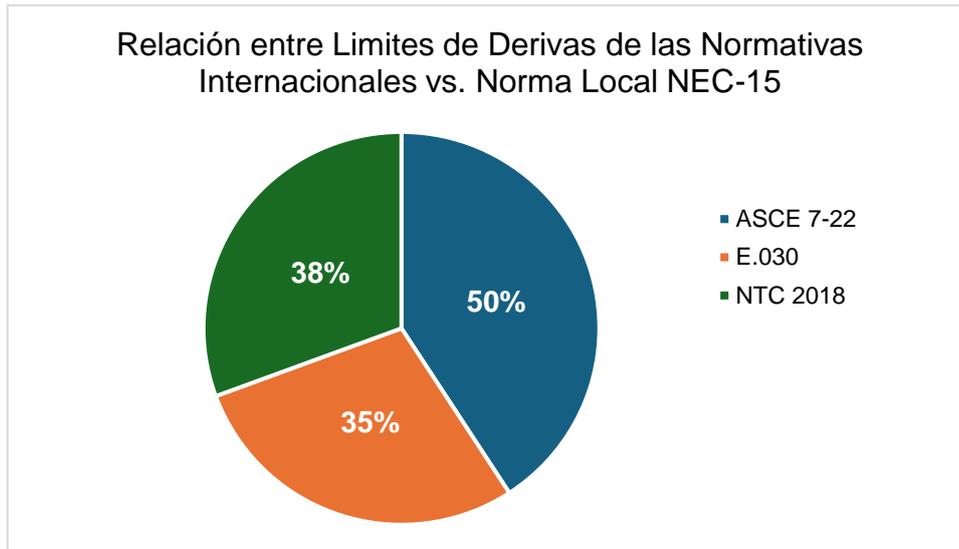


Figura 18. Relación entre Límites de Derivas de las Normativas, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)

c) Del análisis de sensibilidad variando los criterios por desempeño de las rótulas, aplicando un Push en el Eje Y se obtienen los siguientes resultados: para las columnas, se tiene un promedio de 106 rótulas en la edificación, estas rotulas son todas del tipo B, se encuentran dentro del rango de ocupación Inmediata.

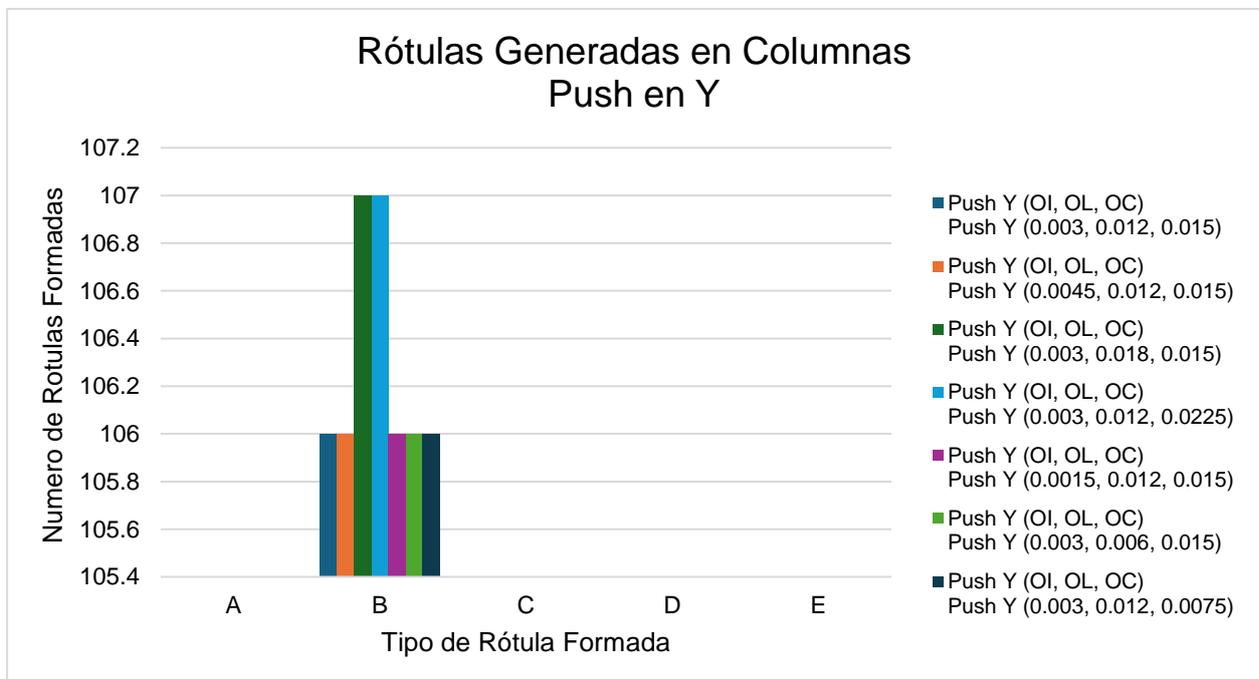


Figura 19. Rótulas Generadas en Columnas Push en Y, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)

d) Por otro lado para las vigas se obtiene un promedio de 123 rótulas, estas rotulas son en su mayoría del tipo B, se encuentran dentro del rango de ocupación Inmediata, sin embargo algunas alcanzan el nivel C de Seguridad de Vida.

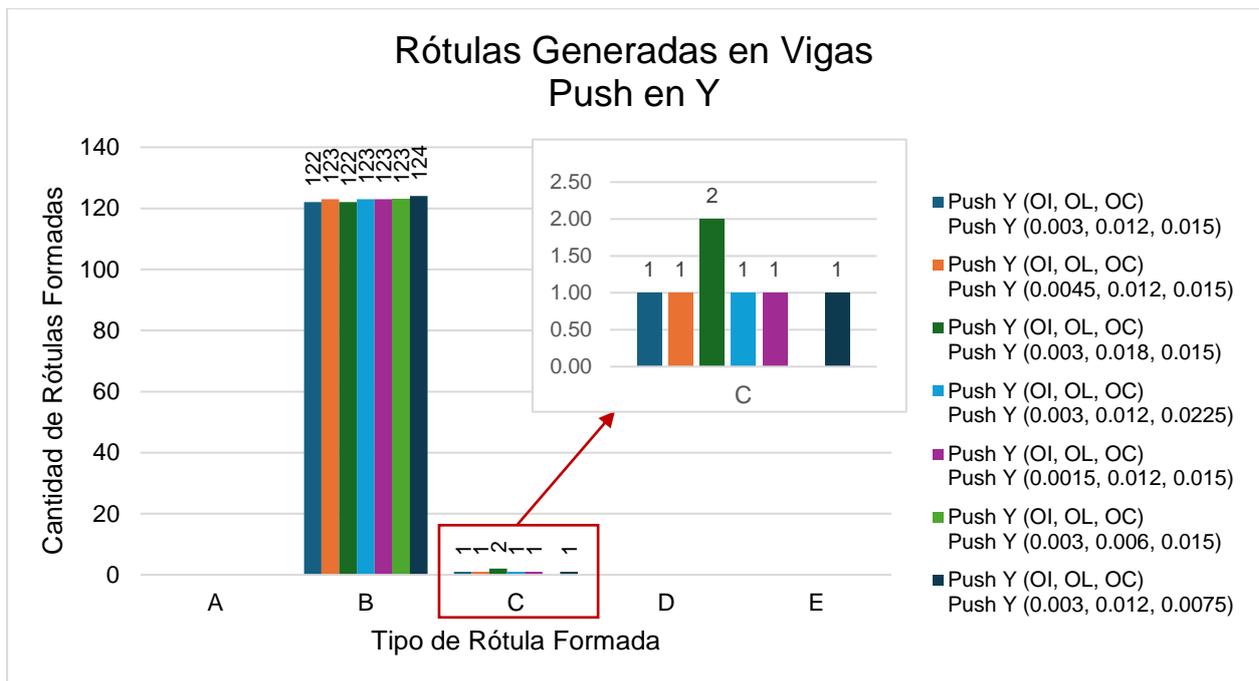


Figura 20. Rótulas Generadas en Vigas Push en Y, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)

e) Del análisis de sensibilidad variando los criterios por desempeño de las rótulas, aplicando un Push en el Eje X se obtienen los siguientes resultados: para las columnas, se tiene un promedio de 82 rótulas en la edificación, estas rotulas son todas del tipo B, por lo que se encuentran dentro del rango de ocupación Inmediata.

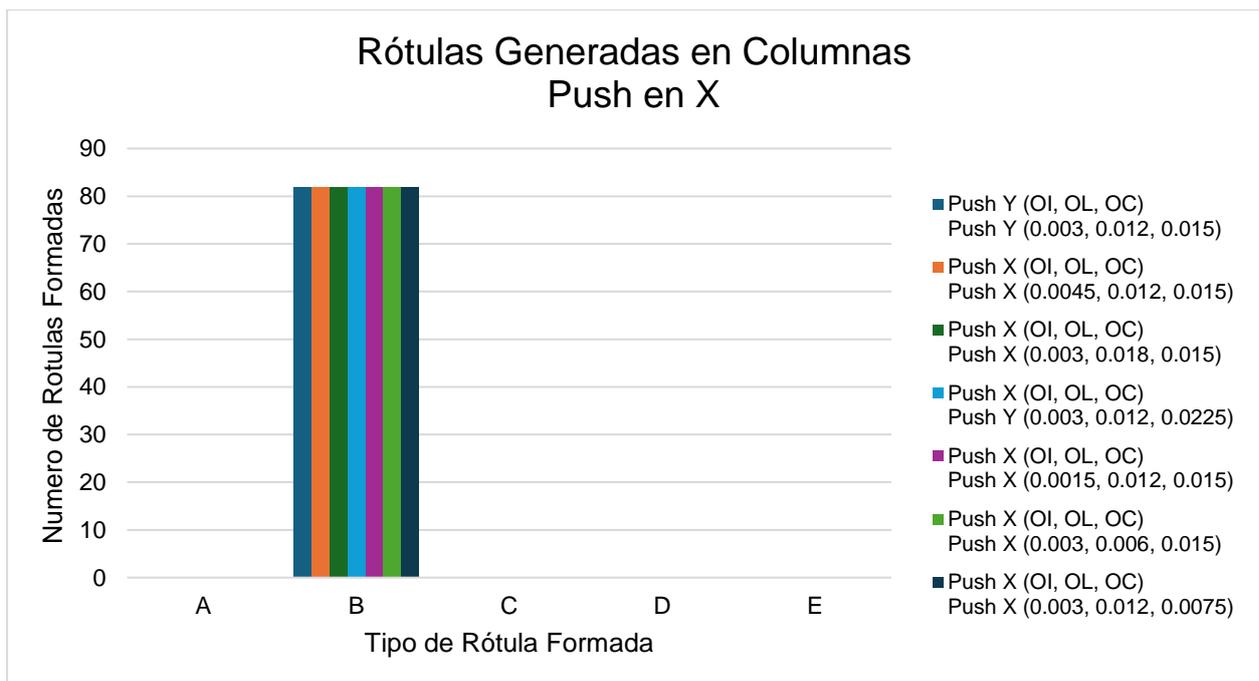


Figura 21. Rótulas Generadas en Columnas Push en X, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)

f) Por otro lado para las vigas se obtiene un promedio de 142 rótulas, estas rotulas son en su mayoría del tipo B, por lo que se encuentran dentro del rango de ocupación Inmediata, sin embargo algunas alcanzan el nivel C y D de Seguridad de Vida y Prevención del Colapso.

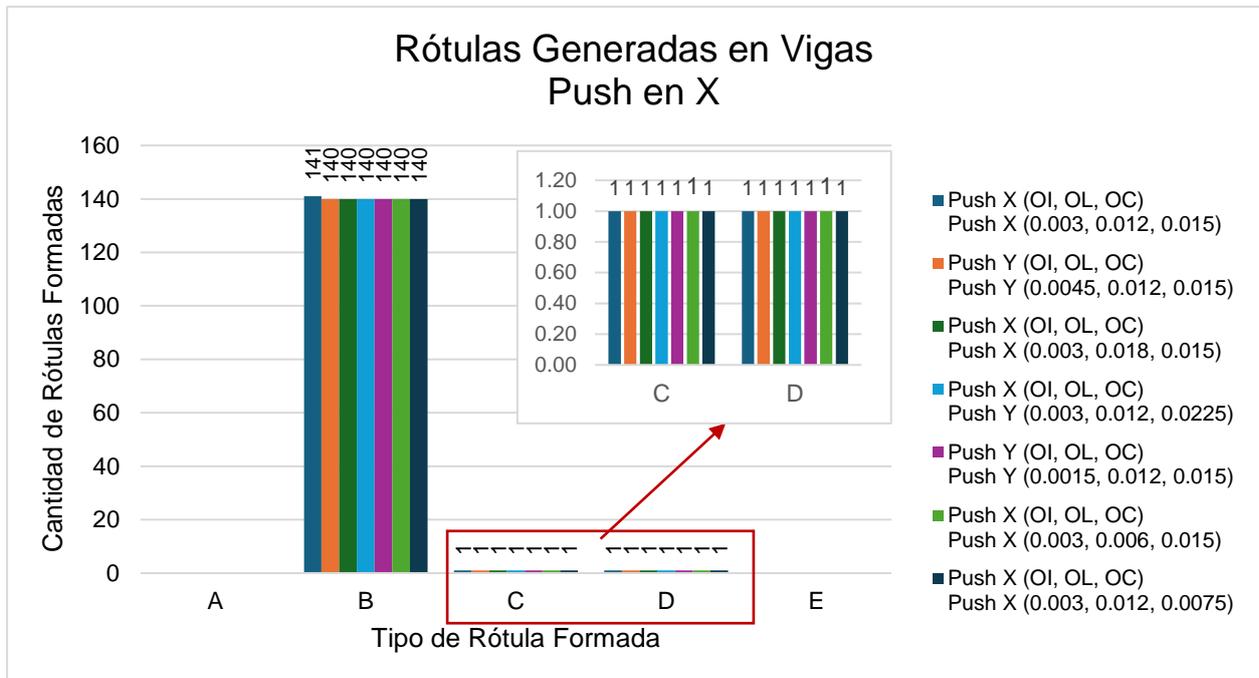


Figura 22. Rótulas Generadas en Vigas Push en X, (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)

g) Las Columnas 569 y 516, vigas 121 y 145 necesitan ser reforzadas para mejorar su desempeño para evitar la generación de rótulas por encima del criterio de Ocupación Inmediata.

3.1.4. Necesidades de Reforzamiento

3.1.4.1. Diseño de Estrategias de Reforzamiento

Se propusieron soluciones de reforzamiento específicas para los elementos que requieren intervención.

Vigas 121 y 145:

Reforzamiento Propuesto: Adición de acero de refuerzo en la zona de tracción y aplicación de fibra de carbono (FRP) en la parte inferior de las vigas.

Justificación: Incrementa la capacidad a flexión y mejora la ductilidad.

Columnas 569 y 516:

Reforzamiento Propuesto: Aplicación de fibra de carbono (FRP) alrededor del recubrimiento del elemento.

Justificación: Aumenta la capacidad a compresión y rigidez, reduciendo el riesgo de pandeo.

3.1.4.2. Resumen de Elementos Reforzados

Tabla 18. Resumen de Estrategias de Reforzamiento

Elemento	Reforzamiento Propuesto
Viga V2	Refuerzo con acero y FRP
Viga V4	Refuerzo con acero y FRP
Columna C2	Encamisado de Hormigón con FRP
Columna C4	Encamisado de Hormigón con FRP

Autor: (Sadaka Alvarez & Uvidia, 2024)

3.2. Análisis de Resultados

3.2.1. Comportamiento Estructural y Cumplimiento Normativo

Los resultados del modelado en ETABS indican que, antes del reforzamiento: La estructura cumple con los límites de deriva establecidos por la NEC-15, pero no con las normativas internacionales en la mayoría de los pisos. Los desplazamientos máximos varían entre los 4 cm. Esto significa que aunque la estructura en general cumple con los criterios de desplazamiento y deriva dentro de la norma local, para las normas internacionales no lo hace.

3.2.2. Rotaciones en Rótulas Plásticas

El análisis de rotaciones en rótulas plásticas reveló que: De todo los elementos analizados las Vigas 121 y 145, Columnas 569 y 516, no exceden las rotaciones permisibles según las normativa (ASCE 41, 22), pero si pasan el nivel de seguridad deseado. Con respecto a los modos de Falla, las vigas presentan deficiencias en flexión, mientras que las columnas son vulnerables a compresión y pandeo.

3.2.3. Eficacia de las Estrategias de Reforzamiento

3.2.3.1. Mejora en el Desempeño Estructural

Tras la implementación de las estrategias de reforzamiento:

Las rotaciones en las rótulas plásticas de los elementos reforzados disminuyeron en promedio un 5%, situándose dentro de los límites normativos. Se logró una reducción de hasta el 2.5% en los desplazamientos máximos y derivas, mejorando la rigidez lateral de la estructura.

Interpretación: Las estrategias de reforzamiento fueron efectivas en aumentar la capacidad resistente y ductilidad de los elementos críticos, contribuyendo a un desempeño sísmico más favorable de la edificación.

3.2.4. Implicaciones para la Ingeniería Sísmica y Normativas

3.2.4.1. Necesidad de Actualización Normativa

Las discrepancias entre la NEC-15 y las normativas internacionales en parámetros como el Factor R y los espectros de respuesta sugieren la necesidad de revisar y actualizar la normativa ecuatoriana. Es esencial que la normativa refleje las condiciones sísmicas específicas de Ecuador, incorporando avances científicos y técnicos recientes.

Interpretación: Una normativa actualizada y alineada con estándares internacionales puede mejorar la seguridad de las edificaciones y la resiliencia ante desastres naturales.

3.2.4.2. Importancia del Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad demostró ser una herramienta valiosa para identificar parámetros críticos y comprender su impacto en el desempeño estructural. También permite a los ingenieros tomar decisiones informadas, optimizando diseños y estrategias de reforzamiento.

Interpretación: Integrar el análisis de sensibilidad en el proceso de diseño y evaluación estructural puede conducir a edificaciones más seguras y eficientes.

3.2.5. Limitaciones del Estudio

Se asumieron condiciones ideales en materiales y conexiones. En la práctica, las variaciones en las propiedades de los materiales y la calidad constructiva pueden influir en el comportamiento estructural.

3.2.5.1. Recomendaciones para Estudios Futuros

- Ampliar el análisis para incluir todos los elementos estructurales y no estructurales, considerando también las interacciones entre ellos.
- Incluir en el modelado los efectos de segundo orden que pueden influir en la estabilidad global de la estructura.
- Complementar el análisis numérico con pruebas experimentales o monitoreo estructural para validar los modelos y suposiciones.
- Incorporar métodos probabilísticos para considerar la incertidumbre en las cargas sísmicas y propiedades de los materiales, proporcionando un enfoque más robusto en la evaluación del riesgo sísmico.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

Al culminar el presente estudio, se obtuvieron las siguientes conclusiones derivadas del análisis de sensibilidad de los parámetros normativos sísmicos y la optimización de las estrategias de reforzamiento de la edificación de cinco pisos ubicada en Guayaquil:

- a) El análisis de sensibilidad realizado permitió determinar que ciertos parámetros normativos, como el factor de reducción de respuesta (R o q), los espectros de respuesta sísmica, las penalizaciones por irregularidades estructurales y los límites de rotación en las rótulas plásticas, tienen una influencia significativa en el desempeño sísmico de la edificación. Estos parámetros afectan directamente las demandas de diseño y, por ende, la configuración y eficacia de las estrategias de reforzamiento.
- b) La comparación entre la NEC-15 y las normativas internacionales (ASCE 7-22, Norma Peruana E.030 y Norma Italiana NTC 2018) reveló discrepancias significativas en los valores de los parámetros sísmicos y los requisitos de diseño. Estas diferencias condujeron a variaciones notables en las fuerzas sísmicas de diseño, demandas de desplazamiento y límites de rotación permisibles, lo que afecta el dimensionamiento y detallado de los elementos estructurales.
- c) Las estrategias de reforzamiento diseñadas y optimizadas en función de los parámetros críticos identificados demostraron mejorar significativamente el desempeño sísmico de la edificación. Al enfocar las intervenciones en los elementos y aspectos más influyentes, se logró una mejora en la seguridad estructural con un uso eficiente de recursos.
- d) La aplicación del software ETABS para el modelado y análisis estructural fue efectiva para simular el comportamiento sísmico de la estructura y evaluar el impacto de las variaciones en los parámetros normativos. Al limitar el análisis a dos pórticos representativos en las direcciones X y Y, y utilizando rótulas plásticas definidas según los parámetros normativos, se optimizó el tiempo de cómputo sin comprometer la precisión de los resultados. La metodología empleada es

replicable y puede adaptarse a otras edificaciones y contextos, contribuyendo al avance de la ingeniería sísmica.

- e) La implementación de hojas de cálculo en Excel para evaluar los modos de falla de las vigas y columnas permitió identificar los elementos críticos que requieren reforzamiento. Este análisis detallado facilitó el diseño de soluciones de reforzamiento específicas para mejorar la capacidad resistente de los elementos más vulnerables.
- f) Los hallazgos sugieren que la NEC-15 podría beneficiarse de una revisión en ciertos aspectos, particularmente en la consideración de penalizaciones por irregularidades, límites de rotación en rótulas plásticas y factores de reducción de respuesta, para alinearse más estrechamente con las prácticas internacionales y las características sísmicas locales.
- g) El estudio evidenció que el análisis de sensibilidad es una herramienta valiosa para identificar los parámetros más influyentes en el desempeño estructural y para guiar decisiones de diseño y reforzamiento más informadas y efectivas.
- h) Al optimizar las estrategias de reforzamiento y mejorar la comprensión del impacto de los parámetros normativos, el estudio contribuye al desarrollo de edificaciones más seguras y resilientes ante eventos sísmicos, beneficiando a la comunidad y promoviendo prácticas de ingeniería más robustas.
- i) Cabe destacar que los resultados obtenidos tienen relación directa con el tipo de edificación escogida, ya que se sabe que esta estructura es relativamente nueva y diseñada bajo los parámetros normativos de la (NEC, 15).

4.2. Recomendaciones

Basándose en las conclusiones anteriores, se proponen las siguientes recomendaciones:

- a) Se recomienda que las autoridades competentes consideren una revisión de la NEC-15, incorporando ajustes en los parámetros críticos identificados, como los factores de reducción de respuesta, límites de rotación en rótulas plásticas y penalizaciones por irregularidades, para reflejar mejor las condiciones sísmicas locales y las prácticas internacionales actualizadas.

- b) Es recomendable promover programas de capacitación y actualización profesional que aborden las diferencias entre normativas sísmicas y las implicaciones en el diseño estructural, así como el uso de herramientas avanzadas de modelado y análisis.
- c) Se alienta a la comunidad académica y profesional a continuar investigando en este campo, aplicando la metodología a diferentes tipologías estructurales y contextos, y compartiendo conocimientos para mejorar la práctica de la ingeniería sísmica.
- d) En proyectos de reforzamiento de edificaciones existentes, se recomienda aplicar estrategias focalizadas en los parámetros y elementos más influyentes, como los identificados en este estudio, para lograr mejoras significativas en la seguridad estructural de manera eficiente.
- e) Al adoptar o adaptar normativas internacionales, es esencial considerar las particularidades sísmicas, geotécnicas y constructivas locales, asegurando que las soluciones sean adecuadas y efectivas en el contexto ecuatoriano.
- f) Se insta a las autoridades y a la sociedad en general a fomentar políticas y prácticas que prioricen la resiliencia sísmica, reconociendo la importancia de edificaciones seguras y la inversión en medidas de mitigación de riesgos como una responsabilidad compartida.

BITACÓRA DE REUNIONES					
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA					
Nombre del proyecto: Análisis de Sensibilidad de Parámetros Normativos Locales e Internacionales en el Desempeño Sísmico para la Optimización de Reforzamientos		Nombre del tutor:	Wilson Wladimir Carofilis Gallo		Maestría: Estructuras Civiles Sismorresistentes
		Nombre del co-tutor:			
N°	NOMBRES Y APELLIDOS DE LOS ESTUDIANTES	FECHA	HORA	ACTIVIDADES y ACUERDOS	SUGERENCIAS, RECOMENDACIONES y OBSERVACIONES
1	Marcelo Geovanny Uvidia Leguísamo Josue Abraham Sadaka Alvarez	Sábado, 7 De Septiembre De 2024	5:00 - 7:00 Pm	Planificación Del Proyecto	Revisar Y Seleccionar Normas (Local Y Extranjera) En Cuanto A Los Requisitos Para El Reforzamiento De Estructuras. Seleccionar Un A Estructura Para Que Sea El Caso De Estudio Del Proyecto De Investigación.
2	Marcelo Geovanny Uvidia Leguísamo Josue Abraham Sadaka Alvarez	Domingo, 22 De Septiembre De 2024	7:00 - 9:00 Pm	Borrador Definición De La Problemática	Revisión Del Plano Y Modelo Estructural [Se Sugiere Cambiar La Estructura A Una De Menor Cantidad De Pisos Debido A Que Con Una Estructura De 10 Pisos Se Complicaría El Análisis] Revisión De Los Parámetros Establecidos En La Primera Clase De Titulación.
3	Marcelo Geovanny Uvidia Leguísamo Josue Abraham Sadaka Alvarez	Jueves, 26 De Septiembre De 2024	9:00 - 11:00 Pm	Revisión Del Planteamiento Y Definición Del Problema	No hubo sugerencias
4	Marcelo Geovanny Uvidia Leguísamo Josue Abraham Sadaka Alvarez	Viernes, 11 De Octubre De 2024	8:00 - 10:00 Pm	Introducción, Antecedentes, Definición Del Problema, Justificación Del Problema Y Objetivos. Cuadros De Resumen De Parámetros.	Introducción, Antecedentes, Definición Del Problema, Justificación Del Problema Y Objetivos. Parámetros De Las Normativas, Cuadros De Resumen ASCE 7-22, Nec-15, Peruana, Italiana
5	Marcelo Geovanny Uvidia Leguísamo Josue Abraham Sadaka Alvarez	Domingo, 20 De Octubre De 2024	8:00 - 10:00 Pm	Marco Introductorio Aprobado	Se Revisó Todo Lo Pertinente Al Marco Introductorio
6	Marcelo Geovanny Uvidia Leguísamo Josue Abraham Sadaka Alvarez	Domingo, 3 De Noviembre De 2024	8:00 - 10:00 Pm	Pendiente Popper De Análisis De Sensibilidad Del Ingeniero Carofilis.	Revisar Artículo científico Propuesto Y Los Videos De Aplicaciones De Rotulas, Correcciones a La Memoria, Correcciones a Las Gráficas Comparativas
7	Marcelo Geovanny Uvidia Leguísamo Josue Abraham Sadaka Alvarez	Viernes, 15 De Noviembre De 2024	6:00 - 8:00 Pm	Cálculo De Rotulas En Etabs	Se Debe Resolver Los Problemas Encontrados Al Definir las Rotulas Plásticas
8	Marcelo Geovanny Uvidia Leguísamo Josue Abraham Sadaka Alvarez	Domingo, 17 De Noviembre De 2024	7:00 - 11:00 Pm	Revisión de Avance Del trabajo de titulación Al 60%	Se Revisaron Todos Los Resultados Obtenidos, La Definición Del Sismo Con Los Estudios De Suelos Obtenidos. Se Definen Conclusiones Y Recomendaciones Previstas O Projectadas Para El Alcance Que Se Prevee Del Diseño. Se Recomienda Que En Caso De No Alcanzar Los Objetivos Propuestos Estos Sean Mejorados Con Respecto Al Alcance.
9	Marcelo Geovanny Uvidia Leguísamo Josue Abraham Sadaka Alvarez	Martes, 26 De Noviembre De 2024	8:00 - 10:00 Pm	Corrección De Espectros Y Gráficas De Desplazamiento Y Aceleraciones Para Determinar El Tipo De Reforzamiento Que Se	Corrección De Espectros Y Gráficas De Desplazamiento Y Aceleraciones Para Determinar El Tipo De Reforzamiento Que Se Requiere Bajo El Modo De Falla Encontrado

				Requiere Bajo El Modo De Falla Encontrado	
10	Marcelo Geovanny Uvidia Leguísamo Josue Abraham Sadaka Alvarez	Viernes, 29 De Noviembre De 2024	8:00 - 10:00 Am	Se Reviso El Parámetro De Control Sísmico, Y Revisar Las Comparativas Entre Las Fallas Propuestas En Cada Norma	Se Reviso El Parámetro De Control sísmico, Y Revisar Las Comparativas Entre Las Fallas Propuestas En Cada Norma
11	Marcelo Geovanny Uvidia Leguísamo Josue Abraham Sadaka Alvarez	Sábado, 30 De Noviembre De 2024	1:00 - 3:00 Pm	Se Revisaron Las Iteraciones Del Modelo Y El Desarrollo De Los Reforzamientos	Se Reviso El Parámetro De Control sísmico, Y Revisar Las Comparativas Entre Las Fallas Propuestas En Cada Norma
12	Marcelo Geovanny Uvidia Leguísamo Josue Abraham Sadaka Alvarez	Lunes, 9 De Diciembre De 2024	8:00 - 10:00 Pm	Se Revisaron Las Iteraciones Del Modelo Y El Desarrollo De Los Reforzamientos	Se Reviso El Parámetro De Control sísmico, Y Revisar Las Comparativas Entre Las Fallas Propuestas En Cada Norma
13	Marcelo Geovanny Uvidia Leguísamo Josue Abraham Sadaka Alvarez	Jueves, 12 De Diciembre De 2024	7:00 - 9:00 Am	Revisión De Memoria Técnica Y Preparación 3 Minute Spitch	Se Debe Realizar Unas Correcciones De La Memoria Y Se Agregan Unos Criterios
14	Marcelo Geovanny Uvidia Leguísamo Josue Abraham Sadaka Alvarez	Sábado, 14 De Diciembre De 2024	1:00 - 3:00 Pm	Finalización De Los Modelos Y Tipeo Final Del Proyecto	Mejoras La Escritura En La Memoria De Trabajo De Titulación

BIBLIOGRAFÍA

- American Society of Civil Engineers. (2022). *ASCE/SEI 7-22*. American Society of Civil Engineers.
- ASCE 7. (22). American Society of Civil Engineers.
- ASCE 41. (22). American Society of Civil Engineers.
- Chan, A., K. ., Tarantola, S. ., & Saltelli. (2000). Sensitivity Analysis of Model Output: Performance of Black-Box Techniques when Applied to Complex Models. *Reliability Engineering & System Safety*, 66(1), 69–81.
- Chopra, A. K. (2017). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering* (5a ed.). Pearson.
- Chopra, A. K., & Goel, R. K. (1999). Capacity-Demand-Diagram Methods for Estimating Seismic Deformations of Inelastic Structures. *Earthquake Spectra*, 15(4), 637–656.
- Comité Europeo de Normalización (CEN). (2004). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance*. Comité Europeo de Normalización (CEN).
- E.030. (18). SENCICO.
- Egred, J. (2004). Terremotos históricos en el Ecuador. *Revista Geológica de América Central*, 31, 127–136.
- Erduran, E., & Ruicon, L. F. (2010). Seismic design based on drift and strength demands. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 39(10), 1121–1142.
- Fardis, M. N. (Ed.). (2009). *Seismic Design, Assessment and Retrofitting of Concrete Buildings: Based on EN-Eurocode 8*. Springer.
- Helton, J. C., & Davis, F. J. (2003). Latin Hypercube Sampling and the Propagation of Uncertainty in Analyses of Complex Systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 81(1), 23–69.
- Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional. (2015). *Sismicidad en Ecuador*. Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN). <https://www.igepn.edu.ec/sismologia1/sismicidad-en-ecuador>
- Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional. (2016). *Informe del Terremoto del 16 de Abril de 2016*. Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional. <http://www.igepn.edu.ec/>
- Kanamori, K. C., Hiroo & McNally. (1982). Variable rupture mode of the subduction zone along the Ecuador-Colombia coast. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72(4), 1241–1253.

Maffei, J., & Yuen, N. (2007). Seismic Assessment and Retrofit of Reinforced Concrete Buildings. *Fib Bulletin*, varios.

Magazine, S. (2022, diciembre 20). Diseño Sísmico por Desempeño. *Sismica Institute*. <https://sismica-institute.com/disenio-sismico-por-desempeno/>

Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H., & Fenves, G. L. (2006). *OpenSees Command Language Manual*. Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center. <https://opensees.berkeley.edu/>

Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2015). *Norma Ecuatoriana de la Construcción*. Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI).

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú. (2018). *Norma Técnica E.030: Diseño Sismorresistente*. SENCICO.

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. (2018). *Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018)*. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana.

Miranda, E., & Bertero, V. V. (1994). Evaluation of strength reduction factors for earthquake-resistant design. *Earthquake Spectra*, 10(2), 357–379.

Moehle, J. P. (2015). *Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings*. McGraw-Hill.

Morales, S., A. ., Pérez, L. ., & Gómez. (2017). Comparación de normativas sísmicas: Impacto en el diseño estructural. *Ingeniería Sísmica*, 89, 45–58.

NEC. (15). Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI).

NTC. (2018). Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana.

Pampanin, S. (2012). Towards the next generation of standards for seismic assessment and design. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10, 667–681.

Panagiotakos, T. B., & Fardis, M. N. (1999). Deformations of Reinforced Concrete Members at Yielding and Ultimate. *ACI Structural Journal*, 96(3), 383–392.

Pauley, T., & Priestley, M. J. N. (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. John Wiley & Sons.

Paz, W. M. & Leigh. (2004). *Structural Dynamics: Theory and Computation* (5th ed.). Springer.

Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., & Kowalsky, M. J. (2007). *Displacement-Based Seismic Design of Structures*. IUSS Press.

ResearchGate. (s/f). *Figure 14. Building collapse caused by failure of the shortest*. ResearchGate. Recuperado el 17 de diciembre de 2024, de https://www.researchgate.net/figure/Building-collapse-caused-by-failure-of-the-shortest-first-story-columns-in-a-sloping_fig10_249872895

Sadaka Alvarez, J. A., & Uvidia, M. (2024). *Análisis de Sensibilidad de Parámetros Normativos Locales e Internacionales en el Desempeño Sísmico: Optimización de Estrategias de Reforzamiento en una Edificación de Cinco Pisos Ubicado en el Cantón Guayaquil, Provincia del Guayas – Ecuador.*

Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., & Tarantola, S. (2008). *Global Sensitivity Analysis: The Primer.* Wiley.

Zhou, G., & Gen, M. (2011). *Genetic Algorithms and Engineering Optimization.* John Wiley & Sons.

PLANOS Y ANEXOS

ANEXO 1. MODELO ESTRUCTURAL

ANEXO 2. GRAFICAS DE PARAMETROS DE SENSIBILIDAD

ANEXO 3. DETERMINACION DE DEMANDAS Y CALCULO DE CUANTIAS

ANEXO 3. CALCULO Y DETERMINACIÓN DE ROTULAS

ANEXO 4. REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL

ANEXO 5. GRAFICA CON RESULTADOS COMPLETOS