



UTMACH

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

Estudio del comportamiento post-sismo de elementos y conexiones en estructuras con irregularidad en elevación en la Universidad Técnica de Machala

**CORDOVA LUDEÑA ANTHONY JOEL
INGENIERO CIVIL**

**PAUCAR CALLE JUANA ABIGAIL
INGENIERA CIVIL**

**MACHALA
2025**



UTMACH

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**Estudio del comportamiento post-sismo de elementos y conexiones
en estructuras con irregularidad en elevación en la Universidad
Técnica de Machala**

**CORDOVA LUDENA ANTHONY JOEL
INGENIERO CIVIL**

**PAUCAR CALLE JUANA ABIGAIL
INGENIERA CIVIL**

**MACHALA
2025**



UTMACH

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

PROYECTOS TÉCNICOS

**Estudio del comportamiento post-sismo de elementos y
conexiones en estructuras con irregularidad en elevación en la
Universidad Técnica de Machala**

**CORDOVA LUDENA ANTHONY JOEL
INGENIERO CIVIL**

**PAUCAR CALLE JUANA ABIGAIL
INGENIERA CIVIL**

ORDOÑEZ FERNANDEZ JOSE LUIS

**MACHALA
2025**



Córdova - Paucar

2%
Textos sospechosos



2% Similitudes
0% similitudes entre comillas
< 1% entre las fuentes mencionadas
0% Idiomas no reconocidos

Nombre del documento: Córdova - Paucar.pdf
ID del documento: b8cafe4adb42e36bf64c05a7f916374a412006ba
Tamaño del documento original: 3,21 MB

Depositante: JOSE LUIS ORDOÑEZ FERNANDEZ
Fecha de depósito: 30/7/2025
Tipo de carga: interface
fecha de fin de análisis: 30/7/2025

Número de palabras: 22.919
Número de caracteres: 163.613

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes principales detectadas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	ROMERO - RUIZ.pdf ROMERO - RUIZ #1450d1 Viene de de mi biblioteca 11 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (85 palabras)
2	1library.co Fase 3 Peligrosidad sísmica y respuesta de sitio https://1library.co/article/fase-peligrosidad-sismica-y-respuesta-de-sitio.qvlwl60y 16 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (92 palabras)
3	repositorio.utmachala.edu.ec Velocidades de ondas de corte y periodos de vib... http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/7905/3/TTUAIC_2016_IC_CD0010.pdf.txt 13 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (65 palabras)
4	revistas.ucu.edu.uy El MBPQS en Ecuador: Exploración de la validez de conteni... https://revistas.ucu.edu.uy/index.php/cienciaspsicologicas/article/view/2063/2024 8 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (61 palabras)
5	repositorio.utmachala.edu.ec https://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/23550/1/Trabajo_Titulacion_3580.pdf 2 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (36 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	PAUTA-SANMARTIN.pdf PAUTA-SANMARTIN #6261cf Viene de de mi biblioteca	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (34 palabras)
2	doi.org Experimental Research on Seismic Behavior of Haunched Concrete Bea... https://doi.org/10.3390/su142315644	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (25 palabras)
3	doi.org https://doi.org/10.7764/RIC.00057.21	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (20 palabras)
4	doi.org https://doi.org/https://doi.org/10.54097/hset.v5i1.8233	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (20 palabras)
5	hdl.handle.net Evaluación de la vulnerabilidad sísmica y económica de edificaci... http://hdl.handle.net/20.500.12969/3837	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (16 palabras)

Fuentes mencionadas (sin similitudes detectadas) Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

1	https://doi.org/10.15680/ijirset.2022.1110028
2	https://doi.org/10.1007/s10518
3	https://doi.org/10.17559/TV
4	https://doi.org/10.22363/1815-5235
5	https://doi.org/10.1556/1848.2021.00229

CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

Los que suscriben, CORDOVA LUDENA ANTHONY JOEL y PAUCAR CALLE JUANA ABIGAIL, en calidad de autores del siguiente trabajo escrito titulado Estudio del comportamiento post-sismo de elementos y conexiones en estructuras con irregularidad en elevación en la Universidad Técnica de Machala, otorgan a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tienen potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

Los autores declaran que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

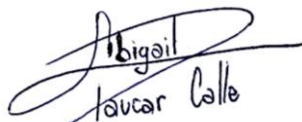
Los autores como garantes de la autoría de la obra y en relación a la misma, declaran que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asumen la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.



CORDOVA LUDENA ANTHONY JOEL

0706192267



PAUCAR CALLE JUANA ABIGAIL

0750486540

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía, mi refugio y mi fortaleza. Porque sin su presencia constante en mi vida, este logro no habría sido posible. Siempre he seguido sus pasos y, en cada momento difícil, sentí su cuidado, su consuelo y su dirección.

A mis padres, Raquel Ludeña y Luis Córdova, a quienes dedico este triunfo más que a mí mismo. Ustedes renunciaron a mucho para que yo pudiera tener lo necesario: un pasaje para ir a clases, un almuerzo, una motivación diaria. Cuando me sentía triste, fueron ustedes quienes me sostuvieron. A mi madre, por su sacrificio silencioso y su entrega incansable. A mi padre, por trabajar de sol a sol para que nunca me faltara nada. Este logro también es suyo.

A mi hermano Joao Córdova, a quien amo profundamente. Todo lo que hago intento hacerlo bien, con el deseo de ser un ejemplo digno para ti.

A mis abuelos, Isabel, Vicente y Francisco, por ser la raíz de todo. Su amor, sus valores y sus palabras me han acompañado a lo largo de este camino. Sin ustedes, nada de esto sería posible. Son mi origen, mi historia y mi inspiración.

“Todo lo puedo en Cristo que me fortalece.”

Filipenses 4:13

Anthony Joel Córdova Ludeña

DEDICATORIA

Dedico esta tesis, sobre todo a Jehová, quien ha sido mi guía constante a lo largo de este camino, dándome fortaleza en medio del cansancio y calma en los momentos de mayor angustia.

A mi mamá, Juana Calle, mi pilar más firme durante toda mi carrera universitaria, gracias a su amor incondicional, por acompañarme silenciosamente en cada desvelo y por ser ese soporte inquebrantable que evitó que desistiera en los momentos más difíciles. A mi padre, Efrén Paucar, por brindarme el respaldo necesario para cumplir mis sueños, por creer en mí y por impulsarme a llegar hasta aquí.

A mi hermana, Daniela Paucar, una persona fundamental en mi vida, por estar siempre dispuesta a tenderme la mano, por el apoyo constante y por ser mi sostén en los momentos más complicados.

A mi novio, Steven Márquez, una de las personas más importantes para mí, gracias por el amor, comprensión inagotable, apoyo sincero y por estar presente cuando más lo necesitaba. Tu compañía hizo este proceso mucho más llevadero.

A Anthony Córdova, amigo y compañero de tesis desde el primer semestre, por compartir este recorrido académico conmigo con compromiso, esfuerzo y compañerismo.

Finalmente, a los amigos que la universidad me regaló y que marcaron esta etapa con su amistad: Anthony, Davis, Axel, Steven, Freddy, Dayana, Kevin y José. Gracias por los momentos compartidos, por las risas, los retos superados juntos y por ser parte de este capítulo tan importante en mi vida.

Juana Abigail Paucar Calle

AGRADECIMIENTO

A Dios, por sobre todas las cosas. A Él sea toda la honra y la gloria, gracias por sostenerme, por abrir caminos cuando todo parecía cerrado, por darme fuerza en la debilidad y paz en medio de la tormenta. Por tu gracia, hoy estoy donde estoy, y este logro te pertenece primero a Ti.

A mis padres, Raquel Ludeña y Luis Córdova, y a mi hermano Joao Córdova, quienes han sido mi motor, mi refugio y mi más grande inspiración, gracias por cada sacrificio, por su amor incondicional y por estar presentes en cada etapa de este proceso. Este título es también suyo.

A toda mi familia, por acompañarme emocionalmente, por sus palabras de aliento, por su confianza en mí y por su cariño constante, incluso en la distancia, son parte esencial de este logro.

A mi amiga y compañera de tesis, Abigail Paucar, con quien compartí este camino desde el primer semestre. Gracias por tu compromiso, tu constancia y tu amistad inquebrantable, este logro también es fruto de nuestro esfuerzo conjunto.

Al ingeniero José Luis Ordóñez, mi tutor, por su dedicación, guía y por siempre estar dispuesto a compartir su conocimiento. Gracias por corregirnos con paciencia, orientarnos con sabiduría y motivarnos a alcanzar la excelencia.

A mis amigos de la universidad: Abigail, Axel, Steven, Freddy, Davis, José, Kevin y Dayana. Gracias por cada clase, cada trabajo en grupo, cada apoyo mutuo y cada risa compartida. Sin ustedes, esta etapa no habría sido igual, son más que compañeros: son verdaderos amigos.

Y finalmente, a mi ídolo Cristiano Ronaldo, por ser un ejemplo de disciplina, esfuerzo y perseverancia. Su historia me enseñó que los sueños se alcanzan trabajando duro, creyendo en uno mismo y nunca rindiéndose, sin importar las circunstancias.

Anthony Joel Córdova Ludeña

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Jehová, sin su guía y misericordia, jamás habría llegado hasta este punto. Él fue mi refugio en los momentos de incertidumbre, mi paz en medio del cansancio y quien me sostuvo incluso cuando sentí que ya no podía continuar.

También agradezco al ing. José Luis Ordóñez, tutor de tesis, por su valiosa orientación, paciencia y compromiso a lo largo del proceso. Gracias a su experiencia y guía, este proyecto ha llegado a buen término con responsabilidad y profesionalismo.

Extiendo este agradecimiento con profundo agradecimiento a todos los docentes que, a lo largo de mi formación universitaria, aportaron no solo conocimientos, sino también inspiración, disciplina y pasión por la carrera. Cada clase, cada consejo y cada exigencia académica dejaron huellas que me acompañarán siempre en mi camino profesional.

Juana Abigail Paucar Calle

RESUMEN

El presente trabajo de titulación aborda el estudio del comportamiento post-sísmico de los elementos y conexiones estructurales en edificaciones con irregularidades en elevación, tomando como objeto de estudio a un edificio representativo ubicado en la Universidad Técnica de Machala. Esta investigación se enmarca en el contexto de alta sismicidad que caracteriza a la zona, lo cual exige una evaluación rigurosa del desempeño sísmico de la construcción existente, especialmente aquellas que no cumplen de manera óptima con los criterios de regularidad geométrica establecidos en las normativas de diseño sismorresistente.

El propósito principal de este estudio es evaluar el nivel de desempeño estructural de una edificación frente a cargas sísmicas, identificando las zonas de mayor vulnerabilidad, con el fin de proponer medidas técnicas que permitan optimizar su comportamiento ante futuros eventos sísmicos. Para ello, se aplicó una metodología que incluye la revisión bibliográfica especializada, el levantamiento físico del edificio mediante visitas in situ, y la elaboración de un modelo tridimensional con dimensiones reales utilizando software de análisis estructural.

Se realizaron simulaciones considerando diferentes escenarios de carga gravitacional y sísmica, aplicando tanto análisis estático como dinámico espectral. A partir de estos resultados, se interpretaron los efectos de las irregularidades en la respuesta estructural, especialmente en las zonas donde se presenta discontinuidad geométrica vertical, que son zonas críticas para la estabilidad del sistema. También se diagnosticó el estado actual del edificio tras un reciente sismo significativo ocurrido en la región.

Palabras claves: irregularidad, vulnerabilidad, derivas, discontinuidad.

ABSTRACT

This thesis addresses the study of the post-seismic behavior of structural elements and connections in buildings with elevation irregularities, taking as its object of study a representative building located at the Technical University of Machala. This research is framed within the context of high seismicity that characterizes the area, which requires a rigorous evaluation of the seismic performance of existing construction, especially those that do not optimally comply with the geometric regularity criteria established in earthquake-resistant design regulations.

The main purpose of this study is to evaluate the structural performance of a building under seismic loads, identifying the areas of greatest vulnerability, in order to propose technical measures to optimize its behavior in future seismic events. To this end, a methodology was applied that includes a specialized literature review, a physical survey of the building through on-site visits, and the development of a three-dimensional model with real dimensions using structural analysis software.

Simulations were carried out considering different gravitational and seismic load scenarios, applying both static and dynamic spectral analysis. Based on these results, the effects of irregularities on the structural response were interpreted, especially in areas where vertical geometric discontinuity occurs, which are critical areas for the stability of the system. The current state of the building was also diagnosed following a recent significant earthquake in the region.

Keywords: irregularity, vulnerability, drifts, discontinuity.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO	7
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	10
ÍNDICE DE TABLAS	11
INTRODUCCIÓN	12
Importancia del problema	12
Actualidad de la problemática	12
1. CAPITULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.1. Antecedentes	14
1.2 Descripción de la situación problemática	17
1.3 Formulación del problema (preguntas científicas)	18
1.4 Delimitación del estudio	19
1.5 Justificación	20
1.6 Objetivos	21
1.6.1 Objetivo General	21
1.6.2 Objetivos Específicos	21
2. CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO	22
2.1 Antecedentes contextuales	22
2.1.1 Macro	22
2.1.2 Meso	23
2.1.3 Micro	24
2.2 Antecedentes conceptuales	24
2.2.1 Capacidad de disipación de energía	24
2.2.2 Comportamiento post-sísmico	24
2.2.3 Conexiones	25
2.2.4 Dinámica estructural	25
2.2.5 Diseño sismorresistente	25
2.2.6 Ductilidad	26
2.2.7 Irregularidad en elevación	26
2.2.8 Normativas sísmicas	26

2.2.9 Rigidez	27
2.2.10 Sismo (terremoto)	27
2.2.11 Vulnerabilidad Sísmica.....	27
2.2.12 Demanda sísmica	28
2.2.13 Factores de participación	28
2.3 Antecedentes referenciales	28
3. CAPITULO 3: METODOLOGÍA	31
3.1 Modalidad básica de la investigación	31
3.2 Tipo de investigación.....	31
3.2.1 Documental.....	31
3.2.2 De Campo	32
3.2.3 Experimental.....	32
3.3 Objeto de Estudio.....	32
3.4 Descripción de la población y muestra	33
3.5 Recopilación de información	33
3.5.1 Revisión de documentos técnicos disponibles del edificio.....	33
3.5.2 Validación de información municipal mediante visitas in situ	33
3.5.3 Levantamiento físico del edificio	34
3.5.4 Medición con herramientas manuales y electrónicas	34
3.5.5 Determinación y verificación de dimensiones reales	34
3.6 Métodos teóricos con los materiales utilizados	35
3.6.1 Modelación	35
3.6.2 Validación de datos mediante visitas específicas	35
3.6.3 Elaboración del modelo estructural en software comercial de análisis estructural.....	35
3.6.4 Consideración de cargas gravitacionales y sísmicas.....	37
3.7 Análisis Estructural.....	37
3.7.1 Análisis modal espectral	37
3.7.2 Análisis lineal	38
3.8 Metodología para la evaluación de resultados	39
3.8.1 Verificación de normas y requisitos de diseño	39
3.8.2 Evaluación del comportamiento global de la estructura	39

3.8.3 Identificación de zonas críticas.....	39
3.8.4 Evaluación del comportamiento global de la estructura.....	39
3.8.5 Diagnóstico del estado post-sísmico del edificio.....	40
4. CAPITULO 4: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	42
4.1 Modelación	42
4.2 Especificaciones Técnicas de la edificación.....	43
4.2.1 Elementos estructurales	43
4.2.3 Distribución de cargas	52
4.4 Sísmico estático lineal	57
4.5 Análisis dinámico espectral y sísmico estático.....	59
4.6 Cálculo de derivas de entrepiso	62
4.6.1 Derivas en dirección X	63
4.6.2 Derivas en dirección Y	67
4.7 Evaluación del desempeño estructural frente al sismo del 2023 con epicentro en la Isla Puná, Golfo de Guayaquil.....	70
4.7.1 Construcción del espectro de respuesta del sismo 2023	71
4.7.2 Incorporación del espectro real al modelo estructural y ajuste por condiciones locales	72
4.7.3 Resultados de derivas obtenidas con el sismo del 2023	73
4.7.4 Revisión de cuantía para elementos estructurales.....	78
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
5.1 Conclusiones.....	83
5.2 Recomendaciones	84
Bibliografía	86
ANEXO	90

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Ecuador, zonas sísmicas para propósito de diseño y valor del factor de zona	15
Ilustración 2: Árbol de problemas	18
Ilustración 3: Zona de estudio.....	20
Ilustración 4. Zona de estudio.....	42
Ilustración 5. Bloques de poliestireno.....	47
Ilustración 6. Sección equivalente de losa alivianada.....	48
Ilustración 7. Configuración estructural en elevación en dirección X.....	51
Ilustración 8. Configuración estructural en elevación en dirección Y.....	52
Ilustración 9. Espectro elástico e inelástico-suelo tipo E.....	57
Ilustración 10. Vista en planta de la estructura	59
Ilustración 11. Ajuste de cortante en X.....	62
Ilustración 12. Ajuste de cortante en Y.....	62
Ilustración 13. Localización de máximas derivas en dirección en X.....	63
Ilustración 14. Derivas inelásticas en eje D-6 en sismo de diseño en dirección X.....	64
Ilustración 15. Derivas inelásticas en eje J-9 en sismo de diseño en dirección X.....	65
Ilustración 16. Diagrama de derivas máximas en dirección en X.....	66
Ilustración 17. Localización de máximas derivas en dirección en Y.....	68
Ilustración 18. Derivas inelásticas en eje O-13,18 y 19 en sismo de diseño en dirección Y	69
Ilustración 19. Diagrama de derivas máximas en dirección en Y.....	69
Ilustración 20. Espectro de respuesta del sismo de 18 de marzo del 2023	72
Ilustración 21. Ajuste escalado con aproximación	73
Ilustración 22. Derivas inelásticas en eje J-9 en sismo de respuesta en dirección X.....	75
Ilustración 23. Diagrama de derivas máximas de sismo 2023 en dirección en X	75
Ilustración 24. Derivas inelásticas en eje O-13,18 y 19 en sismo de respuesta en dirección Y.....	77
Ilustración 25. Diagrama de derivas máximas en sismo 2023 en dirección en Y	77
Ilustración 26. Ubicación de vigas más solicitadas	79
Ilustración 27. Ubicación de columna más solicitada.....	81
Ilustración 28. Plano arquitectónico de primera planta alta.....	97
Ilustración 29. Plano arquitectónico de segunda planta alta	98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Población proyectada 2020-2025	14
Tabla 2. Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada.....	15
Tabla 3. Uso funcional de cada nivel.....	33
Tabla 4. Combinaciones de carga aplicadas en el diseño	36
Tabla 5. Vigas	43
Tabla 6. Columnas	45
Tabla 7. Datos de losa alivianada	48
Tabla 8. Reacciones en puntos.....	50
Tabla 9. Cargas muertas y vivas de losa de la caseta.....	53
Tabla 10. Carga de tanque de agua	53
Tabla 11. Carga del ascensor	53
Tabla 12. Cargas muertas de cubierta	54
Tabla 13. Cargas vivas de cubierta	55
Tabla 14. Coeficiente k.....	58
Tabla 15. Participación modal	60
Tabla 16. Fuerzas cortantes estáticas y dinámicas.....	61
Tabla 17. Derivas en eje D-6	64
Tabla 18. Derivas en eje J-9.....	65
Tabla 19. Tabla general de derivas en dirección en X.....	67
Tabla 20. Derivas en eje O-13,18 y 19	68
Tabla 21. Tabla general de derivas en dirección en Y	70
Tabla 22. Derivas de sismo 2023 en eje D-6	74
Tabla 23. Derivas de sismo 2023 en eje J-9	74
Tabla 24. Derivas de sismo 2023 en eje O-13,18 y 19	76
Tabla 25. Límites normativos	78
Tabla 26. Cuantía de vigas.....	79
Tabla 27. Cuantía de columna	80

INTRODUCCIÓN

Importancia del problema

La preocupación por la seguridad estructural en zonas de alta vulnerabilidad sísmica ha llevado a la comunidad a presentar interés en el comportamiento de las estructuras ante un sismo. En este contexto, el presente trabajo de titulación se centra en el estudio del comportamiento post-sismo de los elementos y conexiones en estructuras con irregularidad en elevación, un tema de vital relevancia, especialmente en regiones con alto riesgo sísmico como Machala.

La importancia de este estudio radica no solo en la mejora de las prácticas de diseño y construcción, sino también en la contribución al desarrollo de normativas que promuevan edificaciones más confiables. A través de la investigación de las respuestas estructurales post-sismo y el análisis de los elementos y conexiones en estructuras irregulares, se busca proporcionar información valiosa que ayude a mitigar la vulnerabilidad de las estructuras asociados a los terremotos. Este trabajo no tiene únicamente implicaciones académicas, sino que también se proyecta como una herramienta fundamental para ingenieros y arquitectos que trabajen en la zona, fomentando un entorno urbano más seguro para la población.

Actualidad de la problemática

Ecuador es un país que está ubicado en la interfaz entre las placas tectónicas de Nazca y Sudamericana, dentro del "Cinturón de Fuego del Pacífico", por ello, ha experimentado múltiples eventos sísmicos devastadores a lo largo de su historia, lo que ha evidenciado la necesidad de desarrollar y aplicar normas de diseño más rigurosas. Las estructuras con irregularidades en elevación son particularmente susceptibles a fallos, ya que estas discontinuidades pueden alterar la distribución de fuerzas durante un sismo, comprometiendo la integridad de las conexiones. Este aspecto es crucial, ya que dichas conexiones son elementos críticos que garantizan la estabilidad y resistencia de las edificaciones (Cajamarca-Zuniga et al., 2022).

Machala, es un importante centro económico y comercial, sin embargo, enfrenta desafíos significativos respecto a términos de seguridad estructural atribuido a su ubicación geográfica. Esta ciudad está expuesta a diversos fenómenos naturales, incluidos sismos, que han dejado huellas profundas en su infraestructura. La historia sísmica del país, referente a los eventos sísmicos que se han presentado, subraya la necesidad urgente de

implementar prácticas de diseño y construcción más seguras, especialmente en áreas urbanas densamente pobladas.

1. CAPITULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes

Este proyecto de investigación se llevará a cabo en la ciudad de Machala, capital de la provincia de El Oro, ubicada en la costa ecuatoriana. Debido a su posición estratégica cerca del Golfo de Guayaquil y la frontera con Perú, Machala se ha convertido en un centro clave para el comercio, la agricultura y la economía nacional.

La ciudad de Machala, capital de la provincia de El Oro, tiene una población de 305271 habitantes, según datos del INEC (2024), con un 85% de ellos viviendo en zonas urbanas. Este crecimiento poblacional ha llevado a la expansión de la ciudad hacia áreas con mayor riesgo geológico, como terrenos aluviales y suelos blandos, lo que aumenta la vulnerabilidad ante fenómenos naturales, especialmente terremotos (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2024).

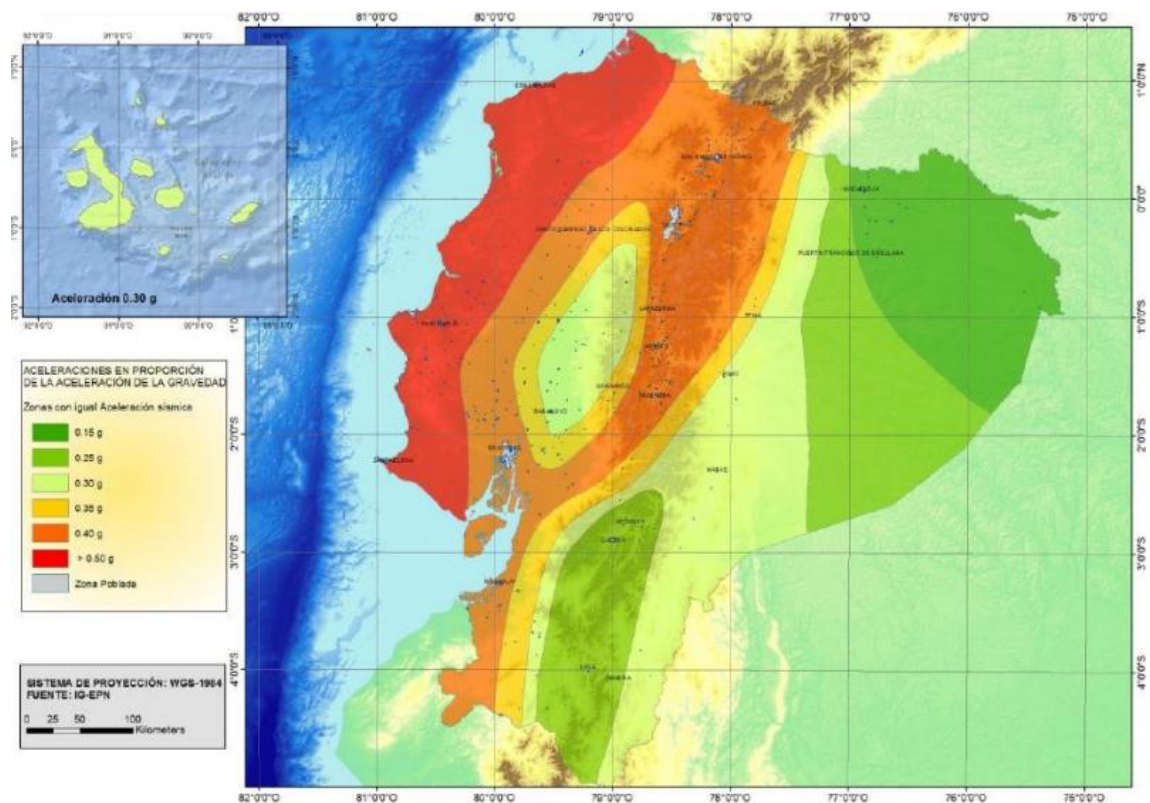
Tabla 1. Población proyectada 2020-2025

Año	POBLACIÓN PROYECTADA					
	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Población	289.141	292.453	295.765	299.077	302.389	305.701

Fuente: Elaboración propia

Según NEC-2015 el mapa de zonificación sísmica para diseño describe los valores de Z (aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño) por sectores descritos en la Ilustración 3. El diseño proviene del resultado del estudio de peligro sísmico para un 10% de excedencia en 50 años (período de retorno 475 años), que incluye una saturación a 0.50 g de los valores de aceleración sísmica en roca en el litoral ecuatoriano que caracteriza la zona VI. En concordancia a la Tabla 2, Machala se encuentra en la zona sísmica V de un valor de 0.4 considerada como una zona con alto peligro sísmico.

Ilustración 1: Ecuador, zonas sísmicas para propósito de diseño y valor del factor de zona



Fuente: Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional

Tabla 2. Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada.

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.50
Caracterización del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy alta

Fuente: Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015, NEC-Peligro Sísmico-Diseño Sismorresistente

Estas edificaciones irregulares carecen de las medidas de seguridad necesarias para resistir los sismos, lo que aumenta el riesgo de colapsos y pérdidas de vidas. La falta de estudios geotécnicos también impide identificar las condiciones del terreno, lo que puede amplificar las ondas sísmicas y agravar los daños. En contraste, las edificaciones formales, diseñadas bajo normativas técnicas, consideran estos factores para minimizar los riesgos. En zonas cercanas a fallas, se emplean técnicas constructivas específicas para reducir el impacto de los movimientos telúricos.

La falta de supervisión técnica en el proceso constructivo también ha llevado a fallas en las conexiones estructurales, como uniones insuficientes entre vigas, columnas y muros,

lo que compromete la estabilidad de las edificaciones (Nady et al., 2022). Además, muchas viviendas han sido ampliadas de manera informal, añadiendo pisos adicionales que exceden la capacidad de carga diseñada originalmente.

El crecimiento urbano desordenado en Machala ha generado edificaciones con diseños estructurales deficientes, que presentan irregularidades en la elevación, como pisos blandos, cambios bruscos en las dimensiones estructurales y distribución asimétrica de masas. La combinación de estas irregularidades con la falta de cumplimiento de las normativas sismo-resistentes aumenta significativamente el riesgo de colapso en caso de un evento sísmico. Por lo tanto, es fundamental estudiar las conexiones, ya que estas juegan un papel crucial en la transferencia de cargas en una estructura y su comportamiento post-sismo determina en gran medida la capacidad de la edificación para resistir futuros eventos sísmicos (Villafuerte-Lujano & Fernández-Dávila, 2024).

La infraestructura de la universidad es esencial para la calidad educativa, proporcionando un ambiente adecuado para el aprendizaje y la investigación. Sin embargo, la UTMACH enfrenta desafíos en cuanto a la seguridad estructural y el mantenimiento de sus edificaciones, lo que es especialmente importante en una ciudad como Machala, ubicada en una zona sísmica. Es fundamental que las edificaciones cumplan con normativas modernas de construcción sismo-resistente y que se realicen evaluaciones periódicas y mantenimientos constantes para prevenir deterioros que comprometan la seguridad y funcionalidad de los espacios. Esto es crucial para garantizar la seguridad de la comunidad universitaria y mantener la calidad de la educación que se ofrece. La UTMACH debe priorizar la seguridad y el mantenimiento de sus edificaciones para seguir siendo un centro de excelencia académica y un motor de desarrollo para la región.

Estas deficiencias estructurales aumentan significativamente la vulnerabilidad de las edificaciones en Machala, lo que podría derivar en colapsos parciales o totales durante un evento sísmico. Incluso en casos donde la estructura principal no colapse, los daños no estructurales, como desprendimientos de paredes divisorias, ventanas y techos, representan un riesgo considerable para los ocupantes. La falta de cimentaciones adecuadas y las irregularidades estructurales en zonas con suelos blandos agravan los daños debido a la amplificación de las ondas sísmicas y los efectos de resonancia (Y. Zhang et al., 2022).

1.2 Descripción de la situación problemática

La subestimación de las cargas sísmicas puede llevar a un diseño estructural inadecuado, lo que a su vez puede causar fallas significativas en las conexiones de los sistemas estructurales. Estas fallas pueden comprometer la integridad del edificio, ya que las conexiones son clave para la distribución de cargas. Como resultado, otros componentes estructurales también pueden resultar dañados, lo que puede llevar a un colapso parcial o total de la estructura. Por lo tanto, es fundamental realizar una evaluación sísmica precisa para garantizar la seguridad y estabilidad de las edificaciones (Xiao & Fomin, 2024).

La falta de directrices claras y precisas en el diseño estructural puede generar sistemas defectuosos, lo que aumenta la exposición de las edificaciones a riesgos y peligros. La ausencia de normativas sólidas deja a las estructuras vulnerables a amenazas que ponen en riesgo su integridad y seguridad, lo que a su vez genera desconfianza y preocupación entre los ocupantes y usuarios. Esto subraya la importancia de establecer normas y regulaciones estrictas para garantizar la construcción de edificios seguros, robustos y fiables, y así proteger la tranquilidad y bienestar de quienes los utilizan (B U & B V, 2022).

La falta de atención al mantenimiento estructural puede provocar la deterioración de componentes clave, lo que aumenta considerablemente el riesgo de colapso en los edificios. Esto pone en peligro la estabilidad y la integridad de la estructura, comprometiendo la seguridad de los ocupantes y la continuidad de las operaciones diarias. A medida que las actividades y servicios del edificio se ven interrumpidos, se produce un impacto negativo en la productividad y el bienestar de los usuarios. En consecuencia, es esencial establecer un programa de mantenimiento regular y exhaustivo para garantizar la seguridad, la funcionalidad y la durabilidad de las edificaciones (B U & B V, 2022).

Ilustración 2: Árbol de problemas



Fuente: Elaboración propia

1.3 Formulación del problema (preguntas científicas)

- ¿Cómo influye el diseño estructural inadecuado en la resistencia de un edificio a fuerzas sísmicas, y qué papel juegan las conexiones en sistemas estructurales en la propagación del daño en caso de un terremoto?

La falta de un diseño estructural adecuado puede tener consecuencias desastrosas en la capacidad de un edificio para soportar terremotos. Un edificio mal diseñado puede sufrir daños significativos o incluso colapsar durante un sismo debido a que las fuerzas sísmicas pueden superar su capacidad de resistencia (Blasi et al., 2024). Además, las conexiones en los sistemas estructurales juegan un papel fundamental en la propagación del daño en caso de un terremoto. Si estas conexiones no están diseñadas correctamente, pueden fallar y permitir que el daño se propague rápidamente, lo que puede llevar a un colapso total (Raagavi & Sidhardhan, 2021). Por lo tanto, es crucial que los ingenieros civiles diseñen estructuras que puedan resistir las fuerzas sísmicas y que las conexiones sean lo suficientemente fuertes para soportar las cargas sísmicas y prevenir la propagación del daño.

- ¿Qué factores contribuyen al incremento de vulnerabilidad sísmica en edificaciones con deficiencias en el sistema estructural, y cómo pueden ser mitigados a través de la implementación de directrices claras y protocolos de diseño estructural adecuados?

La vulnerabilidad sísmica en edificaciones con deficiencias estructurales se ve agravada por factores como la carencia de diseño sísmico adecuado, la utilización de materiales de baja calidad, la configuración inadecuada de la estructura y la presencia de defectos en la construcción. La falta de mantenimiento y la ausencia de inspecciones regulares también pueden agravar la situación. Para mitigar esta vulnerabilidad, es esencial implementar directrices claras y protocolos de diseño estructural adecuados, que incluyen análisis sísmicos exhaustivos y la aplicación de técnicas de diseño sísmico avanzadas. Además, es vital establecer programas de inspección y mantenimiento regular para detectar y corregir defectos en la estructura, lo que permitirá proteger la vida y la propiedad de las personas y reducir significativamente la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones (Santos et al., 2024).

- ¿Qué factores contribuyen al colapso estructural en edificaciones con elementos estructurales inadecuados, y cómo pueden ser identificados y mitigados a través de un programa de mantenimiento estructural efectivo?

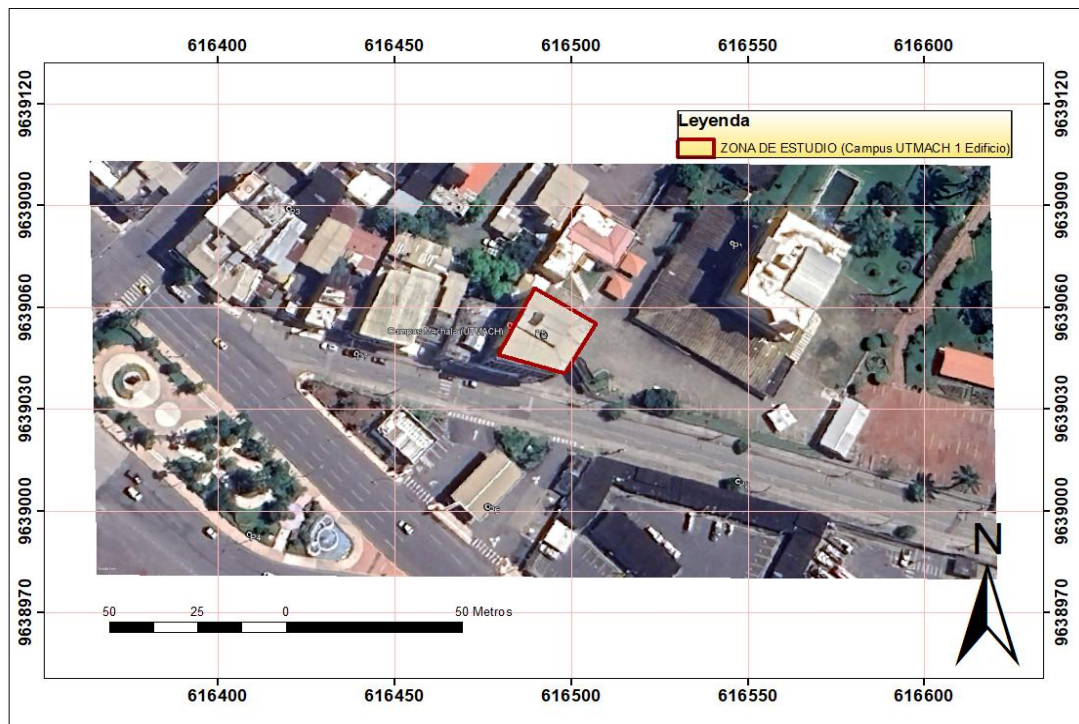
La falla estructural en edificaciones con elementos estructurales inadecuados puede ser causada por factores como la falta de diseño sísmico adecuado, la configuración inadecuada de la estructura y la presencia de defectos en la construcción. La falta de mantenimiento y la ausencia de inspecciones regulares pueden agravar la situación; para mitigar estos factores, es fundamental implementar un programa de mantenimiento estructural efectivo que incluya inspecciones regulares, análisis estructurales y reparaciones oportunas. Esto permitirá detectar defectos y debilidades en la estructura y tomar medidas correctivas antes de que se produzca un colapso. También es importante realizar análisis sísmicos detallados y evaluar la capacidad de la estructura para resistir fuerzas sísmicas, lo que permitirá reducir significativamente el riesgo de colapso estructural y proteger la vida y la propiedad de las personas (Xiao & Fomin, 2024).

1.4 Delimitación del estudio

En el presente trabajo, se planteará una problemática que afecta particularmente a los edificios irregulares en elevación de la ciudad de Machala, por ende, se enfocará el estudio en simular el comportamiento de una estructura ante cargas sísmicas para analizar los posibles daños, evaluando su vulnerabilidad sísmica para así determinar la situación de la estructura, siendo una de las mejores formas de representar esta situación es

delimitando nuestro estudio al edificio uno del Campus Machala ubicado en la calle Loja entre la intersección de la Av.25 de Junio y 10 de Agosto.

Ilustración 3: Zona de estudio



Fuente: Elaboración propia

1.5 Justificación

El estudio del comportamiento post-sismo de elementos y conexiones en un edificio de la Universidad Técnica de Machala es fundamental debido a la alta vulnerabilidad sísmica de la región. Al comprender su desempeño, especialmente en estructuras con irregularidades en elevación, se podrán identificar debilidades estructurales y mejorar las estrategias de diseño en futuras edificaciones.

La seguridad de la comunidad universitaria depende de la calidad estructural de sus instalaciones, y este análisis contribuirá a garantizar que los espacios académicos sean seguros y resistentes. Además, este estudio tiene el potencial de servir como referencia para otras construcciones en la región. El edificio seleccionado, con sus irregularidades en elevación, ofrece un caso de estudio representativo para evaluar cómo estas configuraciones afectan la estabilidad estructural durante un evento sísmico. Al examinar las fallas en los elementos y conexiones, además de su comportamiento post-sismo, se podrá establecer una base de conocimiento aplicable a una amplia variedad de estructuras similares.

Los resultados del estudio permitirán proponer estrategias de reforzamiento que optimicen la resistencia sísmica de los elementos y conexiones en edificios con irregularidades en elevación, así se podrá reducir el riesgo de daños y pérdidas de vidas en caso de un terremoto, y se podrá garantizar la continuidad de las actividades académicas y sociales en la región, lo que contribuirá a la estabilidad y el desarrollo de la comunidad. Realizar el presente trabajo permitirá consolidar lo aprendido para obtener el título de Ingeniero Civil en la Universidad Técnica de Machala, contribuyendo de esa manera al desarrollo del país.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

Evaluar el comportamiento de una edificación con irregularidad en elevación frente a cargas sísmicas, mediante análisis estructural, identificando su nivel de desempeño y su grado de vulnerabilidad de la edificación ante eventos sísmicos.

1.6.2 Objetivos Específicos

- Examinar la literatura científica y bibliográfica existente sobre el comportamiento sísmico de los elementos y conexiones en estructuras con irregularidades en elevación.
- Inspeccionar las condiciones estructurales del edificio en la Universidad Técnica de Machala, mediante visitas técnicas y revisión de información municipal del edificio, con la finalidad de que se desarrolle modelos estructurales que visibilicen su comportamiento ante eventos sísmicos.
- Examinar el desempeño post-sísmico de los elementos y conexiones estructurales en edificaciones con irregularidades en elevación, mediante el análisis y simulación estructural, con el propósito de que identifique las zonas de mayor vulnerabilidad ante eventos sísmicos.

2. CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes contextuales

2.1.1 Macro

El análisis del comportamiento sísmico en estructuras irregulares en elevación ha sido estudiado por diferentes autores en el mundo con diferentes artículos científicos por ende se enlistará investigaciones que nos ayudarán a dar un enfoque a nuestro objeto de estudio ya que se analizará nuestra situación actual con lo que se obtuvo a nivel mundial y local.

Un estudio realizado por el autor Diaferio en la región de Apulia, Italia, aborda la identificación dinámica de una estructura irregular tanto en planta como en elevación mediante el análisis modal operacional, realizaron pruebas no destructivas y modelos numéricos de elementos finitos donde obtuvieron como resultado la identificación de frecuencias naturales, formas modales y coeficientes de amortiguamiento del comportamiento torsional y flexional del edificio. Este trabajo da a conocer la importancia de integrar métodos experimentales, numéricos para mejorar la precisión en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de estructuras irregulares (Diaferio et al., 2022).

También tenemos el estudio realizado en El Cairo, Egipto, donde se llevó a cabo el análisis del impacto de edificaciones irregularidades verticales en la respuesta sísmica en concreto reforzado diseñados con marcos resistentes a momentos, este trabajo cuantifico el efecto de la ubicación y magnitud en las combinaciones de masa rigidez basadas en las propiedades dinámicas obteniendo como resultado un impacto significativo en la estructura en parte por la ubicación que afecta al periodo fundamental tanto en fuerzas cortantes como en desplazamiento máximo. El autor Nady propone que su investigación ayuda a tener una evaluación precisa en las edificaciones irregulares contribuyendo a que estas sean seguras y eficientes (Nady et al., 2022).

El autor Burgan (2021) también indica que las construcciones con anomalías estructurales, tales como la torsión y los pisos débiles, muestran un nivel de vulnerabilidad superior frente a terremotos debido a las variaciones en la rigidez y la localización del centro de masa, lo que produce significativos efectos de torsión. En su investigación llevada a cabo en Turquía, se examinaron construcciones con geometrías irregulares a través del Código de Terremotos de Turquía (TEC) y simulaciones en SAP2000, sugiriendo la inclusión de muros de corte situados estratégicamente para

rectificar estas anomalías y balancear la rigidez de la edificación, este método es particularmente pertinente para construcciones con edificaciones con irregularidad en elevación, dado que contribuye a disminuir los desplazamientos relativos entre niveles y optimiza su reacción frente a terremotos garantizando su seguridad aun en zonas sísmicas activas (Burgan, 2021).

Por último, un estudio en Albania realizado por Naser Kabashi (2023) examina el comportamiento sísmico de las uniones en estructuras de hormigón reforzado (R/C), resaltando su función crucial en la transmisión de cargas durante sismos. Basándose en el estudio de los daños provocados por el sismo en Albania en 2019, se detectaron fallos habituales, tales como la utilización de materiales de baja calidad, elementos estructurales no dúctiles y fallos en la edificación, factores que propiciaron el derrumbe de numerosas construcciones. El informe también analiza tácticas de fortalecimiento a través de polímeros reforzados con fibra (FRP), que han probado incrementar la resistencia al corte y la ductilidad de estas uniones. Mediante estudios no lineales, exámenes destructivos y no destructivos, se determina que la aplicación de FRP es una alternativa eficaz para la rehabilitación de estructuras ya existentes (Kabashi et al., 2023).

2.1.2 Meso

El estudio presentado en el artículo de los autores Alvarado Mamani y Aguilar Chuquimia (2023) analizaron edificios representativos de concreto armado en la ciudad de Juliaca, Perú centrándose en la respuesta sísmica de las edificaciones con irregularidad en elevación fundamentalmente en zonas de actividad sísmica. Los edificios con elevaciones irregulares suelen enfrentar exigencias estructurales más elevadas debido a su comportamiento dinámico no homogéneo es decir que conforme a las regulaciones vigentes del Perú (E.030, 2018), es esencial establecer normas más estrictas en los movimientos relativos entre pisos para asegurar la seguridad estructural, tal como se demuestra en los valores estimados que exceden los límites permitidos en situaciones de anomalías torsionales. Este método subraya la importancia de fortalecer los estándares de diseño en zonas de alta sismicidad para reducir los riesgos en construcciones no solo en Perú, sino que se debe tener en cuenta en muchos países los cuales pasan por alto estas situaciones en sus normativas (Alvarado Mamani & Aguilar Chuquimia, 2023).

En Ecuador, un estudio realizado por el autor Marcelo Martínez (2020) sobre el análisis sísmico de edificios en ciudades como San Lorenzo y Huaquillas, resalta la importancia de evaluar la vulnerabilidad estructural para reducir el riesgo sísmico en zonas de alta

peligrosidad. Al comparar edificios diseñados según las normativas ecuatoriana (NEC-15), colombiana (NSR-10) y peruana (E.030), se encontró que las estructuras diseñadas con la NEC-15 presentan mayor vulnerabilidad debido a sus límites permisivos en derivas de piso. En contraste, las normativas más estrictas de Colombia y Perú (1% y 0,7% respectivamente) demostraron ser más efectivas. La aplicación de normativas más rigurosas, como la NSR-10, podría mejorar significativamente el desempeño de las edificaciones ante terremotos, reduciendo el daño estructural y no estructural (Quizanga-Martínez et al., 2020).

2.1.3 Micro

En Machala, Ecuador, el autor Morocho Orellana (2022) realizó un estudio sobre la vulnerabilidad sísmica de edificios educativos, enfatizando la importancia de evaluar su comportamiento estructural en caso de terremotos moderados. A través de modelos matemáticos de análisis dinámico, como el método Tiempo-Historia en ETABS y MATLAB, se analizaron los movimientos horizontales y verticales en bloques de aulas. Los resultados mostraron que los movimientos máximos registrados, de 5 cm en pórticos longitudinales y 2 cm en pórticos transversales, no representan un riesgo significativo para la estructura del edificio ni para las personas que lo ocupan. Este enfoque es fundamental para garantizar la seguridad en zonas con alta actividad sísmica, como Ecuador, y permite mejorar los diseños estructurales y los protocolos de prevención ante futuros terremotos (Morocho-Orellana et al., 2022).

2.2 Antecedentes conceptuales

2.2.1 Capacidad de disipación de energía

La capacidad de disipación de energía es una propiedad clave de los sistemas estructurales que les permite absorber y liberar la energía generada por un terremoto a través de deformaciones inelásticas. Las conexiones entre vigas y columnas son especialmente importantes en este proceso, ya que son puntos críticos que concentran grandes fuerzas durante un sismo. En estructuras con irregularidades en altura, la distribución desigual de rigidez y masa puede aumentar la carga en estas conexiones, lo que destaca su papel crucial en la disipación de energía. Evaluar el comportamiento de estas conexiones después de un sismo es esencial para determinar su capacidad para resistir daños acumulativos y garantizar la estabilidad global de la estructura (Z. Zhang & Zhang, 2023).

2.2.2 Comportamiento post-sísmico

El comportamiento post-sísmico de un edificio se refiere a su respuesta estructural y funcional después de un terremoto, considerando los daños acumulados, las

deformaciones permanentes y la capacidad residual para soportar cargas. Las conexiones son puntos críticos debido a la concentración de esfuerzos y deformaciones que ocurren durante un sismo, lo que afecta directamente la estabilidad del edificio. En estructuras con irregularidades en altura, la distribución desigual de las fuerzas sísmicas puede exacerbar los daños en estas conexiones. Por lo tanto, es esencial analizar su comportamiento post-sísmico para determinar su capacidad de recuperación y desarrollar estrategias efectivas de reforzamiento y reparación que garanticen la seguridad y la integridad del edificio (Carrillo et al., 2024).

2.2.3 Conexiones

Las conexiones son componentes fundamentales en una estructura, ya que transmiten cargas verticales y horizontales, incluyendo las fuerzas sísmicas. Su comportamiento es crucial para la estabilidad y el rendimiento global de la estructura, ya que influye directamente en la capacidad de disipar energía y resistir deformaciones. En estructuras con irregularidades en altura, la distribución desigual de rigidez y masa puede generar demandas sísmicas concentradas en ciertas conexiones, aumentando su vulnerabilidad. El estudio de su comportamiento post-sísmico permite evaluar los daños acumulados y proponer soluciones de diseño o reforzamiento que mejoren su desempeño frente a futuros eventos sísmicos, garantizando la seguridad y la integridad de la estructura. (Huang et al., 2022)

2.2.4 Dinámica estructural

La dinámica estructural es una rama de la ingeniería que se centra en el estudio de cómo las estructuras responden a cargas dinámicas, como las generadas por terremotos, vientos o vibraciones. Analiza la influencia de factores como la masa, la rigidez, el amortiguamiento y la configuración estructural en el comportamiento de un edificio. En especial, la dinámica estructural permite entender la respuesta de las conexiones, áreas críticas en una estructura, a las fuerzas sísmicas, particularmente en estructuras con irregularidades en altura, donde la distribución desigual de masa y rigidez puede causar concentraciones de esfuerzos. Este análisis es esencial para evaluar el desempeño post-sísmico de una estructura y garantizar su seguridad y estabilidad (Diaferio et al., 2022).

2.2.5 Diseño sismorresistente

El diseño sismorresistente es un enfoque de ingeniería estructural que busca garantizar la seguridad y estabilidad de las edificaciones ante los efectos de un sismo. Se basa en principios como la ductilidad, la disipación de energía y la distribución adecuada de rigidez y masa. Las conexiones son zonas críticas que requieren un diseño cuidadoso, ya

que concentran esfuerzos importantes durante un sismo. En estructuras con irregularidad en elevación, las demandas sísmicas no se distribuyen uniformemente, lo que aumenta el riesgo de fallas localizadas. Un diseño sismorresistente adecuado puede mejorar significativamente el comportamiento post-sísmico de una estructura, protegiendo la seguridad de las personas y los bienes (Yang, 2023).

2.2.6 Ductilidad

La ductilidad es una característica clave de los materiales y sistemas estructurales que les permite deformarse sin perder su resistencia, lo que les permite disipar energía antes de fallar. En las conexiones, la ductilidad es esencial para soportar las grandes deformaciones que se producen durante un sismo, evitando colapsos súbitos. En estructuras con irregularidades en elevación, las demandas sísmicas se concentran en ciertas zonas, lo que requiere una mayor ductilidad en las conexiones afectadas. El análisis del comportamiento post-sísmico de estas conexiones permite evaluar si mantienen su capacidad de deformación y resistencia después de un sismo, garantizando la seguridad y funcionalidad estructural (Waśniewski & Kołodziejczyk, 2020).

2.2.7 Irregularidad en elevación

La irregularidad en elevación se refiere a variaciones significativas en la distribución de masa, rigidez o resistencia a lo largo de la altura de una estructura, lo que puede generar concentraciones de esfuerzos y deformaciones en ciertos niveles durante un sismo. En las conexiones, estas demandas desiguales pueden provocar daños localizados más severos, lo que puede comprometer su capacidad para disipar energía y mantener la estabilidad. Es importante investigar el comportamiento post-sísmico de estas conexiones en estructuras con irregularidad en elevación para identificar vulnerabilidades y proponer soluciones de diseño o reforzamiento que mejoren la seguridad y la estabilidad estructural, con el fin de proteger la vida y los bienes ante los efectos de los sismos (Santos et al., 2024).

2.2.8 Normativas sísmicas

Las normativas sísmicas son regulaciones técnicas que establecen criterios de diseño, construcción y evaluación para garantizar la seguridad de las estructuras ante los efectos de los sismos. (Hadar Elmi & Coskun, 2020) Las normas, ya sea, como reglamentos nacionales obligatorios (NEC-2015) o como normas internacionales de evaluación, diagnóstico y rehabilitación (FEMA, ACI, ASCE), comparten el objetivo común que cuando una edificación no puede alcanzar el desempeño sísmico mínimo requerido, y cuya intervención estructural resulta técnica o económicamente inviable se puede

determinar que un edificio no es rehabilitable o debe ser demolido. En estructuras con irregularidad en elevación, las regulaciones son clave para abordar las concentraciones de esfuerzos generadas por la distribución desigual de rigidez y masa, lo que permite mejorar la seguridad y reducir los riesgos (Alvarado Mamani & Aguilar Chuquimia, 2023).

2.2.9 Rigidez

La rigidez es un parámetro clave en la ingeniería estructural que determina la capacidad de un elemento o sistema para resistir deformaciones bajo cargas externas. En el ámbito de la ingeniería sísmica, la rigidez es fundamental para distribuir fuerzas durante un terremoto, lo que impacta directamente en la respuesta dinámica de la estructura. En las conexiones, la rigidez es vital para soportar esfuerzos y mantener el equilibrio estructural. En regiones con alta actividad sísmica, como Ecuador, las estructuras con irregularidades en elevación pueden presentar distribuciones desiguales de rigidez, lo que puede generar concentraciones de esfuerzos en ciertos niveles. Por lo tanto, el análisis del comportamiento post-sísmico de estas conexiones es esencial para detectar posibles fallas y optimizar su diseño, con el objetivo de mejorar su desempeño y garantizar la seguridad estructural (Y. Zhang et al., 2022).

2.2.10 Sismo (terremoto)

Los sismos son fenómenos naturales que ocurren cuando se libera energía acumulada en la corteza terrestre, principalmente debido al movimiento de placas tectónicas. En Ecuador, ubicado en una zona de alta actividad sísmica debido a la interacción entre las placas de Nazca y Sudamericana, los sismos representan un peligro significativo para las estructuras. Las conexiones son puntos críticos que absorben y transmiten esfuerzos durante un terremoto, y en estructuras con irregularidades en elevación, las demandas sísmicas se concentran en áreas específicas, aumentando el riesgo de daño. Por lo tanto, es esencial investigar el comportamiento post-sísmico de estas conexiones para garantizar la seguridad estructural en Ecuador y reducir los efectos devastadores de los terremotos (Raagavi & Sidhardhan, 2021).

2.2.11 Vulnerabilidad Sísmica

La vulnerabilidad sísmica se refiere al grado de susceptibilidad de una estructura a sufrir daños debido a movimientos sísmicos y se considera factores como diseño, materiales, y condiciones locales. Según el autor Cunalata los terremotos fuertes inducen comportamientos no lineales en las estructuras de concreto reforzado, y las filosofías de diseño actuales no incorporan explícitamente la respuesta inelástica de las estructuras.

Esto resalta la necesidad de enfoques como el diseño sísmico basado en desempeño, que permite evaluar los niveles de daño esperado mediante análisis detallados, como el análisis estático no lineal. Este enfoque considera parámetros como desplazamientos, derivas inter-piso y fuerzas de corte basal, para prever el comportamiento estructural bajo diferentes patrones de carga lateral. Por lo tanto, la evaluación de la vulnerabilidad sísmica implica no solo identificar las debilidades estructurales, sino también cuantificar el riesgo de daño, integrando incertidumbres y límites de desempeño (Zameeruddin & Sangle, 2021).

2.2.12 Demanda sísmica

La demanda sísmica se refiere a los requerimientos impuestos por un evento sísmico sobre una estructura, considerando factores como aceleraciones, desplazamientos y fuerzas que esta debe soportar para evitar fallas. Según el documento, la metodología propuesta para la obtención de modelos de exposición incluye la definición de clases de construcciones existentes y la estimación de fracciones de viviendas basándose en información censal y esquemas de mapas. Este enfoque permite evaluar cómo las características estructurales y materiales de las edificaciones afectan su capacidad para responder a las demandas sísmicas. En Ecuador, la demanda sísmica es particularmente alta debido a su ubicación en una región tectónicamente activa, lo que exige metodologías robustas como FEMA P-154 o NEC-15 para evaluar el comportamiento estructural y proponer reforzamientos que aseguren la resiliencia de las edificaciones frente a terremotos (Cunalata & Caiza, 2022).

2.2.13 Factores de participación

Es la proporción entre la masa participante y la masa generalizada en cada modo de vibración. La masa participante se calcula como la suma de todas las masas multiplicadas por su respectivo modo natural de vibración, mientras que la masa generalizada se obtiene sumando todas las masas multiplicadas por el cuadrado de su modo natural de vibración correspondiente (Tzounas et al., 2020).

2.3 Antecedentes referenciales

Para comprender el propósito del presente trabajo de titulación se mencionarán los siguientes artículos científicos:

Según el autor Blasi (2024), esto se aplica directamente al análisis de la respuesta sísmica de edificios irregulares de hormigón armado, que es un problema crítico en la ingeniería civil. El estudio destaca que las irregularidades de la fachada, como las diferencias en la altura y la geometría del piso entre pisos, pueden afectar significativamente la respuesta

sísmica. Estas irregularidades afectan la aceleración y el desplazamiento de la placa y la capacidad de la estructura para resistir el colapso. Además, se compara el comportamiento de las estructuras bajo cargas gravitacionales y sísmicas, mostrando diferencias significativas en sus respuestas. El uso de análisis dinámico no lineal y la generación de funciones de fragilidad proporcionan herramientas valiosas para evaluar la vulnerabilidad sísmica de dichas estructuras, demostrando la necesidad de realizar estudios de diseño sísmico más profundos y precisos. La metodología utilizada por el autor implica comparar estructuras de carga gravitacional y sísmica, utilizando un gráfico de acelerómetro que sea compatible con el espectro de diseño. Los resultados se evalúan considerando derivas entre pisos, las curvas de aceleración, las funciones de fragilidad y los espectros de respuesta histórica. Se ha observado que los desniveles afectan significativamente las aceleraciones y desplazamientos del suelo, así como los espectros de aceleración durante el colapso, lo que se debe principalmente a las variaciones de masa y rigidez con la altura (Blasi et al., 2024).

Para el trabajo es importante destacar la acotación a la investigación de Xiao (2024) que aborda las conexiones en estructuras prefabricadas de hormigón armado, un aspecto crucial para la seguridad y eficiencia de estas construcciones. El artículo destaca que las conexiones son puntos críticos, especialmente en zonas sísmicas, donde fallas pueden llevar al colapso. Se revisan tres tipos principales de conexiones viga-columna: secas, húmedas e híbridas. Las conexiones secas, aunque rápidas de ensamblar, pueden tener limitaciones en su capacidad de carga y disipación de energía. Las conexiones húmedas, con concreto colado en sitio, ofrecen mayor continuidad y mejor adherencia entre los componentes, lo que resulta en un comportamiento sísmico superior en comparación con las conexiones secas. Las conexiones híbridas combinan lo mejor de ambos mundos, pero pueden ser más complejas. La metodología del artículo se basa en una revisión sistemática mixta, combinando análisis cuantitativo y cualitativo. El artículo resalta la importancia de la investigación continua en nuevos materiales y diseños de conexión para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de las construcciones. Este análisis es fundamental para entender cómo las conexiones afectan el comportamiento estructural, especialmente en edificios con irregularidades entre pisos (Xiao & Fomin, 2024).

También tenemos un artículo "Spectral Modal Modeling by FEM of Reinforced Concrete Framed Buildings Irregular in Elevation" que aborda la modelización de estructuras de concreto reforzado irregulares en elevación bajo cargas sísmicas utilizando el Método de

Elementos Finitos (FEM). Se centra en el análisis dinámico, empleando métodos modales y modales espectrales, para evaluar parámetros clave como desplazamientos, derivas inter-piso y rigideces. Este trabajo enfatiza que la irregularidad en elevación puede aumentar significativamente las demandas de ductilidad y las deformaciones en las estructuras, aumentando su vulnerabilidad frente a terremotos. Además, valida los resultados obtenidos con software especializado como ETABS, confirmando la precisión de su metodología. El enfoque adoptado en este estudio es particularmente relevante, ya que comparte el interés en comprender y mitigar los efectos de la irregularidad estructural en la respuesta sísmica. La comparación de los métodos dinámicos presentados, así como la identificación de las implicaciones de las irregularidades geométricas, ofrecen un marco útil para el análisis post-sismo de las estructuras. Los hallazgos sobre la influencia de la rigidez y la configuración en la estabilidad estructural podrían servir como referencia para el diseño de medidas de refuerzo en estructuras irregulares, aportando así un fundamento técnico sólido (Camellia, 2021).

En este estudio se abordan tres configuraciones principales de marcos estructurales irregulares: irregularidades en planta causadas por esquinas reentrantes, irregularidades en elevación debido a discontinuidades geométricas verticales, y marcos combinados que presentan ambas irregularidades. El objetivo principal es determinar cuál de estos tipos de estructuras muestra una respuesta más crítica frente a cargas sísmicas. Para ello, se emplearon modelos de edificios de seis niveles (G+5) con marcos de concreto reforzado diseñados como sistemas de pórticos especiales resistentes a momentos, analizados mediante el software de modelado estructural SAP2000. Este análisis aporta un marco conceptual valioso, ya que profundiza en la influencia de las irregularidades estructurales en la respuesta sísmica, permitiéndote abordar de manera más específica los riesgos asociados a las estructuras irregulares en elevación y combinadas (Datta & Gopal, 2022).

3. CAPITULO 3: METODOLOGÍA

3.1 Modalidad básica de la investigación

La presente investigación se desarrolla bajo una modalidad aplicada con enfoque técnico, orientada a resolver un problema concreto relacionado con la seguridad estructural de edificaciones existentes. En este caso, se analiza el comportamiento de los elementos y conexiones en una estructura de concreto armado con irregularidad en elevación, ubicada en una zona de alta amenaza sísmica como lo es la ciudad de Machala. El propósito es generar soluciones prácticas que contribuyan al fortalecimiento del diseño estructural en edificaciones similares.

El estudio se enmarca dentro del paradigma cuantitativo, ya que se basa en el uso de herramientas analíticas, modelaciones estructurales y simulaciones computacionales que permiten medir con precisión el desempeño estructural de las conexiones. Este enfoque facilita la obtención de datos numéricos en base a las condiciones reales del edificio, permitiendo valorar su capacidad resistente y la distribución de esfuerzos ante cargas sísmicas.

La metodología implica el desarrollo de un modelo estructural digital mediante software especializado, considerando las características geométricas del edificio y las condiciones de carga actuales. A partir de dicho modelo, se procederá a realizar análisis estructurales con distintos tipos de evaluación: análisis lineal (estático y dinámico) y análisis modal espectral. De acuerdo con los resultados obtenidos, se identificarán posibles deficiencias en las uniones estructurales y se propondrán alternativas de refuerzo para mejorar el comportamiento sísmico de la edificación.

3.2 Tipo de investigación

3.2.1 Documental

La presente investigación contempla una fase documental orientada al análisis y recopilación de información técnica y científica proveniente de fuentes confiables, como artículos científicos, documentos técnicos disponibles, información municipal del edificio, y normativas sísmicas vigentes, incluyendo la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-DS (2015). Este soporte teórico servirá como base para la comprensión del comportamiento sísmico de los elementos y conexiones estructurales, especialmente en estructuras con geometrías irregulares. A través del estudio de estas fuentes se establecerán los criterios normativos, metodológicos y analíticos necesarios para llevar a cabo los modelos estructurales y simulaciones posteriores.

3.2.2 De Campo

Paralelamente, se desarrollará una investigación de carácter empírico basada en la observación directa del edificio objeto de estudio. Esta etapa resulta esencial para levantar información estructural in situ mediante visitas técnicas se obtendrán datos como dimensiones de elementos portantes (vigas, columnas, losas), alturas entre niveles, espesores y disposiciones espaciales. Esta información servirá para construir un modelo digital con dimensiones reales del edificio, lo cual es imprescindible para simular de forma adecuada su comportamiento ante solicitaciones sísmicas.

3.2.3 Experimental

El enfoque experimental de esta investigación se centra en evaluar el comportamiento estructural del edificio mediante la aplicación de métodos de simulación y análisis computacional. A través del modelado del edificio en software comercial de análisis estructural, se someterá la estructura a escenarios de carga sísmica definidos por normativas vigentes, con el fin de observar las respuestas dinámicas en la edificación. Este tipo de investigación permite comprobar el desempeño de la edificación bajo condiciones controladas que replican eventos sísmicos, facilitando la identificación de posibles fallas estructurales y zonas críticas de deformación. El uso de herramientas como el análisis modal espectral y el análisis estático lineal, brindará información valiosa para validar la vulnerabilidad y proponer estrategias de refuerzo.

3.3 Objeto de Estudio

El objeto de estudio de esta investigación es el Bloque 1 del Campus Machala de la Universidad Técnica de Machala, el cual corresponde a una edificación de concreto armado con sistema estructural aporticado. Esta estructura ha sido seleccionada por presentar irregularidades en elevación, condición que la hace propensa a concentraciones de esfuerzo y comportamiento sísmico desfavorable, especialmente en las uniones estructurales.

La evaluación del edificio se realizará bajo el marco metodológico de los métodos de evaluación de la capacidad estructural ante solicitaciones sísmicas. A continuación, se detalla el uso funcional de cada nivel de la edificación:

Tabla 3. Uso funcional de cada nivel

Piso	Uso
Planta baja	Oficinas administrativas
Mezanine	Aulas
Planta alta 1	Aulas
Planta alta 2	Aulas
Planta alta 3	Salas de computación
Planta alta 4	Salas de computación
Terraza	Cubierta, caseta de elevador, tanques de agua

Fuente: Elaboración propia

3.4 Descripción de la población y muestra

La población de esta investigación está conformada por los usuarios que concurren en las instalaciones de la infraestructura del bloque 1 del Campus Machala de la Universidad Técnica de Machala, edificio que actualmente alberga actividades académicas y administrativas. Esta edificación representa un entorno físico utilizado por estudiantes, docentes y personal administrativo, lo que implica una constante ocupación y uso funcional que influye directamente en las condiciones de carga y en la demanda estructural.

3.5 Recopilación de información

3.5.1 Revisión de documentos técnicos disponibles del edificio

Se inició el proceso de recopilación de información mediante el análisis del documento técnico proporcionado por la Municipalidad de Machala, el cual contiene un levantamiento visual y diagnóstico estructural del bloque #1. Este informe incluye una descripción general del edificio, distribución funcional por niveles, tipo de sistema estructural, elementos no estructurales, irregularidades en planta y elevación, tipo de suelo, riesgos geológicos asociados y evaluación post-sísmica posterior al evento del 18 de marzo de 2023. Dicha información fue fundamental para entender el estado general del edificio y orientar la planificación de las visitas técnicas.

3.5.2 Validación de información municipal mediante visitas in situ

Con el propósito de contrastar la información contenida en el documento municipal y evaluar las condiciones reales del edificio, se llevaron a cabo múltiples visitas técnicas al bloque #1. Durante estas inspecciones presenciales, se verificó la existencia, disposición y continuidad de los elementos estructurales tales como columnas, vigas, y escaleras. También se observó el estado físico de los elementos resistentes, buscando evidencia de

fisuramientos, deterioros o daños estructurales. Estas visitas fueron clave para constatar que el edificio sigue en operación académica, con adecuaciones funcionales según el nuevo uso.

3.5.3 Levantamiento físico del edificio

Dado que no se dispone de planos estructurales ni arquitectónicos debido a la antigüedad del edificio, se procedió a un levantamiento físico integral. Este proceso incluyó la medición detallada de cada uno de los niveles del bloque, así como la identificación de los ambientes, pasillos, columnas, vigas principales y secundarias, dimensiones de escaleras, vanos de puertas y ventanas. Asimismo, se realizó una caracterización funcional por nivel: planta baja destinada a oficinas administrativas y servicios; niveles superiores empleados como aulas; y el último nivel con salas de computación, caseta de ascensor y losa de cubierta. El levantamiento se documentó con un registro fotográfico propio que evidenció los elementos constructivos y detalles relevantes para el modelado.

3.5.4 Medición con herramientas manuales y electrónicas

Las mediciones del edificio se efectuaron utilizando cinta métrica y distanciómetro láser (laser metro), lo cual permitió registrar longitudes y alturas con un mayor grado de precisión. Se midieron dimensiones de elementos estructurales visibles, como las columnas (secciones rectangulares y circulares), vigas de peralte variable, vigas banda, escaleras de losa maciza en forma de “U” y espacios funcionales. Estas mediciones fueron sistematizadas para construir una representación geométrica coherente con el comportamiento estructural esperado, y facilitar la generación del modelo analítico en el software de simulación estructural.

3.5.5 Determinación y verificación de dimensiones reales

Toda la información recopilada mediante el informe técnico, las visitas in situ y las mediciones directas fue procesada y comparada para establecer las dimensiones reales del edificio. Se verificaron alturas entre niveles, secciones de elementos portantes, y la distribución arquitectónica existente, consolidando así un modelo conceptual fiel a la realidad. Esta verificación de datos garantiza la precisión necesaria en el desarrollo posterior del modelo estructural computacional, base fundamental para el análisis del desempeño sísmico. Asimismo, se incorporaron observaciones sobre posibles irregularidades geométricas verticales y de planta, que condicionarán la respuesta dinámica del edificio frente a solicitaciones sísmicas.

3.6 Métodos teóricos con los materiales utilizados

3.6.1 Modelación

La etapa de modelación representa una fase crucial del presente trabajo, ya que permite construir una réplica virtual del edificio bloque 1 del campus Machala, considerando su geometría real, configuración estructural y condiciones de carga actuales. Este proceso se desarrollará mediante software especializado de análisis estructural, donde se definirán con precisión los elementos principales como columnas, vigas, losas y su respectiva interacción en el sistema aporticado.

Durante la modelación se incorporarán las dimensiones reales obtenidas en sitio, así como las propiedades físicas y mecánicas de los materiales predominantes en la estructura (hormigón armado), y se establecerán las condiciones de apoyo y cargas gravitacionales y sísmicas según lo estipulado en la NEC-2015. La finalidad de este modelo estructural es simular el comportamiento sísmico del edificio para analizar la respuesta de los elementos y conexiones frente a diferentes escenarios de solicitud, especialmente considerando la presencia de irregularidad en elevación.

3.6.2 Validación de datos mediante visitas específicas

Luego del levantamiento general del edificio, se efectuaron visitas técnicas complementarias destinadas exclusivamente a resolver observaciones particulares y confirmar dimensiones dudosas. Estas visitas permitieron obtener mayor precisión en la interpretación de elementos estructurales singulares, como la geometría de las escaleras, los voladizos del bloque, la ubicación de las ménsulas, y la conexión entre los diferentes niveles. Asimismo, se contrastó in situ la continuidad de columnas, la existencia de descansos intermedios, la configuración de la caseta de ascensor, y los espesores de losas. Esta verificación detallada resultó fundamental para garantizar que la información de entrada al modelo estructural represente fielmente las condiciones actuales del edificio.

3.6.3 Elaboración del modelo estructural en software comercial de análisis estructural

Con la información sistematizada, se procedió a construir un modelo tridimensional del edificio empleando un software comercial especializado en análisis estructural. Este modelo representa tanto la geometría como las propiedades físicas de los elementos que conforman el sistema resistente.

3.6.3.1 Elementos estructurales observados en campo

- **Columnas de sección variable por nivel**, desde 50x50 cm en planta baja, pasando por 45x45 cm en planta alta 1, hasta 35x35 cm en niveles superiores. También se incluyeron columnas circulares de 60 cm de diámetro en la planta baja en zonas de soportal.
- **Vigas rectangulares** de sección 50x30 cm dispuestas en todas las plantas según la grilla estructural levantada, incluyendo vigas inclinadas en sectores específicos.
- **Losa de entrepiso** ha sido modelada como una losa alivianada con un espesor constante de 25 cm, comportándose como un diafragma rígido, lo cual permite la transmisión eficiente de los esfuerzos laterales hacia el sistema estructural resistente vertical.
- **Elementos especiales** como la escalera tipo “U”, la caseta del ascensor y descansos intermedios, incorporados para reflejar la continuidad estructural vertical del edificio.

En la fase de modelado, se prestó especial atención a la correcta definición de apoyos, empotramientos, conexiones entre elementos y condiciones de borde, a fin de simular de manera adecuada el comportamiento real de un sistema aporticado.

3.6.3.2 Elementos estructurales observados en campo

Las combinaciones de cargas son utilizadas para el diseño de los elementos estructurales de la edificación, ya que dan como resultado esfuerzos, momentos flectores, cortantes y tensiones por lo que se emplearán dichos datos para diseñar los elementos en su situación más crítica.

Tabla 4. Combinaciones de carga aplicadas en el diseño

Combinaciones de carga	
Combinación 1	1.4D
Combinación 2	1.2D + 1.6L
Combinación 3	0.9D + S _x
Combinación 4	0.9D - S _x
Combinación 5	0.9D + S _y
Combinación 6	0.9D - S _y
Combinación 7	1.2D + L + S _x
Combinación 8	1.2D + L - S _x

Combinaciones de carga	
Combinación 9	$1.2D + L + S_y$
Combinación 10	$1.2D + L - S_y$

Fuente: NEC-SE-CG

3.6.4 Consideración de cargas gravitacionales y sísmicas

Una vez definido el modelo geométrico de la edificación, se procederá a la aplicación de las cargas gravitacionales y sísmicas que actúan sobre la estructura, conforme a los lineamientos establecidos en la normativa ecuatoriana vigente para diseño sismorresistente.

Para las **cargas gravitacionales**, se considerará tanto el peso propio de los elementos estructurales como las cargas permanentes adicionales producto de recubrimientos, acabados, cerramientos y losa, en función de las características constructivas observadas en el edificio. Así mismo, se asignarán las **cargas vivas** según el uso específico de cada nivel, diferenciando entre aulas, oficinas administrativas y zonas de circulación, considerando criterios de distribución uniforme y cargas concentradas cuando sea pertinente.

En cuanto a las **cargas sísmicas**, debido a la localización del edificio en una zona de alta amenaza sísmica y la clasificación del tipo de suelo del emplazamiento, se incorporarán acciones sísmicas mediante un análisis dinámico basado en el espectro de diseño inelástico definido por la normativa. Para ello, se generará un espectro de respuesta personalizado que permita evaluar el comportamiento estructural ante solicitaciones sísmicas, considerando aspectos como desplazamientos globales, derivas de entrepiso, distribución de esfuerzos internos y posibles efectos de torsión.

Esta fase será clave para la posterior evaluación del desempeño estructural, ya que permitirá simular con precisión las condiciones reales de carga a las que estaría sometida la edificación tras el cambio de uso propuesto.

3.7 Análisis Estructural

3.7.1 Análisis modal espectral

El análisis modal espectral es una herramienta dinámica que permite calcular la respuesta de una estructura considerando su rigidez, masa y modos de vibración. Esta técnica se aplica particularmente en estructuras con irregularidades como las del bloque #1, donde

la forma en planta genera un desplazamiento entre el centro de rigidez y el centro de masa, provocando torsión estructural.

En esta fase se calcularán los modos naturales de vibración, sus frecuencias, formas modales y la participación modal de masa. Posteriormente, mediante el uso del espectro de diseño sísmico definido para suelo tipo E (con $V_s < 180$ m/s), se determinarán los desplazamientos máximos por piso, la deriva entre niveles y la torsión inducida.

Este procedimiento permitirá identificar los modos críticos de vibración, evaluar la posible amplificación sísmica por irregularidades geométricas y analizar si la estructura responde adecuadamente a las exigencias dinámicas del entorno.

3.7.2 Análisis lineal

El análisis lineal se efectuará desde dos enfoques: **estático** (para cargas constantes) y **dinámico** (para cargas sísmicas derivadas del espectro), garantizando una visión completa de la estructura bajo distintas condiciones de carga.

a) Análisis lineal estático

Este análisis considera la acción de cargas muertas (peso propio de vigas, columnas, losas, mampostería, cielos rasos) y cargas vivas distribuidas según el uso del inmueble (aulas, oficinas, pasillos). Se tomarán como referencia los valores definidos por la NEC y los datos obtenidos en campo.

Con estas cargas se evaluarán las fuerzas internas (momentos, cortantes, axiales), deformaciones y reacciones. Se verificará si la estructura cumple con los límites admisibles en servicio, identificando elementos críticos por sobrefuerzo o deformación excesiva.

b) Análisis lineal dinámico

Mediante este análisis se simula la acción de un sismo utilizando el espectro de diseño definido por la NEC para zona sísmica V y suelo tipo E (Machala), aplicando los factores que se especificarán en el capítulo 4.

Este análisis considera la inercia de masas estructurales frente al movimiento del terreno, permitiendo obtener una estimación más realista de los desplazamientos laterales, derivas de entrepiso y la distribución de cargas sísmicas a través de los niveles. El objetivo es conocer si el edificio supera los umbrales de seguridad establecidos para estructuras de uso educativo.

3.8 Metodología para la evaluación de resultados

3.8.1 Verificación de normas y requisitos de diseño

Se compararán los esfuerzos, desplazamientos y derivas obtenidos en el análisis estructural con los límites admisibles establecidos por la Norma Ecuatoriana de la Construcción – NEC-SE-DS. Se verificará que la estructura cumpla con los requisitos mínimos de resistencia, estabilidad y servicio, considerando su actual configuración funcional como edificio educativo.

También se evaluará el cumplimiento de la edificación en cuanto a los límites de deriva de entrepiso, torsión excesiva y participación modal mínima, con especial énfasis en los pisos superiores donde existen columnas de menor sección y mayor esbeltez.

3.8.2 Evaluación del comportamiento global de la estructura

Se analizará la distribución de fuerzas internas y desplazamientos por nivel para valorar el desempeño general del edificio ante cargas estáticas y sísmicas. Se tomará en cuenta la respuesta dinámica de la estructura, la deformación acumulada, y el comportamiento conjunto de los elementos que componen el sistema aporticado.

Este análisis permitirá identificar si existen irregularidades estructurales significativas, como acumulación de esfuerzos en zonas puntuales, falta de rigidez en ciertos niveles o desequilibrio en la transferencia de cargas verticales y laterales.

3.8.3 Identificación de zonas críticas

Con base en los resultados obtenidos, se localizarán los elementos más solicitados del sistema estructural, especialmente en zonas de conexión, cambios de rigidez y extremos de vigas. Se dará atención especial a:

- Columnas con sobreesfuerzo o cercanas a la falla.
- Vigas sometidas a grandes momentos flectores o cortantes.
- Niveles donde se superan límites de deformación o deriva.

Estas zonas serán consideradas prioritarias en las recomendaciones estructurales y en eventuales refuerzos para mejorar la capacidad sísmica del edificio.

3.8.4 Evaluación del comportamiento global de la estructura

Se analizará la respuesta de las uniones entre vigas y columnas, ya que estas conforman el núcleo resistente de un sistema aporticado. Se verificará si dichas conexiones presentan

un comportamiento compatible con el sistema estructural actual y si absorben adecuadamente los esfuerzos inducidos por el sismo.

En caso de evidenciar debilidades, como concentración de esfuerzos o desplazamientos excesivos, se sugerirán medidas de refuerzo para asegurar la integridad de las juntas estructurales.

3.8.5 Diagnóstico del estado post-sísmico del edificio

La información obtenida del informe técnico, sumada al levantamiento y al análisis estructural, permitirá establecer un diagnóstico del estado actual del edificio luego del sismo del 18 de marzo de 2023. Se evaluará si existen daños visibles acumulados, cambios en el comportamiento estructural.

Este diagnóstico aportará una base técnica para emitir juicios sobre la seguridad estructural del inmueble en su estado actual.

3.8.6 Determinación de conexiones estructurales

Según la Norma Técnica Complementaria para el diseño sísmico (2021), una estructura con irregularidad en elevación debe evaluarse mediante una evaluación basada en desempeño que verifique que las distorsiones de entrepiso no excedan los límites de distorsión angular de entrepiso, ajustados por un factor de reducción R' , utilizado para ajustar los límites de distorsión en estructuras irregulares, que varía según el nivel de sobrerresistencia permitido (Gobierno de la ciudad de México, 2021).

Cuando los desplazamientos obtenidos por análisis dinámico modal espectral superan estos límites, se considera necesaria la intervención mediante conexiones o dispositivos disipadores. En estudios de comportamiento no lineal en marcos de concreto reforzado se observa que, cuando las distorsiones exceden la capacidad dúctil prevista los elementos estructurales entran en zonas plásticas extensas y pierden capacidad de absorción, lo que activa la necesidad de conexión estructural adicional (González, 2020).

Por su parte, según la Guía ecuatoriana NEC-SE-RE, establece los criterios fundamentales para determinar la necesidad de intervención estructural en edificaciones de hormigón armado in situ tras la ocurrencia de un evento sísmico. Esta normativa se constituye en un instrumento técnico indispensable para valorar la aptitud de una estructura existente y justificar, de forma objetiva, la incorporación de nuevas conexiones estructurales como parte de las medidas de rehabilitación sísmica. La guía clasifica el

daño estructural en cinco niveles, desde ND-0 (sin daño) hasta ND-4 (colapso parcial o total). Las intervenciones estructurales, incluyendo el refuerzo de conexiones o la incorporación de nuevas uniones entre elementos resistentes, se recomiendan principalmente a partir de los niveles ND-2 (daño moderado) y ND-3 (daño severo) (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2016).

En caso de existir daños moderados o severos en la edificación, se requiere un estudio técnico detallado que incluya inspección visual, verificación de la capacidad portante residual, y análisis estructural con modelación precisa del comportamiento post-sismo. Como criterio cuantitativo, la guía indica que si las derivas residuales en entrepiso superan el 0.5 %, la edificación debe ser considerada no reocupable, por lo cual se justifica la implementación de medidas estructurales correctivas, entre las que destacan las conexiones adicionales en zonas críticas (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2016).

Para estructuras con irregularidad en elevación, como es el caso del objeto de estudio de esta tesis, la guía reconoce que los cambios abruptos de rigidez, masa o resistencia entre niveles producen concentraciones de esfuerzos y distorsiones diferenciales que incrementan la vulnerabilidad sísmica. En estos casos, se recomienda realizar análisis dinámicos no lineales y verificar si las derivas interpiso superan el 1.5 %. Pudiendo concluir que existe una interrupción en el recorrido de cargas y una posible activación de mecanismos de falla no previstos, lo que conlleva la necesidad de restaurar la continuidad estructural a través de conexiones adicionales (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2016).

Adicionalmente, la guía exige que cualquier propuesta de rehabilitación estructural, incluyendo la adición de nuevas conexiones, esté respaldada por una memoria técnica que justifique el uso de materiales compatibles, el correcto anclaje al concreto existente y la continuidad en la transmisión de esfuerzos (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2016).

4. CAPITULO 4: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Para realizar la simulación del edificio en base a planos estructurales y mediciones directas en el software de análisis estructural, considerando dimensiones reales y las características observadas de cada elemento.

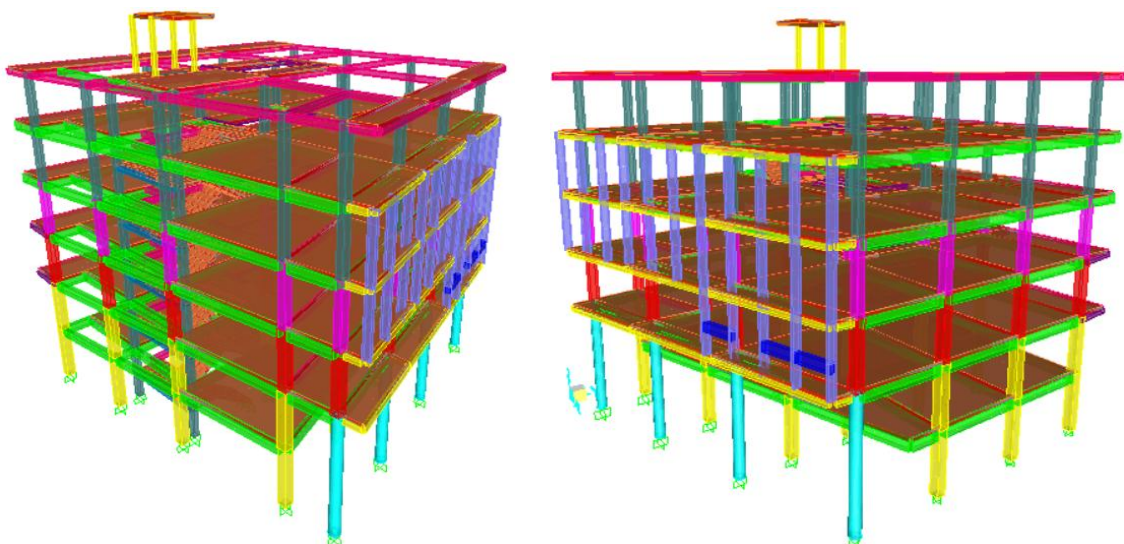
Como parte esencial del proceso, se aplicaron factores de agrietamiento en los elementos de concreto armado, con el objetivo de reflejar de forma más realista la rigidez reducida de los componentes debido a la presencia de fisuras. Esta consideración permitió obtener resultados más coherentes con el comportamiento esperado de la estructura ante cargas gravitacionales y sísmicas.

De esta manera, los resultados del análisis además de aproximarse al desempeño real del edificio, también sirven como base para evaluar su seguridad estructural bajo los criterios establecidos por la normativa vigente.

4.1 Modelación

La modelación estructural implica la construcción digital de la edificación, representando todos sus componentes estructurales y no estructurales de manera precisa. Este proceso contempla la geometría, el tipo de materiales empleados, sus propiedades mecánicas, y los detalles constructivos observados. El objetivo es reflejar fielmente el comportamiento real del edificio, asegurando que el modelo cumpla con los requerimientos necesarios para llevar a cabo un análisis estructural riguroso y confiable.

Ilustración 4. Zona de estudio



Fuente: Elaboración propia

4.2 Especificaciones Técnicas de la edificación

Se consideraron las siguientes especificaciones técnicas generales para la construcción del **Bloque 1**, ubicado en el campus Machala de la Universidad Técnica de Machala:

- La edificación presenta un sistema estructural aporticado resistente a momentos, clasificado como **SMF** (Special Moment Frame) según la tipología estructural descrita en la guía FEMA P-154, utilizada como referencia para la evaluación sísmica preliminar.
- Se adoptaron los lineamientos del **Código Ecuatoriano de la Construcción** vigente para el desarrollo del análisis estructural.
- Para efectos de modelación, se asumió una **resistencia del hormigón** de $f'_c=240\text{kg/cm}^2$ y un **límite de fluencia del acero de refuerzo** de $f_y=4200\text{kg/cm}^2$, de acuerdo con las características estimadas de la construcción existente.

4.2.1 Elementos estructurales

- **Vigas.** - El edificio de estudio cuenta con 292 vigas entre vigas principales, vigas secundarias, vigas banda, vigas inclinadas y vigas peraltadas para la simulación del edificio en el software de análisis estructural.

Tabla 5. Vigas

VIGAS				
GRILLA	NIVEL	DEFINICIÓN	SECCION (cm)	
1	PLANTA BAJA	EJE: A23-L23, L23-O23, O23-L23, B22-L22, L22-O22, O22-L22, C13-L13, L13-O13, O13-L13, A23-B22, B22-C13, C13- E6, L23-L22, L22-L13, L13-L9, O23-O22, O22-O13, O13-O11, P23-P22, P22-P13, P13-P12, D23-D22, D22-D13, E6-L9, L9-O11, O11-P12	50X30	RECTANGULAR
1	MEZANINE	EJE: A23-L23, L23-O23, O23-L23, B22-L22, L22-O22, O22-L22, C13-L13, L13-O13, O13-L13, E6-L9, F2-L4, L4-O7, O7-P10, A23-B22, B22-C13, C13- E6, E6-F2, L23-L22, L22-L13, L13-L9, L9-L4, O23-O22, O22-O13, O13-O7, P23-P22, P22-P13, P13-P10,	50X30	RECTANGULAR
		A23-A24, L23-L24, O23-O24, P23-P24,	40x30 a 25x30	INCLINADA
1	PLANTA ALTA 1	EJE: A23-L23, L23-O23, O23-L23, B22-L22, L22-O22, O22-L22, C13-L13, L13-O13, O13-L13, E6-L9, F2-L4, L4-O7, O7-P10, A23-B22, B22-C13, C13- E6, E6-F2, L23-L22, L22-L13, L13-L9, L9-L4, O23-O22, O22-O13, O13-O7, P23-P22, P22-P13, P13-P10,	50X30	RECTANGULAR
1		A23-A24, L23-L24, O23-O24, P23-P24,	40x30 a 25x30	INCLINADA

VIGAS				
GRILLA	NIVEL	DEFINICIÓN	SECCION (cm)	
1	PLANTA ALTA 2	EJE: A23-L23, L23-O23, O23-L23, B22-L22, L22-O22, O22-L22, C13-L13, L13-O13, O13-L13, E6-L9, F2-L4, L4-O7, O7-P10, A23-B22, B22-C13, C13-E6, E6-F2, L23-L22, L22-L13, L13-L9, L9-L4, O23-O22, O22-O13, O13-O7, P23-P22, P22-P13, P13-P10,	50X30	RECTANGULAR
1		A23-A24, L23-L24, O23-O24, P23-P24,	50X30	RECTANGULAR
1	PLANTA ALTA 3	EJE: A23-L23, L23-O23, O23-L23, B22-L22, L22-O22, O22-L22, C13-L13, L13-O13, O13-L13, E6-L9, F2-L4, L4-O7, O7-P10, A23-B22, B22-C13, C13-E6, E6-F2, L23-L22, L22-L13, L13-L9, L9-L4, O23-O22, O22-O13, O13-O7, P23-P22, P22-P13, P13-P10,	50X30	RECTANGULAR
1		A23-A24, L23-L24, O23-O24, P23-P24,	50X30	RECTANGULAR
1	PLANTA ALTA 4	EJE: A23-L23, L23-O23, O23-L23, B22-L22, L22-O22, O22-L22, C13-L13, L13-O13, O13-L13, E6-L9, F2-L4, L4-O7, O7-P10, A23-B22, B22-C13, C13-E6, E6-F2, L23-L22, L22-L13, L13-L9, L9-L4, O23-O22, O22-O13, O13-O7, P23-P22, P22-P13, P13-P10,	50X30	RECTANGULAR
		EJE: A23-A24, L23-L24, O23-O24, P23-P24,	50X30	RECTANGULAR
1	DESCANSO DE LA ESCALERA	EJE: D22-D14	25X25	RECTANGULAR

Fuente: Elaboración propia

- **Columnas.** - El bloque 1 cuenta con 131 columnas, específicamente en la parte frontal del edificio hay 4 columnas circulares o portantes con un diámetro de 60 cm, en la planta baja y mezanine tiene 29 columnas de 50x50 cm, en la primera planta alta tiene 18 columnas de 45 x45 cm, en la segunda planta alta tiene 18 columnas de 40x40 cm, en la tercera y cuarta planta alta tienen 36 columnas de 35x35 cm, en la caseta tiene 4 columnas de 20x20 cm y los descansos de la escalera cuenta con 22 columnas de 35x35 cm.

Tabla 6. Columnas

COLUMNAS				
GRILLA	NIVEL	DEFINICIÓN	SECCION (cm)	
1	PLANTA BAJA	EJE: A23 , B22, C13, E6, L23, L22, L13, L9, O23, O22 O13, P23, P22, P13	50X50	CUADRADA
1	MEZANINE	EJE: A23 , B22, C13, E6, L23, L22, L13, L9, O23, O22 O13, P23, P22, P13	50X50	CUADRADA
		F2,L4,O7,P10	60	CIRCULAR
1	PLANTA ALTA 1	EJE: A23 , B22, C13, E6, L23, L22, L13, L9, O23, O22 O13, P23, P22, P13	45X45	CUADRADA
1	PLANTA ALTA 2	EJE: A23 , B22, C13, E6, L23, L22, L13, L9, O23, O22 O13, P23, P22, P13	40X40	CUADRADA
1	PLANTA ALTA 3	EJE: A23 , B22, C13, E6, L23, L22, L13, L9, O23, O22 O13, P23, P22, P13	35X35	CUADRADA
1	PLANTA ALTA 4	EJE: A23 , B22, C13, E6, L23, L22, L13, L9, O23, O22 O13, P23, P22, P13	35X35	CUADRADA

COLUMNAS				
GRILLA	NIVEL	DEFINICIÓN	SECCION (cm)	
1	CASETA Y ASCENSOR	H19, H22, J19, J22	20X20	CUADRADA
1	DESCANSO DE LA ESCALERA	D14, D22	35X35	CUADRADA

Fuente: Elaboración propia

- Losa.** - En el presente estudio, se utilizó una losa alivianada de 25 cm de espesor total, conformada por nervaduras de hormigón armado y bloques de aligeramiento (poliestireno expandido), cubierta por una carpeta de compresión superior de 5 cm de espesor. Dado que este tipo de losas no presenta un espesor constante ni homogéneo en toda su sección transversal, es necesario determinar una altura equivalente que permita representar su comportamiento estructural de forma adecuada en el software de análisis estructural. Para este fin, se calculó el centro de gravedad y el momento de inercia total de la sección tipo “T” repetitiva, compuesta por los nervios de hormigón y la loseta superior. A partir de estos valores, se aplicó la siguiente fórmula para obtener la altura equivalente de una losa maciza con la misma rigidez a flexión:

$$h_{eq} = (12 * I/b)^{1/3} \quad (1)$$

Donde:

I: momento de inercia total de la sección

b: ancho de repetición

h_{eq} : altura equivalente

Como resultado, se obtuvo una altura equivalente de 18 cm, la cual fue utilizada tanto para el comportamiento de membrana (membrane) como para flexión (bending) dentro del modelo computacional. Esta simplificación permite mantener la precisión del análisis sin la necesidad de modelar explícitamente cada nervadura.

Datos geométricos iniciales

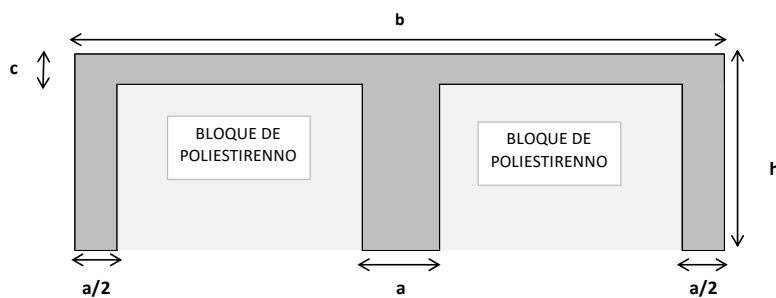
La losa alivianada analizada posee una altura total de 25 cm, compuesta por los siguientes elementos:

- Espesor total de la losa: $h = 0.25 \text{ m}$
- Espesor de la carpeta de compresión: $c = 0.05 \text{ m}$
- Ancho de nervio: $a = 0.10 \text{ m}$
- Ancho del módulo (distancia entre ejes de nervios): $b = 0.50 \text{ m}$

Modelo de sección compuesta

La sección transversal de la losa fue idealizada como una combinación de una carpeta de compresión continua y tres nervios de concreto armado dispuestos bajo los bloques de poliestireno, tal como se muestra en el esquema de la ilustración 5.

Ilustración 5. Bloques de poliestireno



Fuente: Elaboración propia

Se asumió un ancho efectivo de 1 metro para el análisis por unidad lineal, y se calcularon las propiedades geométricas necesarias:

- Centroide de la sección compuesta, ubicado a una altura de $Y = 0.17 \text{ m}$.
- Momento de inercia total de la sección (suma de tres componentes individuales):

$$I_{total} = I_{x1} + I_{x2} + I_{x3} = 0.00016 + 0.00016 + 0.00008 = 0.00049 \text{ m}^4 \quad (2)$$

Cálculo de la altura equivalente

Para determinar la altura equivalente h_{eq} , se igualó el momento de inercia de una losa maciza de ancho 1 metro con el momento de inercia de la sección compuesta de la losa nervada, aplicando la siguiente expresión:

$$h_{eq} = (12 * I/b)^{1/3} = (12 * 0.00049/1)^{1/3} = 0.18 \text{ m} \quad (1)$$

Por lo tanto, la altura equivalente de la losa alivianada de 25 cm es de 18 cm, tanto para el análisis por esfuerzos de membrana como para el análisis por flexión. Este valor fue adoptado para representar la losa en el modelo estructural global del edificio.

A continuación, se presentan las capturas del cálculo realizado en Excel, donde se aprecia la sección de losa nervada, los datos geométricos utilizados y el valor final determinado:

Tabla 7. Datos de losa alivianada

DATOS	
Losa alivianada	
h(m)	0,25
c(m)	0,05
a(m)	0,1
b(m)	0,5

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 6. Sección equivalente de losa alivianada

Determinación de altura Equivalente			
Sección de Losa Nervada			
Carpeta de Compresión		Centro de Gravedad	
h	0,05	Y	0,17
b	1		
Viguetas		INERCIA	
h	0,2	Ix1	0,00016
b	0,1	Ix2	0,00016
		Ix3	0,00008
		Ix Total m4	0,00049
		Altura Equivalente	
		h(m)	0,18
Altura Equivalente de nuestra Losa de 25cm		18	cm
LOSA ALIVIANADA DE 25CM			
Membrane		18cm	
Bending		18cm	

Fuente: Elaboración propia

- **Cimentación.** - La edificación se apoya sobre una **losa de cimentación**, una solución estructural que permite distribuir las cargas gravitacionales de la superestructura de manera uniforme sobre el terreno, especialmente útil cuando se cuenta con suelos de capacidad portante moderada o cuando existen múltiples columnas cercanas entre sí.

Para evaluar el desempeño de la cimentación, se realizó una extracción de las reacciones verticales (F3) en cada uno de los nodos (joints) correspondientes a las columnas, bajo la combinación de cargas **CM + CV** (carga muerta + carga viva), obtenidas directamente del modelo estructural. Los valores se expresaron en toneladas-fuerza (Tonf).

Posteriormente, se procedió a calcular el peso total transmitido por la estructura a través de las columnas, que ascendió a:

$$F3 = 2404,29 \text{ Tonf}$$

El siguiente paso fue determinar el área de la losa de cimentación, la cual se obtuvo mediante medición precisa en el entorno de dibujo asistido por computadora, arrojando un valor de:

$$A = 395 \text{ m}^2$$

Con estos datos, se calculó el esfuerzo medio transmitido al suelo (presión de contacto), mediante la siguiente expresión:

$$q = P/A = 2404.29 \text{ Tonf} / 395 \text{ m}^2 = 6.09 \text{ Tonf} / \text{m}^2 \quad (3)$$

Este valor representa la presión uniforme que, idealmente, sería transmitida al terreno si se considera un comportamiento elástico lineal del suelo y una distribución uniforme de esfuerzos, los resultados obtenidos evidencian que los esfuerzos transmitidos al suelo no superan las 7 T/m², lo cual se encuentra dentro de un rango admisible para cimentaciones de este tipo, en función de las características geotécnicas preliminares del sitio.

Tabla 8. Reacciones en puntos

TABLE: Joint Reactions		
Joint	OutputCase	F3 (Tonf)
19	CM + CV	46,79
80	CM + CV	44,73
93	CM + CV	68,00
97	CM + CV	84,40
123	CM + CV	1,20
124	CM + CV	2,55
157	CM + CV	17,42
373	CM + CV	102,16
374	CM + CV	106,85
376	CM + CV	110,18
377	CM + CV	179,06
378	CM + CV	191,54
379	CM + CV	204,82
381	CM + CV	179,43
382	CM + CV	94,38
383	CM + CV	182,98
384	CM + CV	53,47
385	CM + CV	200,95
386	CM + CV	75,35
392	CM + CV	110,56
393	CM + CV	82,16
394	CM + CV	152,93
398	CM + CV	103,71
401	CM + CV	1,98
402	CM + CV	2,88
403	CM + CV	3,82
Total		2404,29 Ton
Área		395,00 m ²
Esfuerzo en el suelo		6,09 Ton/m²

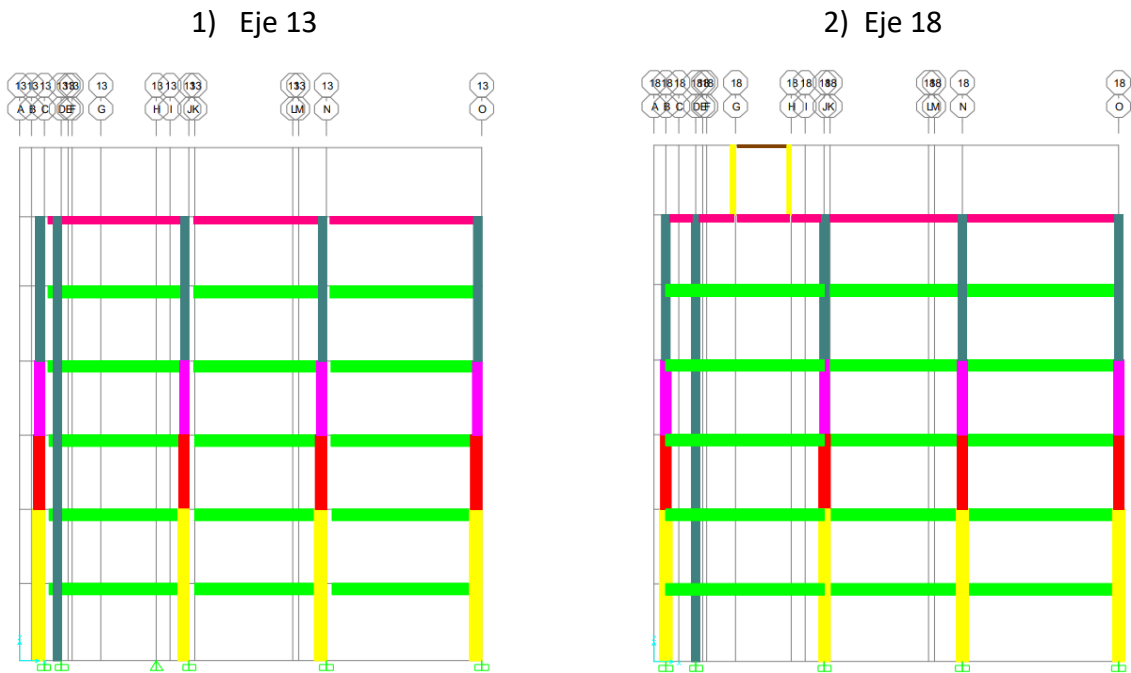
Fuente: Software de análisis estructural

4.2.2 Planta y elevación

La configuración del edificio del bloque 1 en elevación abarca desde la Planta Baja hasta la Caseta, contando con seis niveles funcionales distribuidos de la siguiente manera: planta baja destinada a oficinas administrativas, mezanine y los siguientes tres niveles altos para aulas académicas, y una planta alta 4 donde se ubican salas de computación. Finalmente, en la cubierta se encuentra el ascensor y los tanques de agua.

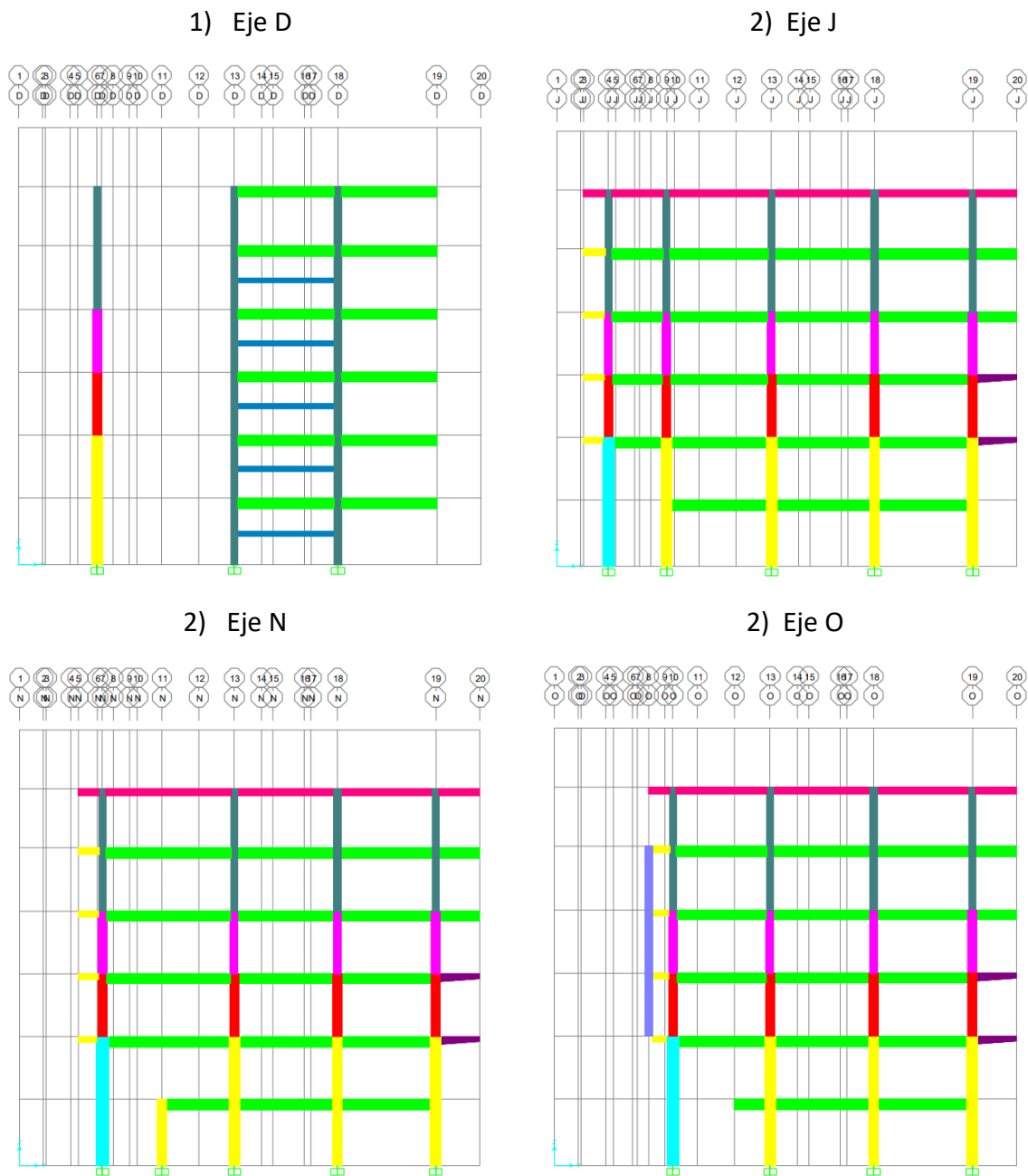
Desde la Planta de Cimentación hasta la Planta Baja, la altura considerada es de 3,35 m. El edificio se clasifica como una estructura aporricada de concreto armado. La altura típica entre pisos de las 4 plantas altas es de 3,2 m aproximadamente. Y la planta alta 6 y 7 tiene una altura de entre piso de 3 m.

Ilustración 7. Configuración estructural en elevación en dirección X



Fuente: Software de análisis estructural

Ilustración 8. Configuración estructural en elevación en dirección Y



Fuente: Software de análisis estructural

4.2.3 Distribución de cargas

En la presente investigación se consideraron las cargas gravitacionales actuantes sobre los distintos elementos estructurales de la edificación, diferenciando entre cargas muertas (peso propio y elementos permanentes) y cargas vivas (y uso). Las cargas fueron distribuidas según la funcionalidad de cada nivel, conforme a lo establecido por las normativas vigentes y los criterios de diseño arquitectónico del proyecto. A continuación, se presenta el resumen de las cargas utilizadas:

Tabla 9. Cargas muertas y vivas de losa de la caseta

SC	kgf/m2
Escalera	120
Piso 1	280
Piso 2	280
Piso 3	280
Piso 4	280
Piso 5	280
Azotea	180
Losa de caseta	80

Fuente: Elaboración propia

LIVE	kgf/m2
Escalera	480
Piso 1	250
Piso 2	250
Piso 3	250
Piso 4	250
Piso 5	250
Azotea	100
Losa de caseta	100

Tabla 10. Carga de tanque de agua

SC	kgf
Tanque 1000 lt	1020
Tanque 1000 lt	1020
Tanque 1000 lt	1020
Total	3060
Carga Puntual 1	1530
Carga Puntual 2	1530

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Carga del ascensor

Puntual de ascensor	
SC	kgf
Puntual	600
LIVE	kgf
Puntual	550

Puntual de ascensor	
SC	kgf
Puntual	600
LIVE	kgf
Puntual	550

Fuente: Elaboración propia

4.2.3.1. Distribución de cargas puntuales de cubierta

Para representar adecuadamente las cargas gravitacionales sobre la cubierta del edificio, se procedió a distribuir las cargas superficiales como concentradas en los nodos de las columnas. Este procedimiento permite una representación más precisa del comportamiento del edificio en el software de análisis estructural, en el cual las cargas distribuidas sobre los elementos de losa alivianada son convertidas en cargas puntuales aplicadas directamente en los puntos de apoyo verticales.

El proceso consistió en determinar el área tributaria correspondiente a cada columna en cubierta, es decir, la superficie de losa que aporta carga directamente a cada nodo estructural. Para ello, se utilizaron herramientas y esquemas de referencia para medir cada área y asignarla a su nodo correspondiente.

Una vez establecida el área tributaria por nodo, se procedió a calcular las cargas puntuales:

- Para la **carga muerta (SC)**, se utilizó un valor de 25 kgf/m², considerando únicamente elementos livianos de cubierta.
- Para la **carga viva (LIVE)**, se aplicó un valor de 50 kgf/m², conforme a la normativa vigente para techos accesibles.

La fórmula utilizada fue:

$$Carga\ puntual\ (kgf) = Área\ tributaria\ (m^2) * Carga\ superficial\ (kgf/m^2) \quad (4)$$

A continuación, se detallan las cargas puntuales obtenidas para cada nodo:

Tabla 12. Cargas muertas de cubierta

Puntuales de cubierta	
SC	kgf
1	64
2	414
3	394
4	209
5	64
6	294
7	414
8	614
9	429
10	184

Puntuales de cubierta	
SC	kgf
11	184
12	405
13	685
14	463
15	284
16	508
17	100
18	321
19	465
20	244

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Cargas vivas de cubierta

Puntuales de cubierta	
LIVE	kgf
1	129
2	828
3	788
4	419
5	129
6	588
7	828
8	1227
9	858
10	367
11	367
12	810
13	1370
14	927
15	567
16	1016
17	200
18	643
19	930
20	487

Fuente: Elaboración propia

4.3 Sismo Dinámico espectral

Para evaluar la respuesta sísmica de la edificación, se llevó a cabo un análisis dinámico modal espectral, siguiendo los lineamientos de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-2015). Este método permite determinar las aceleraciones espectrales que actúan

sobre la estructura, considerando la masa, rigidez, geometría, tipo de suelo y condiciones sísmicas de la zona.

La edificación se localiza en la ciudad de Machala, clasificada dentro de la Zona Sísmica 2 ($Z = 0.4$). El terreno corresponde a un suelo tipo E, caracterizado por su baja rigidez y alto potencial de amplificación sísmica.

Según la NEC-2015, para este tipo de suelo se adoptan los siguientes coeficientes de perfil de suelo:

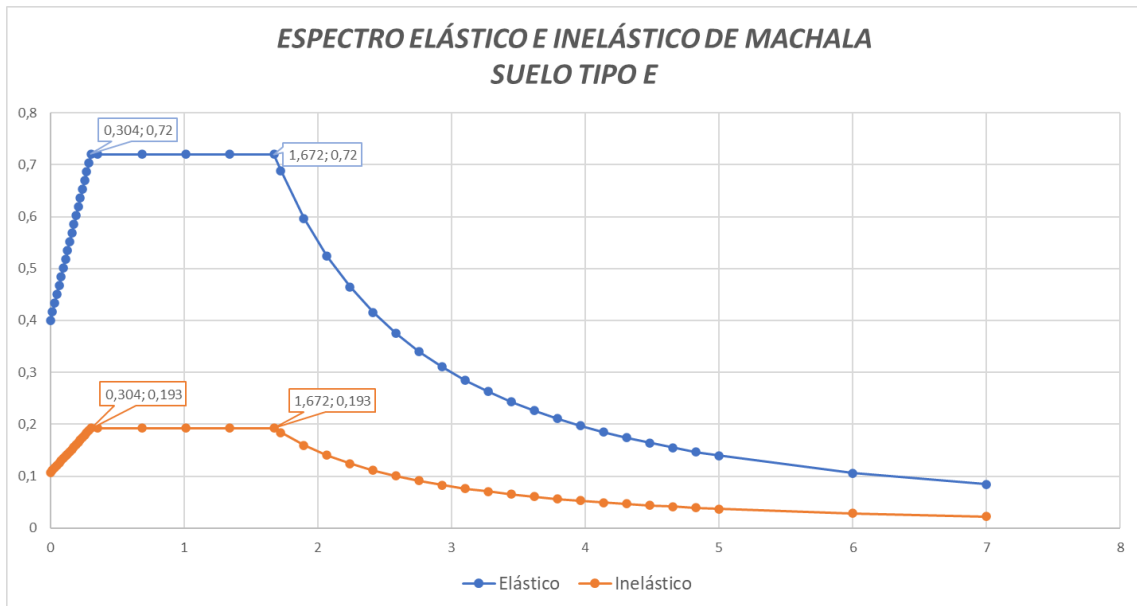
- $F_a = 1.00$
- $F_d = 1.60$
- $F_s = 1.90$

Parámetros estructurales considerados:

La estructura corresponde a un sistema de pórticos especiales de hormigón armado sin muros estructurales ni diagonales rigidizadoras, con una altura total de 19.15 m. Se adoptaron los siguientes valores para la construcción del espectro elástico:

- Factor de importancia (I) = 1.30 (uso educativo)
- Coeficiente de configuración en planta (ϕ_P) = 0.90
- Coeficiente de configuración en elevación (ϕ_E) = 0.90
- Coeficiente de reducción sísmica estructural (R) = 6.00
- Relación de amplificación espectral (η) = 1.80

Ilustración 9. Espectro elástico e inelástico-suelo tipo E



Fuente: Elaboración propia

Uno de los aspectos más relevantes a considerar en el análisis sísmico de una edificación es la determinación de la carga sísmica reactiva, la cual se obtiene considerando el 100 % de la carga muerta y el 25 % de la carga viva, tal como establece la NEC-2015. Esta carga se calcula mediante la siguiente expresión:

$$W_R = D + 0.25L \quad (5)$$

Donde:

- W_R : Carga sísmica reactiva
- D : Carga muerta
- L : Carga viva

Para el análisis modal espectral, se consideraron 18 modos de vibración, lo cual es coherente con la recomendación de tomar al menos tres modos por cada nivel de piso. En este caso, la edificación cuenta con 6 niveles, por lo que se tomó 18 modos para capturar adecuadamente la respuesta dinámica de la estructura.

4.4 Sísmico estático lineal

El análisis sísmico estático lineal es una metodología ampliamente utilizada en la ingeniería estructural para evaluar la respuesta de una edificación frente a solicitaciones sísmicas. Esta técnica toma como base los resultados obtenidos del análisis modal y los

utiliza como entrada para estimar la distribución de fuerzas laterales que se generan durante un sismo. Este método parte del supuesto de que la relación entre la fuerza sísmica y la aceleración es lineal, sin considerar efectos inelásticos o deformaciones plásticas.

Para calcular el factor de modificación sísmica **k**, se hace uso directo de los periodos fundamentales de vibración determinados para la estructura. La Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-DS) proporciona los rangos y valores de este coeficiente en función del periodo T, según se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 14. Coeficiente k

Valores de T(s)	k
≤ 0.5	1
$0.5 < T \leq 2.5$	$0.75 + 0.50T$
> 2.5	2

Fuente: NEC-SE-DS

Una vez establecido este coeficiente, se procede a calcular el **cortante sísmico basal (V)** mediante la siguiente fórmula:

$$V = C_S * W_R = (I * S_a / R * \phi_p * \phi_E) * W_R \quad (6)$$

Donde:

- **V**: Cortante sísmico basal (fuerza sísmica total que actúa en la base de la estructura).
- **C_S**: Coeficiente sísmico.
- **I**: Factor de importancia de la edificación.
- **S_a**: Aceleración espectral obtenida del espectro de diseño.
- **R**: Factor de reducción por comportamiento inelástico de la estructura (resistencia sísmica).
- **φ_P**: Coeficiente por configuración en planta.
- **φ_E**: Coeficiente por configuración en elevación.
- **W_R**: Carga sísmica reactiva (peso tributario sísmico de la estructura).

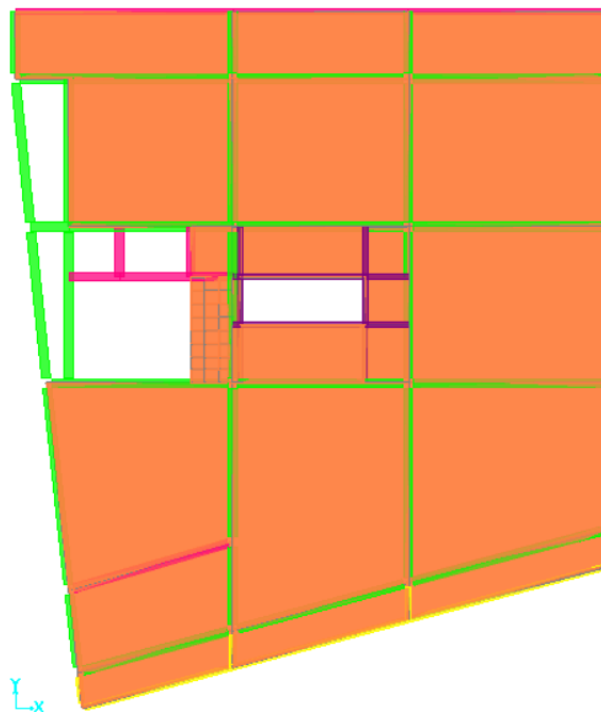
Finalmente, es necesario que la edificación cumpla con los valores mínimos establecidos por la NEC-SE-DS. Esta normativa indica que, para edificaciones consideradas regulares,

la relación entre el cortante basal obtenido mediante análisis dinámico y el calculado por análisis estático no debe ser inferior al 80%. En cambio, para edificaciones con irregularidades, este valor mínimo se eleva al 85%. Si la estructura evaluada no alcanza dichos porcentajes, se deberá aplicar el ajuste correspondiente al cortante basal conforme a lo estipulado en la norma.

4.5 Análisis dinámico espectral y sísmico estático

Para el desarrollo del análisis modal espectral, se consideraron **18 modos de vibración**, en concordancia con la recomendación normativa de incluir al menos **tres modos por cada nivel** de piso, con el fin de capturar de manera precisa la respuesta dinámica de la estructura. En el presente caso, la edificación cuenta con **6 niveles**, por lo que la selección de 18 modos resulta adecuada para representar los efectos de la acción sísmica de forma integral y garantizar una correcta distribución de masas y rigideces en el modelo estructural.

Ilustración 10. Vista en planta de la estructura



Fuente: Software de análisis estructural

Tabla 15. Participación modal

OutputCase	StepNum	Period	UX	UY	SumUX	SumUY	RZ
	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	1	1,110	0,036	0,229	0,036	0,229	0,579
MODAL	2	1,006	0,791	0,034	0,827	0,263	0,015
MODAL	3	0,919	0,009	0,564	0,836	0,827	0,259
MODAL	4	0,391	0,014	0,033	0,850	0,860	0,050
MODAL	5	0,358	0,076	0,014	0,926	0,874	0,001
MODAL	6	0,335	0,003	0,048	0,929	0,922	0,033
MODAL	7	0,281	0,003	0,001	0,932	0,922	0,000
MODAL	8	0,267	0,000	0,006	0,932	0,928	0,001
MODAL	9	0,264	0,000	0,004	0,932	0,932	0,001
MODAL	10	0,242	0,000	0,001	0,932	0,933	0,001
MODAL	11	0,234	0,004	0,007	0,936	0,940	0,008
MODAL	12	0,217	0,018	0,004	0,955	0,943	0,005
MODAL	13	0,202	0,003	0,002	0,957	0,945	0,012
MODAL	14	0,195	0,000	0,001	0,957	0,946	0,000
MODAL	15	0,190	0,002	0,002	0,959	0,947	0,000
MODAL	16	0,188	0,001	0,000	0,960	0,947	0,000
MODAL	17	0,184	0,000	0,014	0,960	0,961	0,000
MODAL	18	0,166	0,005	0,001	0,964	0,962	0,004

Fuente: Software de análisis estructural

Del análisis de la tabla 15, se observó que el modo 1 presenta una participación dominante en rotación alrededor del eje vertical $RZ = 0.58$, mientras que su participación en traslación en X ($UX = 0.04$) y en Y ($UY = 0.23$) es reducida. Esto indica que el modo 1 representa un modo torsional, por lo que no fue considerado para definir los períodos fundamentales de vibración en las direcciones principales del edificio.

En cambio, el modo 2 presentó una participación modal de 0.80 en UX, evidenciando un comportamiento predominantemente traslacional en dirección X. Por tal motivo, se tomó el período del modo 2 ($T = 1.01$ s) como el período fundamental en dirección X.

De manera similar, el modo 3 mostró una participación significativa en traslación en dirección Y, con un valor de 0.56 en UY, por lo que su período de vibración ($T = 0.92$ s) fue adoptado como el período fundamental en dirección Y.

Además, se verificó el cumplimiento del criterio de acumulación de masa efectiva exigido por normativa, el cual establece que debe considerarse un número suficiente de modos de vibración hasta alcanzar al menos el 90 % de la masa total movilizada en cada dirección principal. En este caso, se observó que:

- En dirección X, la suma acumulada de masa participante (SumUX) supera el 90 % a partir del modo 5, con un valor de 0.93.
- En dirección Y, la suma acumulada (SumUY) alcanza el 90 % a partir del modo 6, con un valor de 0.92.

Identificar los modos dominantes permite establecer adecuadamente la respuesta dinámica esperada en cada dirección, asegurando la aplicación correcta del espectro de diseño según lo establecido en la NEC.

Por medio de los períodos fundamentales de vibración previamente determinados, se calculó el coeficiente sísmico C y el coeficiente de modificación k para cada dirección principal del edificio. Para la dirección en “X”, el período fue de 1,01 segundos, obteniéndose un valor de $k = 1,25$ y un coeficiente sísmico $C = 0,19$. En la dirección en “Y”, el período fue de 0,92 segundos, con un valor de $k = 1,21$ y el mismo coeficiente sísmico $C = 0,19$, ya que ambos valores se encuentran en el mismo intervalo del espectro de diseño.

Una vez determinados los coeficientes anteriores, se procedió al ajuste del cortante sísmico, considerando tanto el resultado del análisis dinámico espectral como el cortante obtenido por el análisis estático equivalente, tal como se muestra a continuación.

Tabla 16. Fuerzas cortantes estáticas y dinámicas

Análisis en X		
Sx	385,99	Tonf
Sdx	316,85	Tonf
Análisis en Y		
Sy	385,99	Tonf
Sdy	263,51	Tonf

Fuente: Elaboración propia

Para edificaciones con irregularidades, dicha relación no debe ser menor al **85 %**. En el caso de la presente edificación, se obtuvo lo siguiente:

- **Relación entre el cortante estático y dinámico en X**

$$\frac{316,85}{385,99} = 0,8209 \sim 82\% \quad (7)$$

- **Relación entre el cortante estático y dinámico en Y**

$$\frac{263,51}{385,99} = 0,6827 \sim 68\% \quad (8)$$

Ambos resultados son inferiores al valor mínimo exigido del 85 %, por lo tanto, se concluye que la estructura requiere el ajuste de cortante en ambas direcciones.

Para cumplir con este requisito, se procedió a modificar la gravedad en el análisis dinámico espectral, con el fin de incrementar el cortante basal dinámico hasta igualar o superar el 85 % del valor obtenido por el método estático equivalente. Este procedimiento

asegura que la demanda sísmica aplicada al modelo estructural sea representativa de las exigencias normativas.

$$F_{AX} = 0.85 * S_X / S_{DX} \quad (9)$$

- **Ajuste de Cortante en X**

$$F_{AX} = 0.85 * 385.99 \text{ Tonf} / 316.85 \text{ Tonf} = 1.04 * 9.81 = 10.2$$

- **Ajuste de Cortante en Y**

$$F_{AY} = 0.85 * 385.99 \text{ Tonf} / 263.51 \text{ Tonf} = 1.04 * 9.81 = 12.21$$

Luego de hacer el ajuste de cortante reemplazamos los valores respectivamente a la gravedad en el software de análisis estructural:

Ilustración 11. Ajuste de cortante en X

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	}} INELÁSTIC	10,2
Accel	U1	}} INELÁSTICO..	10,2

Fuente: Software de análisis estructural

Ilustración 12. Ajuste de cortante en Y

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U2	}} INELÁSTIC	12,21
Accel	U2	}} INELÁSTICO..	12,21

Fuente: Software de análisis estructural

4.6 Cálculo de derivas de entrepiso

En el análisis estructural de edificaciones sometidas a cargas sísmicas, uno de los parámetros fundamentales para evaluar el comportamiento dinámico es la deriva entre pisos. Este concepto se refiere al desplazamiento relativo que ocurre entre dos niveles consecutivos de una estructura durante la acción sísmica. La deriva representa una medida directa de la deformación lateral que experimenta el edificio y está estrechamente relacionada con los daños estructurales y no estructurales que puede sufrir.

La importancia de controlar las derivas radica en garantizar la seguridad de los ocupantes, el adecuado funcionamiento de los elementos arquitectónicos (como muros divisorios, ventanas, instalaciones) y evitar el colapso progresivo por efectos acumulativos de

deformaciones excesivas. Por ello, las normativas sismorresistentes, como la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-2015), establecen límites máximos permisibles para la deriva, usualmente expresados como un porcentaje de la altura de entrepiso.

$$\Delta_t = 0.75 * R * \Delta_E \quad (10)$$

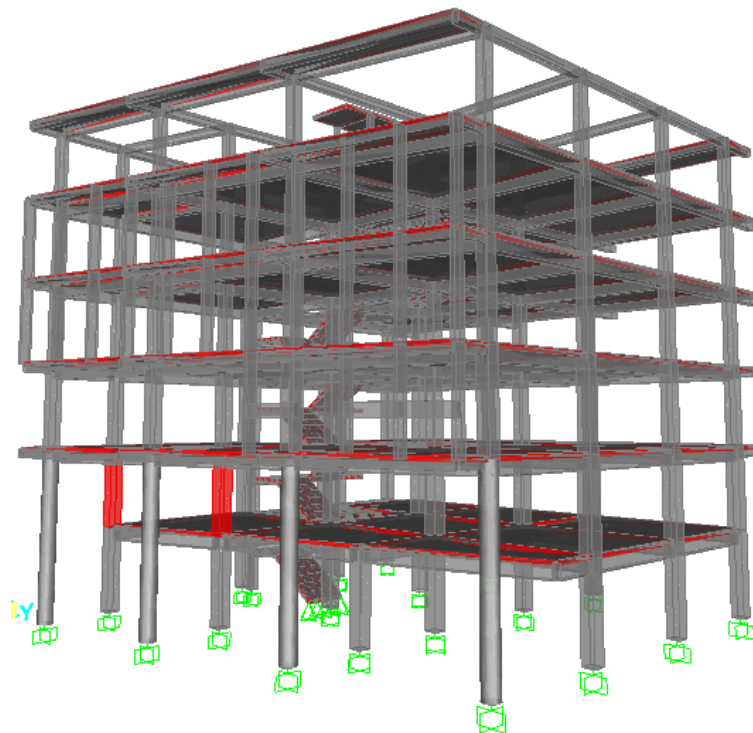
La NEC-2015, en su capítulo de diseño sísmico, especifica que la deriva máxima permitida para edificaciones de concreto armado no debe superar el 2% de la altura de piso.

4.6.1 Derivas en dirección X

Durante el análisis dinámico realizado en el programa de modelación estructural, se identificaron dos puntos con los mayores valores de deriva en la dirección X. El primero se localiza en el eje D-6, específicamente entre los niveles Mezanine y Planta Alta 1, registrando una magnitud de 2,24%.

El segundo punto crítico se encuentra en el eje J-9, también entre los niveles Mezanine y Planta Alta 1, con una deriva de 2,20%. A continuación, se presenta la tabla con los resultados obtenidos:

Ilustración 13. Localización de máximas derivas en dirección en X



Fuente: Software de análisis estructural

$$\Delta_t = 0.75 * R * \Delta_E$$

$$\Delta_t = 0.75 * 6 * \frac{28.42mm - 12.49mm}{3.2m * \frac{1000mm}{1m}} * 100$$

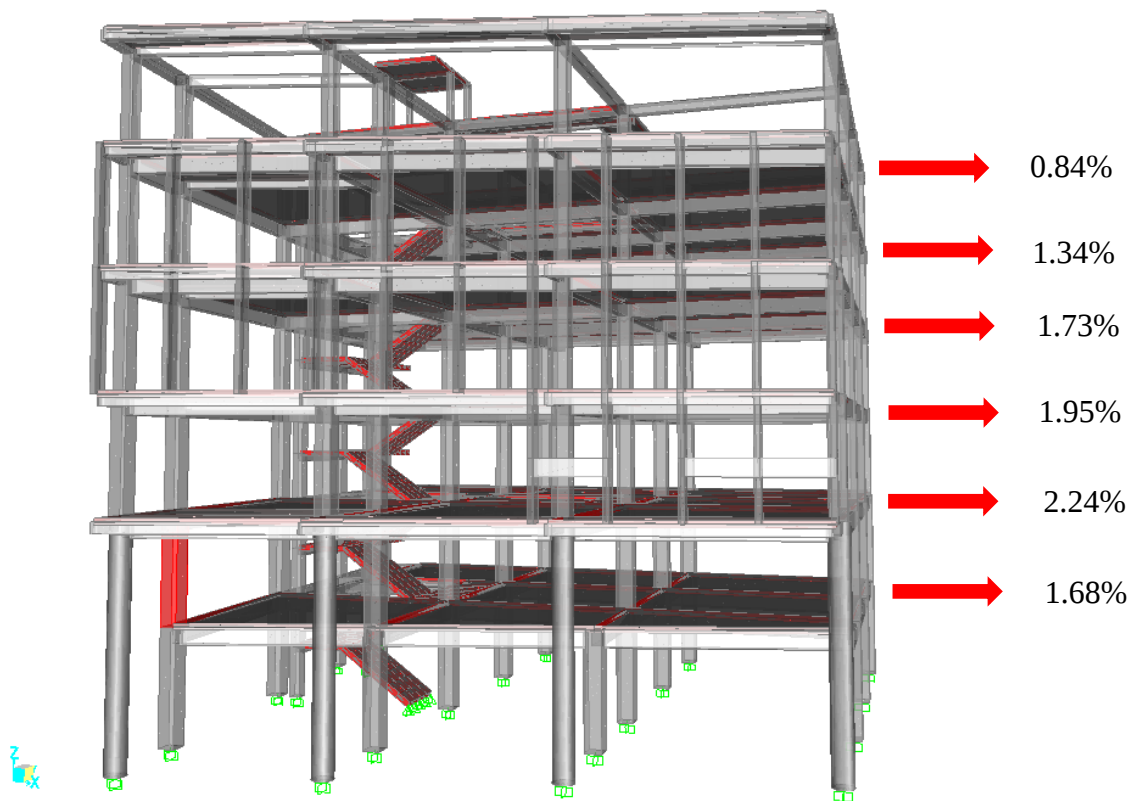
$$\Delta_t = 2.24\%$$

Tabla 17. Derivas en eje D-6

Análisis de derivas por nivel del Eje D-6				
Planta	Altura(m)	Desplazamiento X(mm)	Diferencia de Desplazamiento X(mm)	Derivas Inelásticas
				X
Azotea	3	69,69	5,59	0,84%
Planta Alta 3	3,2	64,10	9,52	1,34%
Planta Alta 2	3,2	54,58	12,28	1,73%
Planta Alta 1	3,2	42,31	13,89	1,95%
Mezanine	3,2	28,42	15,93	2,24%
Planta Baja	3,35	12,49	12,49	1,68%

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 14. Derivas inelásticas en eje D-6 en sismo de diseño en dirección X



Fuente: Elaboración propia

$$\Delta_t = 0.75 * R * \Delta_E$$

$$\Delta_t = 0.75 * 6 * \frac{27.928mm - 12.295mm}{3.2m * \frac{1000mm}{1m}} * 100$$

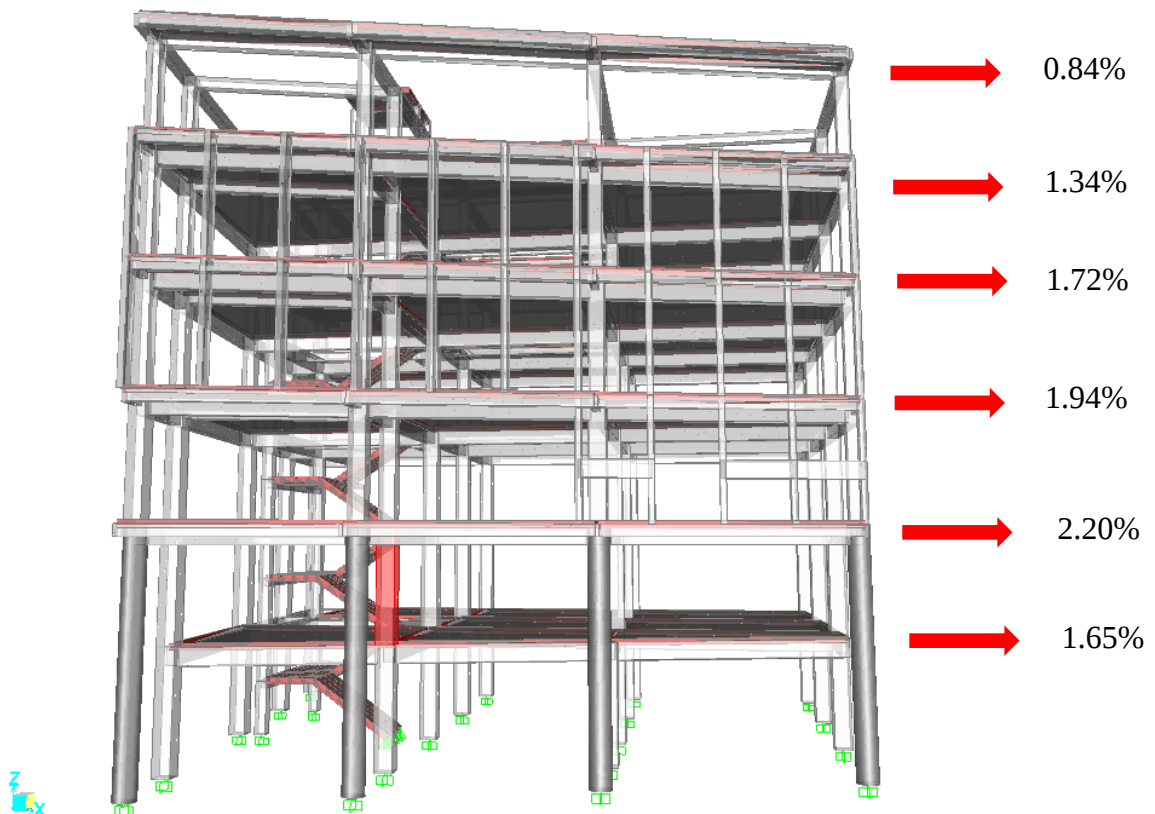
$$\Delta_t = 2.20\%$$

Tabla 18. Derivas en eje J-9

Análisis de derivas por nivel en la columna del Eje J-9				
Planta	Altura(m)	Desplazamiento X(mm)	Diferencia de Desplazamiento X(mm)	Derivas Inelásticas
				X
Azotea	3	69,08	5,60	0,84%
Planta Alta 3	3,2	63,48	9,52	1,34%
Planta Alta 2	3,2	53,96	12,24	1,72%
Planta Alta 1	3,2	41,72	13,80	1,94%
Mezanine	3,2	27,93	15,63	2,20%
Planta Baja	3,35	12,30	12,30	1,65%

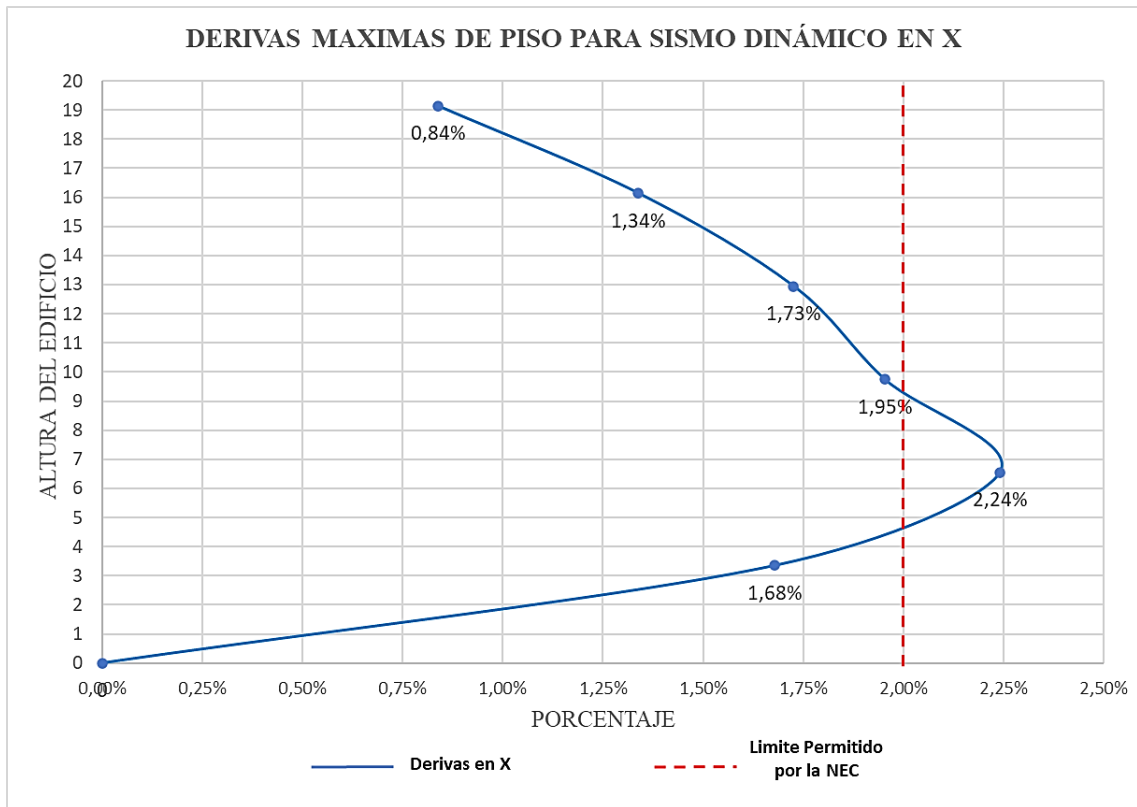
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 15. Derivas inelásticas en eje J-9 en sismo de diseño en dirección X



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 16. Diagrama de derivas máximas en dirección en X



Fuente: Elaboración propia

La Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-2015 establece que la deriva máxima permitida para edificaciones de concreto armado es del 2%. En este análisis, se identificaron dos puntos que superan dicho límite: el eje D-6 con una deriva del 2,24% y el eje J-9 con una deriva del 2,20%, ambos entre los niveles Mezanine y Planta Alta 1. Estos resultados representan una condición estructural crítica que requiere ser evaluada detalladamente, ya que podrían comprometer el desempeño sísmico del edificio.

Observaciones técnicas realizadas durante la revisión del modelo, se presume que este comportamiento podría estar relacionado con una falta de continuidad en las columnas en dichos ejes, lo cual generaría una variación significativa en la rigidez entre niveles. Este tipo de irregularidad en altura es comúnmente asociado a concentraciones de esfuerzos y deformaciones, lo que refuerza la necesidad de un análisis más profundo en estas zonas vulnerables.

4.6.1.1. Tabla general de derivas en dirección X

A continuación, se presenta la tabla resumen con las derivas obtenidas para cada nivel de la estructura en todos los ejes considerados para el análisis en dirección X, con valores destacados donde se superó el límite del 2%:

Tabla 19. Tabla general de derivas en dirección en X

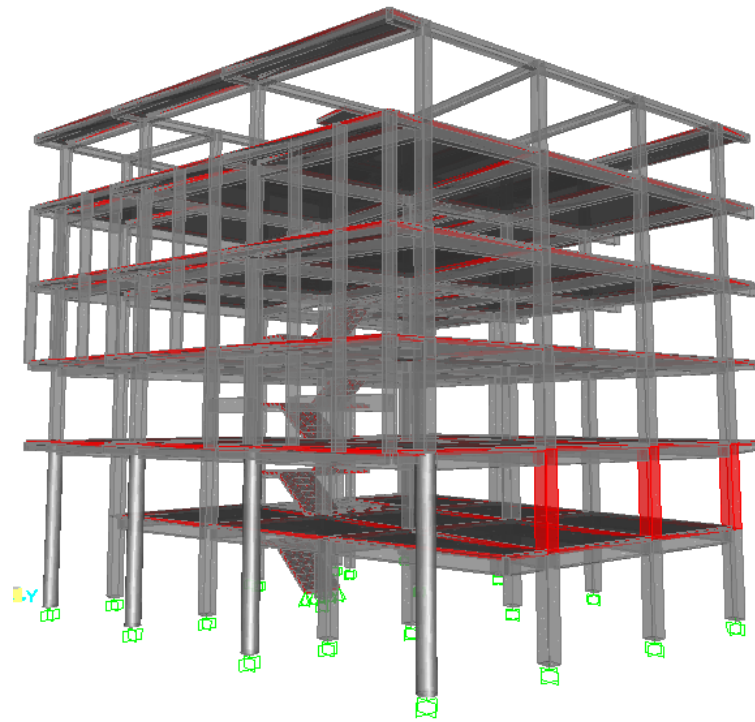
Derivas para sismo Dinamico en X																						
Planta	Altura(m)	Eje																				
		A-19	J-19	N-19	O-19	B-18	D-18	J-18	N-18	O-18	C-13	D-13	J-13	N-13	O-13	D-6	J-9	N-11	E-2	J-4	N-7	O-10
Azotea	3	0,90%	0,90%	0,90%	0,90%	0,87%	0,87%	0,87%	0,87%	0,87%	0,85%	0,85%	0,85%	0,85%	0,85%	0,84%	0,84%	0,00%	0,84%	0,84%	0,84%	0,84%
Planta Alta 3	3,2	1,43%	1,43%	1,43%	1,43%	1,38%	1,38%	1,38%	1,38%	1,38%	1,35%	1,35%	1,35%	1,35%	1,35%	1,34%	1,34%	0,00%	1,34%	1,34%	1,34%	1,34%
Planta Alta 2	3,2	1,77%	1,77%	1,77%	1,77%	1,74%	1,74%	1,74%	1,74%	1,74%	1,72%	1,72%	1,72%	1,72%	1,72%	1,73%	1,72%	0,00%	1,74%	1,73%	1,73%	1,72%
Planta Alta 1	3,2	1,92%	1,92%	1,92%	1,92%	1,91%	1,91%	1,91%	1,91%	1,91%	1,91%	1,91%	1,91%	1,91%	1,91%	1,95%	1,94%	0,00%	1,98%	1,97%	1,95%	1,94%
Mezzanine	3,2	1,92%	1,92%	1,92%	1,92%	1,98%	1,98%	1,98%	1,98%	1,98%	2,08%	2,08%	2,08%	2,08%	2,08%	2,24%	2,20%	0,00%	-	-	-	-
Planta Baja Principal	3,35	1,48%	1,48%	1,48%	1,48%	1,52%	1,52%	1,52%	1,52%	1,52%	1,57%	1,57%	1,57%	1,57%	1,57%	1,68%	1,65%	1,63%	-	-	-	-
Planta Baja Portante	6,55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,02%	1,98%	1,95%	1,91%

Fuente: Elaboración propia

4.6.2 Derivas en dirección Y

En el análisis dinámico realizado en la dirección Y, se identificó que los tres ejes verticales analizados (O-13, O-18 y O-19) presentan **una deriva inelástica máxima de 2,51%** entre los niveles **Mezzanine y Planta Alta 1**, tal como se muestra en las siguientes tablas:

Ilustración 17. Localización de máximas derivas en dirección en Y



Fuente: Software de análisis estructural

$$\Delta_t = 0.75 * R * \Delta_E$$

$$\Delta_t = 0.75 * 6 * \frac{31.50mm - 13.62mm}{3.2m * \frac{1000mm}{1m}} * 100$$

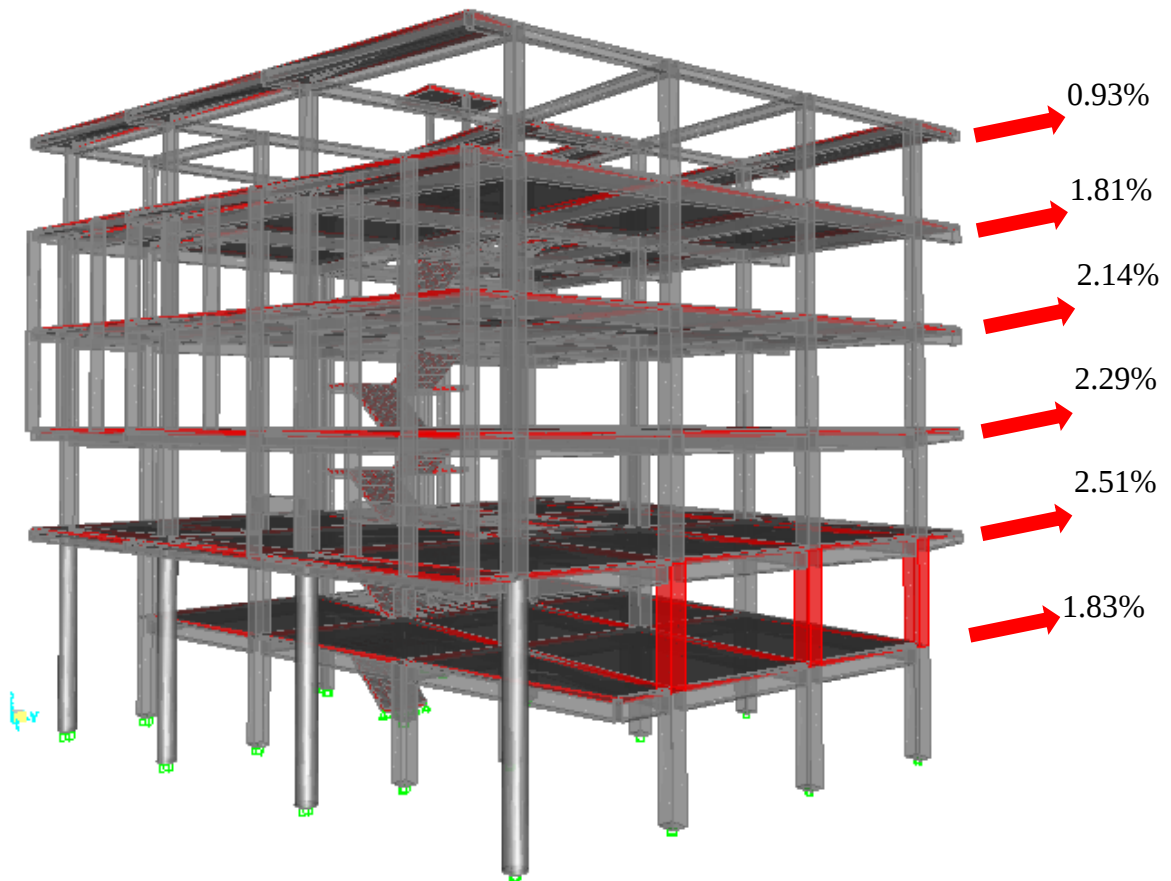
$$\Delta_t = 2.51\%$$

Tabla 20. Derivas en eje O-13,18 y 19

Análisis de derivas por nivel de las columnas del Eje O-13; O-18; O-19				
Planta	Altura(m)	Desplazamiento Y(mm)	Diferencia de Desplazamiento Y(mm)	Derivas Inelásticas
				Y
Azotea	3	82,06	6,23	0,93%
Planta Alta 3	3,2	75,83	12,85	1,81%
Planta Alta 2	3,2	62,98	15,23	2,14%
Planta Alta 1	3,2	47,75	16,26	2,29%
Mezanine	3,2	31,50	17,87	2,51%
Planta Baja	3,35	13,62	13,62	1,83%

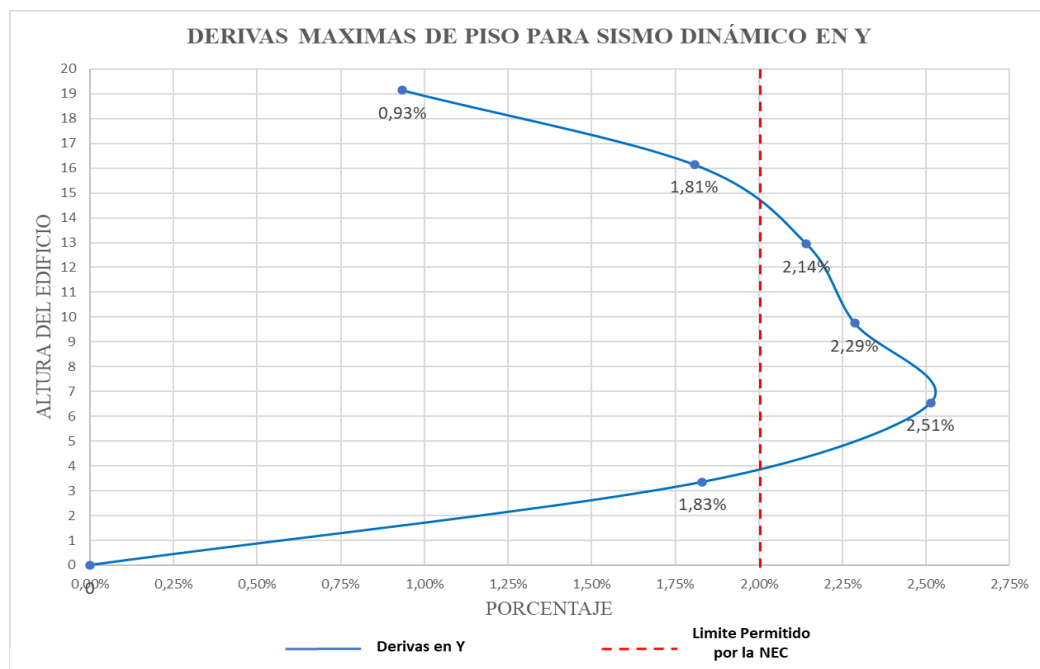
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 18. Derivas inelásticas en eje O-13,18 y 19 en sismo de diseño en dirección Y



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 19. Diagrama de derivas máximas en dirección en Y



Fuente: Elaboración propia

Estos resultados exceden el valor límite establecido por la normativa, lo que evidencia un comportamiento estructural potencialmente vulnerable ante solicitaciones sísmicas en dicha dirección. Este patrón repetitivo en múltiples ejes sugiere la existencia de una irregularidad en altura que afecta transversalmente a la estructura, probablemente vinculada a una variación de rigidez interpiso o a discontinuidades en la continuidad vertical de las columnas, según lo observado durante la inspección del modelo estructural.

4.6.2.1. Tabla general de derivas en dirección Y

A continuación, se presenta la tabla resumen con las derivas obtenidas para cada nivel de la estructura en todos los ejes considerados para el análisis en dirección Y, con valores destacados donde se superó el límite del 2%:

Tabla 21. Tabla general de derivas en dirección en Y

Derivas para sismo Dinamico en Y																							
Planta	Altura(m)	Eje																					
		A-19	J-19	N-19	O-19	B-18	D-18	J-18	N-18	O-18	C-13	D-13	J-13	N-13	O-13	D-6	J-9	N-11	E-2	J-4	N-7	O-10	
Azotea	3	1,17%	0,91%	0,83%	0,93%	1,15%	1,10%	0,91%	0,83%	0,93%	1,13%	1,10%	0,91%	0,83%	0,93%	1,10%	0,91%	0,00%	1,08%	0,91%	0,83%	0,93%	
Planta Alta 3	3,2	1,65%	1,36%	1,43%	1,81%	1,62%	1,55%	1,36%	1,43%	1,81%	1,59%	1,55%	1,36%	1,43%	1,81%	1,55%	1,36%	0,00%	1,53%	1,36%	1,43%	1,81%	
Planta Alta 2	3,2	2,03%	1,63%	1,69%	2,14%	1,99%	1,90%	1,63%	1,69%	2,14%	1,95%	1,90%	1,63%	1,69%	2,14%	1,90%	1,63%	0,00%	1,88%	1,63%	1,69%	2,14%	
Planta Alta 1	3,2	2,26%	1,77%	1,80%	2,29%	2,22%	2,10%	1,77%	1,80%	2,29%	2,17%	2,10%	1,77%	1,80%	2,29%	2,10%	1,77%	0,00%	2,08%	1,77%	1,80%	2,29%	
Mezzanine	3,2	2,46%	1,88%	1,93%	2,51%	2,40%	2,27%	1,88%	1,93%	2,51%	2,34%	2,27%	1,88%	1,93%	2,51%	2,27%	1,88%	0,00%	-	-	-	-	
Planta Baja Principal	3,35	1,77%	1,38%	1,42%	1,83%	1,73%	1,64%	1,38%	1,42%	1,83%	1,69%	1,64%	1,38%	1,42%	1,83%	1,64%	1,38%	1,42%	-	-	-	-	
Planta Baja Portante	6,55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,92%	1,63%	1,67%	2,16%	

Fuente: Elaboración propia

4.7 Evaluación del desempeño estructural frente al sismo del 2023 con epicentro en la Isla Puná, Golfo de Guayaquil

Luego del análisis realizado con base en el espectro de diseño definido por la NEC-2015, en el cual se identificaron derivas que superan el límite normativo del 2%, se procede a evaluar el comportamiento real de la edificación frente al sismo ocurrido el 18 de marzo de 2023. Este evento sísmico, de magnitud 6.7 Mw, tuvo su epicentro en la Isla Puná, ubicada en el Golfo de Guayaquil, con una profundidad de 66 km, según los registros del Instituto Geofísico del Ecuador. El sismo se produjo a las 12:12 horas y afectó considerablemente a las provincias de Guayas, El Oro, Azuay y Loja, siendo Machala una de las ciudades más impactadas por su cercanía al epicentro y las condiciones locales del terreno.

Machala se encuentra clasificada dentro de una zona de amenaza sísmica alta según la zonificación de la NEC-2015 y está situada sobre suelo tipo D y tipo E, correspondiente a suelos blandos o medianamente consolidados, lo cual amplifica las aceleraciones sísmicas en la superficie y, por tanto, incrementa la demanda estructural.

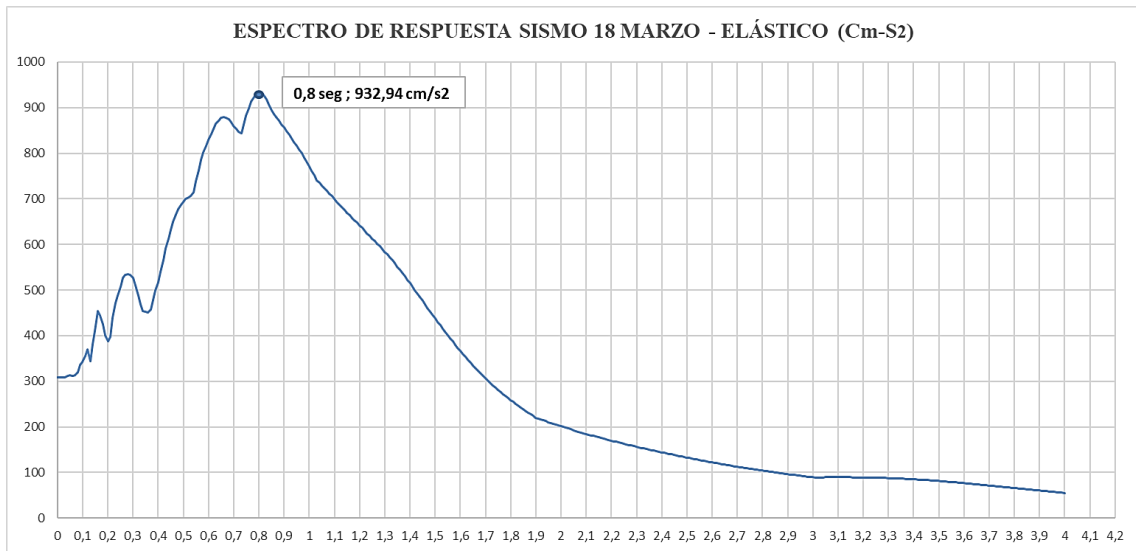
Este análisis tiene como objetivo contrastar los resultados obtenidos bajo el espectro normativo con el desempeño estructural real del edificio ante un evento sísmico registrado. Para ello, se tomó como referencia la respuesta dinámica del modelo estructural al espectro de respuesta construido con base en los parámetros reales del sismo del 2023. Esta comparación permite evaluar la validez del modelo, la precisión del análisis y, sobre todo, comprender por qué, a pesar de que las derivas obtenidas en el análisis normativo superaban el límite permitido, no se reportaron daños estructurales visibles en la edificación posterior al evento sísmico real.

4.7.1 Construcción del espectro de respuesta del sismo 2023

Para evaluar el comportamiento estructural del edificio frente al sismo ocurrido el 18 de marzo de 2023, se utilizó un espectro de respuesta elástico representativo de dicho evento. Este espectro fue obtenido de registros sísmicos procesados con base en datos reales, proporcionados por entidades como el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN), y corresponde a un sitio caracterizado como suelo tipo D, según la clasificación de la NEC-2015.

El espectro representa la respuesta de aceleración máxima de un oscilador simple con distintos periodos de vibración y se encuentra expresado en cm/s^2 . La información fue facilitada en formato tabular, conteniendo valores de aceleración espectral para un rango amplio de periodos (de 0.00 s a 4.00 s), permitiendo una evaluación detallada del comportamiento dinámico del edificio.

Ilustración 20. Espectro de respuesta del sismo de 18 de marzo del 2023



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la figura, el espectro presenta su aceleración máxima en el periodo de **0,8 segundos**, con un valor de **932,94 cm/s²**, lo que corresponde a la mayor demanda dinámica sobre estructuras con ese periodo fundamental. Este comportamiento es coherente con edificaciones de baja a mediana altura con sistemas estructurales relativamente flexibles.

4.7.2 Incorporación del espectro real al modelo estructural y ajuste por condiciones locales

Para simular el comportamiento real de la edificación frente al sismo del 18 de marzo de 2023, se incorporó al modelo estructural el espectro de respuesta elástico generado a partir de registros reales del evento, correspondiente a suelo tipo D. Este espectro fue cargado en el software de análisis mediante la función de espectro definido por el usuario, permitiendo aplicar aceleraciones específicas para cada periodo de vibración en la dirección correspondiente.

Sin embargo, es importante señalar que, según la clasificación geotécnica preliminar del sitio donde se ubica la edificación (ciudad de Machala), el suelo corresponde al tipo E conforme a la NEC-2015. Esta diferencia entre tipos de suelo influye directamente en la amplificación espectral, expresada a través del factor F_a . Según la normativa:

- Para suelo **tipo D**, el valor de **$F_a = 1,20$**
- Para suelo **tipo E**, el valor de **$F_a = 1,00$**

Debido a que el espectro real fue generado para condiciones de suelo tipo D (más rígido que el suelo real), se procedió a realizar un ajuste de escala con aproximación en el modelo estructural. En lugar de aplicar el espectro directamente con una gravedad normalizada ($1g = 980 \text{ cm/s}^2$), se redujo el factor de carga gravitacional a **0,83g**. Este valor resulta de la relación entre los factores espectrales:

$$Ajuste \text{ Aplicado} = F_{a \text{ suelo E}} / F_{a \text{ suelo D}} = 1.00 / 1.20 = 0.83 \quad (11)$$

Ilustración 21. Ajuste escalado con aproximación

Loads Applied			
Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	SISMO2023	0,83
Accel	U1	SISMO2023	0,83

Fuente: Software de análisis estructural

Fue aplicado en ambas direcciones principales del modelo estructural: dirección X y dirección Y. Esto permitió evaluar de forma más precisa la respuesta dinámica en cada eje, considerando la anisotropía en rigidez y masa del edificio. La aplicación bidireccional del espectro ajustado permitió obtener derivas entre pisos diferenciadas para cada dirección, lo cual es fundamental para una evaluación realista del desempeño estructural frente al evento sísmico considerado.

4.7.3 Resultados de derivas obtenidas con el sismo del 2023

Una vez incorporado el espectro de respuesta del sismo al modelo estructural, se procedió a realizar el análisis dinámico para determinar las derivas entre niveles bajo condiciones sísmicas reales. El análisis se ejecutó en ambas direcciones principales del edificio (X e Y), seleccionando ejes estructurales representativos del comportamiento global del sistema.

4.7.3.1 Derivas en dirección X

En la dirección X, se evaluaron los ejes **D-6** y **J-9**, los cuales fueron previamente identificados como puntos críticos durante el análisis con el espectro de diseño. En este caso, el mayor valor de deriva se registró entre los niveles **Mezanine** y **Planta Alta 1**, con un valor de **1.62% en el eje D-6** y **1.59% en el eje J-9**.

$$\Delta_t = \Delta_E$$

$$\Delta_t = \frac{92.51mm - 40.61mm}{3.2m * \frac{1000mm}{1m}} * 100$$

$$\Delta_t = 1.62\%$$

Tabla 22. Derivas de sismo 2023 en eje D-6

Análisis de derivas por nivel en la columna del Eje D-6				
Planta	Altura(m)	Desplazamiento X(mm)	Diferencia de Desplazamiento X(mm)	Derivas Inelásticas
				X
Azotea	3	227,12	18,08	0,60%
Planta Alta 3	3,2	209,04	31,02	0,97%
Planta Alta 2	3,2	178,02	40,14	1,25%
Planta Alta 1	3,2	137,88	45,37	1,42%
Mezanine	3,2	92,51	51,9	1,62%
Planta Baja	3,35	40,61	40,61	1,21%

Fuente: Elaboración propia

$$\Delta_t = \Delta_E$$

$$\Delta_t = \frac{90.78mm - 39.91mm}{3.2m * \frac{1000mm}{1m}} * 100$$

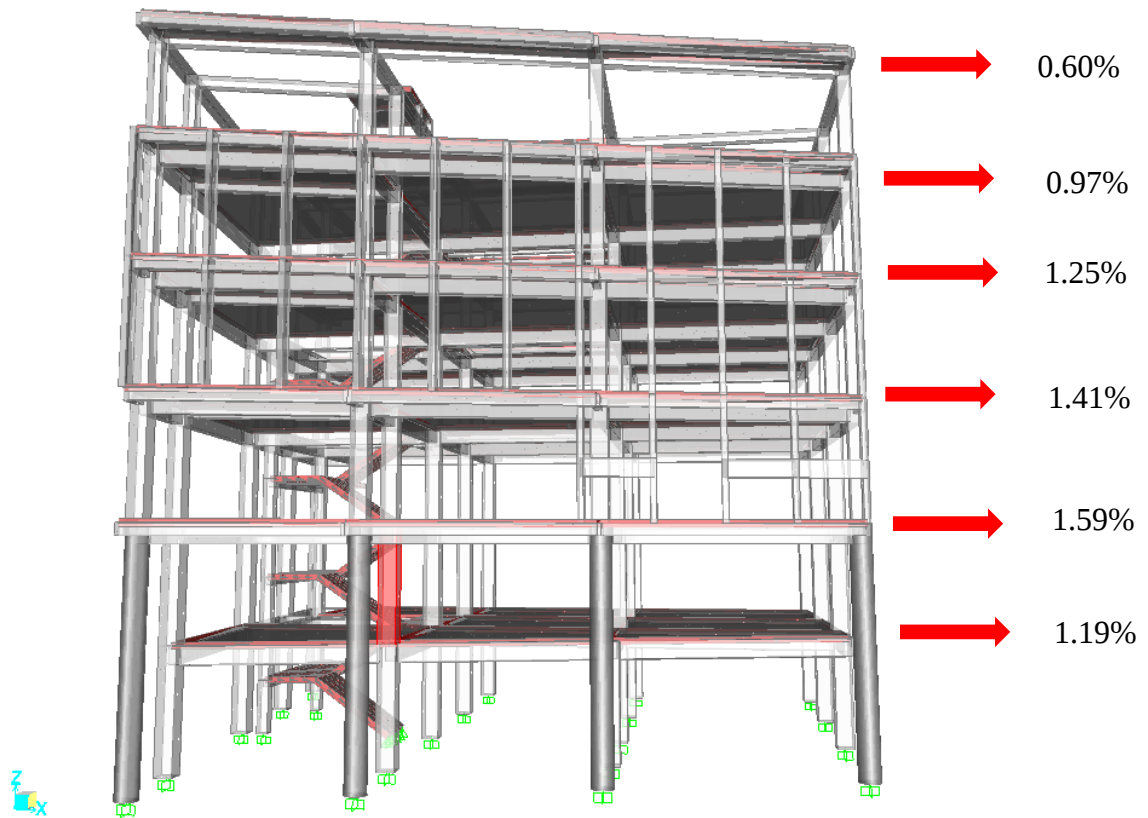
$$\Delta_t = 1.59\%$$

Tabla 23. Derivas de sismo 2023 en eje J-9

Análisis de derivas por nivel en la columna del Eje J-9				
Planta	Altura(m)	Desplazamiento X(mm)	Diferencia de Desplazamiento X(mm)	Derivas Inelásticas
				X
Azotea	3	224,8	18,09	0,60%
Planta Alta 3	3,2	206,71	30,98	0,97%
Planta Alta 2	3,2	175,73	39,96	1,25%
Planta Alta 1	3,2	135,77	44,99	1,41%
Mezanine	3,2	90,78	50,87	1,59%
Planta Baja	3,35	39,91	39,91	1,19%

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 22. Derivas inelásticas en eje J-9 en sismo de respuesta en dirección X



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 23. Diagrama de derivas máximas de sismo 2023 en dirección en X

DERIVAS MAXIMAS DE PISO PARA SISMO DE RESPUESTA 2023 EN X

Altura del Edificio (m)	Deriva (%)
19.00	0.60%
16.00	0.97%
13.00	1.25%
10.00	1.42%
7.00	1.62%
4.00	1.21%

— Derivas en X
- - - Limite Permitido por la NEC

Fuente: Elaboración propia

Estos valores representan una reducción significativa en comparación con los obtenidos bajo el espectro normativo de la NEC-2015, donde se alcanzaron derivas máximas de hasta 2.24%.

4.7.3.2 Derivas en dirección Y

En la dirección Y, se analizaron los ejes **O-13**, **O-18** y **O-19**, presentando todo un comportamiento similar. En estos ejes, las derivas más altas también se localizaron entre los niveles **Mezanine** y **Planta Alta 1**, alcanzando un valor máximo de **1.38%** en cada caso.

$$\Delta_t = \Delta_E$$

$$\Delta_t = \frac{78.06mm - 33.77mm}{3.2m * \frac{1000mm}{1m}} * 100$$

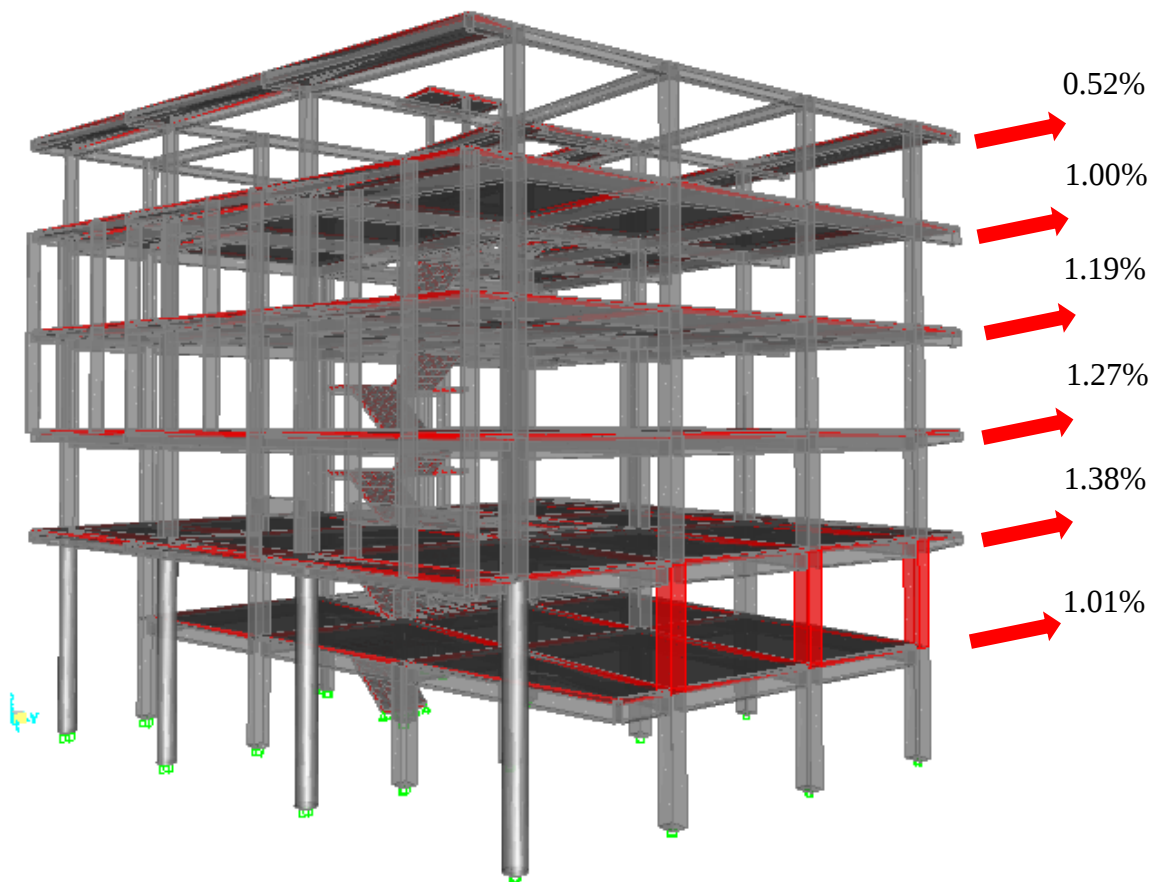
$$\Delta_t = 1.38\%$$

Tabla 24. Derivas de sismo 2023 en eje O-13,18 y 19

<i>Análisis de derivas por nivel en la columna del Eje O-13; O-18; O-19</i>				
Planta	Altura(m)	Desplazamiento Y(mm)	Diferencia de Desplazamiento Y(mm)	Derivas Inelásticas Y
Azotea	3	204,49	15,58	0,52%
Planta Alta 3	3,2	188,91	32,15	1,00%
Planta Alta 2	3,2	156,76	38,14	1,19%
Planta Alta 1	3,2	118,62	40,56	1,27%
Mezanine	3,2	78,06	44,29	1,38%
Planta Baja	3,35	33,77	33,77	1,01%

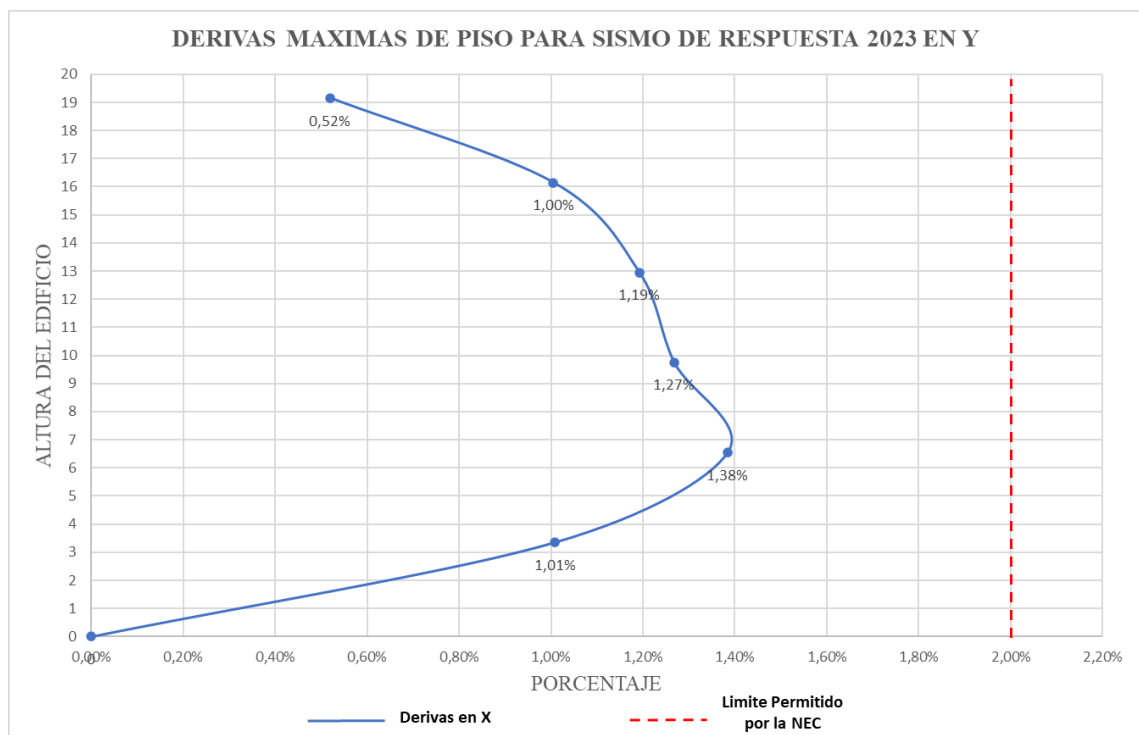
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 24. Derivas inelásticas en eje O-13,18 y 19 en sismo de respuesta en dirección Y



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 25. Diagrama de derivas máximas en sismo 2023 en dirección en Y



Fuente: Elaboración propia

Al igual que en la dirección X, estas derivas representan una disminución respecto al análisis con el espectro de diseño, donde se registraron valores de hasta 2.51%.

Esto refuerza la idea de que el sismo real del 2023 impuso exigencias dinámicas menores, permitiendo que la estructura se mantuviera dentro de un rango aceptable de deformación sin presentar daños visibles. No obstante, el comportamiento observado no garantiza una respuesta igualmente satisfactoria ante un sismo que iguale o supere el nivel de diseño. Por tanto, se recomienda prestar atención a los puntos donde se registraron concentraciones de deriva y considerar posibles medidas de refuerzo para mejorar la respuesta del edificio ante futuros eventos de mayor severidad.

4.7.4 Revisión de cuantía para elementos estructurales

Se realizó una revisión de la cuantía de las vigas y columnas más solicitadas, considerando los esfuerzos obtenidos a través de la simulación estructural del edificio de estudio. El objetivo fue verificar si la cuantía proporcionada cumple con los límites normativos mínimos y máximos establecidos. Esta verificación se centró en asegurar que los elementos estructurales analizados respondan adecuadamente ante las solicitaciones previstas, conforme a los parámetros exigidos por la normativa.

4.7.4.1 Revisión de cuantía de vigas

Se analizaron los elementos: 3 (viga más solicitada en X; ubicación: Mezanine; entre los ejes N-18 y O-18), elemento 10 (viga más solicitada en Y; ubicación: Mezanine; entre los ejes O-13 y O-18), del sistema estructural bajo distintas combinaciones de carga en las direcciones X e Y, respectivamente. En ambos casos se evaluaron dos combinaciones principales más demandadas y el evento real evaluado:

- 1,2D + L + Espectro
- Sismo 2023

Los resultados de momento flector ($T \cdot m$) y cuantía de acero (%) se compararon con los límites normativos permitidos, con su respectivo cálculo que se detalla en el anexo 13:

Tabla 25. Límites normativos

Límite	Valor en %
ρ_{min}	0,29 %
ρ_{max}	1,24 %

Fuente: NEC-SE-HM

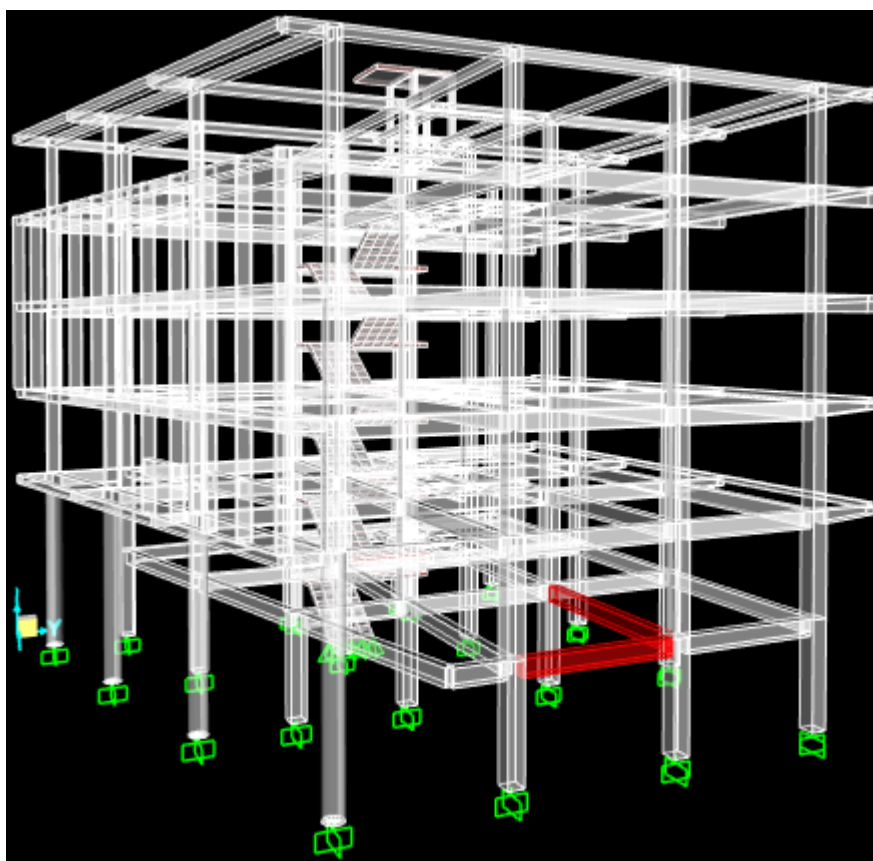
En los anexos 13, 14, 15 y 16 se detallan los procesos realizados para la obtención de las cuantías de las vigas en ambas direcciones.

Tabla 26. Cuantía de vigas

VIGAS				
	Elemento	Combinación	Momento (T·m)	Cuantía
Análisis en X	3 (ejes N-18 y O-18)	1,2D + L + Espectro X	16,51	0.89 %
		Sismo 2023	26.02	1.32 %
Análisis en Y	10 (ejes O-13 y O-18)	1,2D + L + Espectro Y	16,34	0.88 %
		Sismo 2023	32,68	1.75 %

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 26. Ubicación de vigas más solicitadas



Fuente: Software de análisis estructural

En este caso, el sismo 2023 genera las mayores solicitaciones de momento y cuantía, superando los valores de la combinación normativa, lo que puede provocar en la estructura fallas frágiles por compresión prematura del concreto, comportamiento no dúctil (peligroso en zonas sísmicas) o reducción de la capacidad de disipación de energía.

De acuerdo a inspecciones en campo la edificación no presenta daños aparentes, sin embargo, fue sobre exigido estructuralmente, pudiendo presentar daños internos no visibles (fisuración, pérdida de adherencia) y acumulación de daño que comprometa su desempeño en un futuro sismo.

4.7.4.2 Revisión de cuantía de columnas

En la Tabla 27 se presentan los valores de cuantía obtenidos para el elemento 228 (columna más solicitada; ubicación: Planta Baja; eje N-11), evaluado bajo dos combinaciones de carga ganadoras:

- 1,2D + L + Espectro X
- Sismo 2023

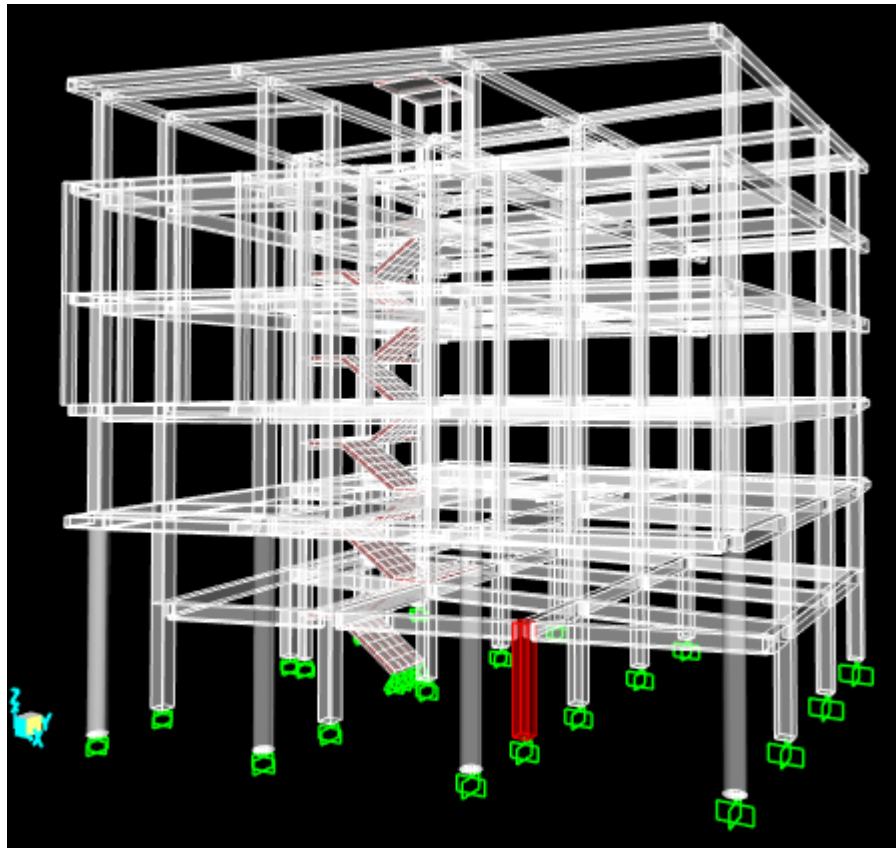
Según la normativa estructural vigente, la cuantía mínima y máxima permitida para columnas de concreto armado oscila entre 1 % y 3 %, rango que garantiza tanto la resistencia adecuada como la ductilidad mínima esperada del elemento estructural. Los resultados obtenidos se detallan en la tabla 27:

Tabla 27. Cuantía de columna

COLUMNA			
Elemento	Combinación	Momento (T·m)	Cuantía
228	1,2D + L + Espectro X	41.69	1.22 %
	Sismo 2023	73.48	2.27 %

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 27. Ubicación de columna más solicitada



Fuente: Software de análisis estructural

Para la combinación 1,2D + L + Espectro X, se obtuvo una cuantía del 1.22 %, y para la combinación correspondiente al sismo 2023, se obtuvo una cuantía del 2.27 %; ambos valores se encuentran dentro del intervalo normativo permitido. Por lo tanto, se concluye que la cuantía requerida para el diseño de la columna es técnicamente admisible en ambas condiciones de carga evaluadas. Esta verificación confirma que, al menos en términos de cuantía teórica, el diseño cumple con los requerimientos mínimos de seguridad estructural establecidos para elementos sometidos a flexión en zonas sísmicas.

Cabe aclarar que esta revisión se ha realizado exclusivamente a nivel de cuantía mínima y máxima, sin considerar aspectos constructivos ni distribución detallada del refuerzo longitudinal o transversal, debido a la ausencia de planos estructurales del proyecto.

4.7.5 Interpretación de resultados

El análisis estructural realizado sobre elementos representativos del edificio permitió comparar el comportamiento bajo dos escenarios sísmicos: el sismo de diseño normativo (con periodo de retorno de 475 años) y el sismo real del 18 de marzo de 2023, utilizando el espectro de respuesta registrado. Esta evaluación se centró en las cuantías de refuerzo

necesarias para resistir los momentos flectores inducidos, con base en la normativa NEC (2015), considerando la cuantía mínima y máxima teórica para elementos a flexión.

Para el caso del sismo de diseño, las vigas evaluadas presentaron cuantías de 0.88% y 0.89%, lo cual se encuentra dentro del rango normativo permitido, considerando una cuantía mínima estimada de 0.29% y una cuantía máxima de 1.24%, calculadas con base en los parámetros $f'_c = 24$ MPa y $f_y = 420$ MPa. Esto demuestra que, pese a que las derivas de entrepiso no cumplen con los límites establecidos por la NEC-SE-DS, los elementos sí presentan una capacidad resistente suficiente y ductilidad mínima asegurada.

Por otro lado, frente al sismo real de 2023, las vigas mostraron momentos significativamente mayores (hasta 32.68 T·m), con cuantías que llegaron a 1.75%, lo que excede la cuantía máxima teórica permitida para diseños a flexión. Este fenómeno puede atribuirse a la naturaleza del espectro de respuesta, el cual presenta picos de aceleración en ciertos periodos que activan modos superiores de vibración. Estos generan altos esfuerzos internos sin producir grandes desplazamientos, razón por la cual las derivas en este escenario sí cumplen, ya que no requieren ser amplificadas por el factor $0.75 \cdot R$ como en el espectro de diseño inelástico.

Los valores de cuantía obtenidos para la columna, tanto bajo la combinación gravitacional más espectro como bajo la acción del sismo del 2023, se mantienen dentro de los límites establecidos por la normativa. El valor máximo registrado fue del 2.27 %, lo cual es técnicamente admisible de 3%. Por lo tanto, se concluye que la sección de la columna tiene la capacidad suficiente para resistir las solicitaciones evaluadas, sin necesidad de rediseño por exceso de refuerzo, lo que garantiza seguridad estructural bajo ambas condiciones de carga.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se examinó literatura científica actualizada sobre el comportamiento sísmico de estructuras con irregularidades en elevación, lo cual permitió establecer que este tipo de irregularidades genera concentraciones de esfuerzos, incrementa las derivas entre pisos y reduce la capacidad de disipación de energía, especialmente en zonas con discontinuidad de rigidez o masa.
- Mediante visitas técnicas e inspección documental se recopiló información suficiente para modelar estructuralmente el edificio de estudio ubicado en la Universidad Técnica de Machala. Este modelo permitió representar fielmente la distribución geométrica y estructural, así como simular el comportamiento sísmico del edificio bajo diferentes escenarios de carga, considerando su configuración en planta y en elevación.
- Se evaluó el desempeño post-sísmico de la estructura mediante análisis espectrales con espectro normativo y espectro real del sismo del 18 de marzo de 2023 escalado con aproximación. Se identificaron zonas críticas con derivas que superaron el límite del 2 % en ambas direcciones (X e Y), lo que evidencia un comportamiento estructural vulnerable. No obstante, al simular el sismo real, las derivas se redujeron por debajo del límite normativo, sugiriendo que el evento no alcanzó la severidad del nivel de diseño considerado por la NEC-2015. Además, se determinó que la estructura requiere ajuste de cortante en ambas direcciones principales, ya que la relación entre el cortante dinámico y el estático fue inferior al 85 %, lo cual constituye una exigencia normativa para edificaciones con irregularidades en elevación.
- El comportamiento estructural observado evidencia que las vigas analizadas presentan una cuantía de refuerzo de 0.88% y 0.89% en las direcciones X y Y cumpliendo con el rango de 0.29 y 1.24%, es decir, el edificio cumple en términos de resistencia para el sismo normativo, aunque presenta excedencias en derivas de 2.24% en X y 2.51% en Y entre los niveles Mezanine y Planta Alta 1; mientras que, bajo el sismo real, cumple con derivas de 1.62% en dirección en X y 1.38% en dirección en Y, pero genera cuantías excesivas de 1.32 % en dirección X y 1.75% en dirección Y en vigas superando el rango de 1.24%, y 2.27% correspondiente a columnas siendo el valor máximo 3%, atribuibles a la

naturaleza del espectro de respuesta. Esta situación no generó daño físico observable, lo que indica un desempeño aceptable en la práctica, pero resalta la necesidad de reforzar o rediseñar ciertas secciones con cuantía excedida, especialmente si se consideran futuros eventos sísmicos con características similares. La inclusión de espectros reales en evaluaciones estructurales permite identificar solicitaciones no previstas en escenarios normativos convencionales, y debe considerarse como herramienta complementaria en procesos de diagnóstico estructural.

- En base a los resultados obtenidos, se establece, de acuerdo con la normativa ecuatoriana vigente, que no es posible definir directamente un diseño de conexión viga-columna sin un análisis estructural profundo que considere el estado actual del sistema resistente. Esto se debe a que es necesario verificar y, en muchos casos, reforzar previamente los elementos estructurales en función de la distribución y condición del acero existente en la edificación, especialmente en estructuras que presentan irregularidad en elevación, donde los cambios abruptos de rigidez generan concentraciones de esfuerzos y mecanismos de daño localizados. Tal intervención debe estar justificada mediante una memoria técnica que incluya ensayos destructivos y no destructivos para identificar con precisión la capacidad de los materiales y la integridad de las conexiones existentes.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda ejecutar inspecciones técnicas complementarias mediante ensayos no destructivos para identificar posibles daños internos acumulados en elementos estructurales, especialmente en las zonas donde se registraron derivas máximas y cuantías excesivas.
- La ausencia de planos estructurales limita la validación completa del refuerzo y distribución del acero, Por esa razón, la evaluación de cuantías se realizó exclusivamente mediante el contraste entre la cuantía mínima y máxima teórica admisible, sin poder analizar aspectos complementarios como la distribución y simetría del refuerzo longitudinal, la cantidad, diámetro y espaciamiento del estribado, la ubicación de refuerzo en zonas críticas, ni la relación entre la cuantía en vigas y columnas para asegurar el principio de "columna fuerte – viga débil". Por ello, se sugiere actualizar y digitalizar los planos estructurales del edificio, de

forma que se pueda llevar un control técnico del diseño original y de futuras intervenciones.

- Implementar un refuerzo estructural localizado en los niveles Mezanine y Planta Alta 1, enfocado en mejorar la continuidad vertical de columnas y la distribución de rigidez, con el objetivo de reducir la vulnerabilidad frente a futuros eventos sísmicos de mayor severidad. Además, cualquier propuesta de diseño o rehabilitación debe considerar análisis dinámicos no lineales y verificación de condiciones de anclaje, ductilidad y compatibilidad entre elementos nuevos y existentes.
- Ampliar el estudio con análisis de desempeño basado en deformaciones plásticas, que permitan simular con mayor fidelidad el comportamiento real de la estructura ante sismos de gran magnitud, considerando aspectos como acumulación de daño y redistribución de esfuerzos.

Bibliografía

- Alvarado Mamani, J. A., & Aguilar Chuquimia, H. A. (2023). Seismic response for a reinforced concrete residential building according to South American standards in the Pacific zone. *Revista Ingenieria de Construcción*, 38(1), 126–143. <https://doi.org/10.7764/RIC.00057.21>
- B U, J. G., & B V, R. (2022). Study of Seismic Response of Multi-Storied Vertical Irregular Building in Different Type of Soils. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 11(10). <https://doi.org/10.15680/ijirset.2022.1110028>
- Blasi, G., Scarlino, A. S., Chirivì, S., Perrone, D., & Aiello, M. A. (2024). Seismic response of irregular RC buildings designed for gravity and seismic loads. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22(10), 5231–5257. <https://doi.org/10.1007/s10518-024-01971-4>
- Burgan, H. I. (2021). Numerical modeling of structural irregularities on unsymmetrical buildings. *Tehnicki Vjesnik*, 28(3), 856–861. <https://doi.org/10.17559/TV-20200328103359>
- Cajamarca-Zuniga, D., Kabantsev, O. V., & Marin, C. (2022). Macroseismic intensity-based catalogue of earthquakes in Ecuador. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 18(2), 161–171. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-2-161-171>
- Camellia, N. K. (2021). Spectral modal modeling by FEM of reinforced concrete framed buildings irregular in elevation. In *International Review of Applied Sciences and Engineering* (Vol. 12, Issue 2, pp. 183–193). Akademiai Kiado ZRt. <https://doi.org/10.1556/1848.2021.00229>
- Carrillo, J., Arteta, C. A., & Vera, X. (2024). Post-earthquake safety assessment of schools after the 2016 Ecuador M7.8 earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 179, 108561. <https://doi.org/10.1016/J.SOILDYN.2024.108561>
- Cunalata, F., & Caiza, P. (2022). State of the Art of Seismic Vulnerability Studies in Ecuador. *Revista Politecnica*, 50(1), 55–64. <https://doi.org/10.33333/rp.vol50n1.06>

- Datta, D., & Gopal, A. L. N. (2022). Behaviour of Irregular Reinforced Concrete Frames under Seismic Loading. *ASPS Conference Proceedings*, 1(1), 941–951. <https://doi.org/10.38208/acp.v1.605>
- Diaferio, M., Foti, D., Giannoccaro, N. I., & Sabbà, M. F. (2022). Dynamic Identification on an Irregular Structure. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/app12073445>
- Gobierno de la ciudad de México. (2021). *NORMA TÉCNICA COMPLEMENTARIA PARA EL DISEÑO POR SISMO 1*.
- González, O. M. (2020). *DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA DEPARTAMENTO DE MATERIALES ÁREA DE ESTRUCTURAS COMPORTAMIENTO NO LINEAL DE MARCOS DE CONCRETO REFORZADO DISEÑADOS CON DIFERENTES CRITERIOS DE DUCTILIDAD (CUARTA ETAPA)*.
- Hadar Elmi, K., & Coskun, E. (2020). Comparative of Study the Design Spectra Defined by Various Seismic Codes. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 9(3), 722–728. www.ijert.org
- Huang, W., Hu, G., & Zhang, J. (2022). Experimental study on the seismic performance of new precast concrete beam-column joints with replaceable connection. *Structures*, 35, 856–872. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2021.11.050>
- Kabashi, N., Krasniqi, E., Muhaxheri, M., Latifi, F., & Murati, Y. (2023). *SEISMIC BEHAVIOUR OF BEAM-COLUMN JOINT IN R/C FRAMES AND STRENGTHENING WITH FRP*. 764–775. <https://doi.org/10.5592/co/2crocee.2023.81>
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2016). *Guía práctica para evaluación sísmica y rehabilitación de estructuras, de conformidad con la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 2015*.
- Morocho-Orellana, J. C., Inca-Balseca, C. L., Cornejo-Reyes, P. J., & Mena-Reinoso, Á. P. (2022). Sísmic vulnerability in educational buildings of Ecuador evaluated through mathematical models of dynamic analysis Vulnerabilidade sísmica em edifícios educacionais equatorianos avaliada por modelos matemáticos de análise

- dinâmica Ciências Técnicas y Aplicadas Artículo de Revisión. *Polo Del Conocimiento*, 7, 2073–2092. <https://doi.org/10.23857/pc.v7i4.3937>
- Nady, O., Mahfouz, S. Y., & Taher, S. E. D. F. (2022). Quantification of Vertical Irregularities for Earthquake Resistant Reinforced Concrete Buildings. *Buildings*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/buildings12081160>
- Quizanga-Martínez, D. M., Viera-Arroba, L. P., & Andino-Carranco, J. L. (2020). *ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL DE EDIFICIOS APORTICADOS DE HORMIGÓN ARMADO APLICANDO NORMATIVA ECUATORIANA, COLOMBIANA Y PERUANA*. <https://orcid.org/0000-0003-0434-7979>
- Raagavi, M. T., & Sidhardhan, S. (2021). A Study on Seismic Performance of Various Irregular Structures. In *International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES) ISSN* (Vol. 9). www.ijres.org
- Santos, D., Melo, J., & Varum, H. (2024). Code Requirements for the Seismic Design of Irregular Elevation RC Structures. *Buildings*, 14(5), 1351. <https://doi.org/10.3390/buildings14051351>
- Tzounas, G., Dassios, I., & Milano, F. (2020). Modal Participation Factors of Algebraic Variables. *IEEE Transactions on Power Systems*, 35(1), 742–750. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2931965>
- Villafuerte-Lujano, I., & Fernández-Dávila, V. (2024). Respuesta sísmica de edificios de 8 niveles de concreto armado con irregularidad en planta. *Universidad de Costa Rica*, 34, 21–37. <https://doi.org/10.15517/ri.v34i2.56413>
- Waśniewski, T., & Kołodziejczyk, E. (2020). Ductility and internal forces redistribution in lightweight aggregate concrete beams. *Budownictwo i Architektura*, 19(4), 095–108. <https://doi.org/10.35784/bud-arch.2124>
- Xiao, S., & Fomin, N. I. (2024). Development and systematic review of connection techniques for RC Precast structural elements: Beam and Column Connection. In *Heliyon* (Vol. 10, Issue 16). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35886>

- Yang, Z. (2023). Behavior and design of earthquake resistant concrete structure. *Applied and Computational Engineering*, 3(1), 16–21. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/3/20230309>
- Zameeruddin, M., & Sangle, K. K. (2021). Performance-based Seismic Assessment of Reinforced Concrete Moment Resisting Frame. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 33(3), 153–165. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.04.005>
- Zhang, Y., Ma, W., Li, X., & Li, K. (2022). Experimental Research on Seismic Behavior of Haunched Concrete Beam–Column Joint Based on the Bolt Connection. *Sustainability (Switzerland)*, 14(23). <https://doi.org/10.3390/su142315644>
- Zhang, Z., & Zhang, J. (2023). Design And Analysis of Energy Dissipation and Vibration Reduction of Reinforced Concrete Frame Structure. In *Highlights in Science, Engineering and Technology ICMCE* (Vol. 2023). <https://doi.org/https://doi.org/10.54097/hset.v51i.8233>

ANEXO

Anexo 1. Medición de columnas en planta baja



Fuente: Elaboración propia

Anexo 2. Medición de altura de piso en la fachada



Fuente: Elaboración propia

Anexo 3. Medición de distancia entre columnas circulares



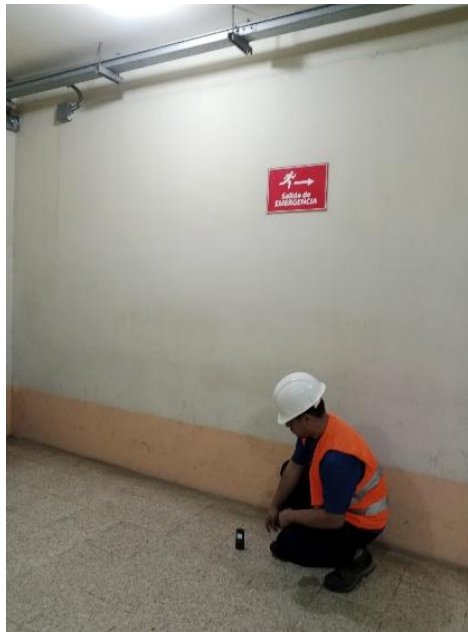
Fuente: Elaboración propia

Anexo 4. Medición de altura de columnas circulares



Fuente: Elaboración propia

Anexo 5. Medición de altura de piso en el mezanine



Fuente: Elaboración propia

Anexo 6. Medición de altura de piso en la 2da planta alta



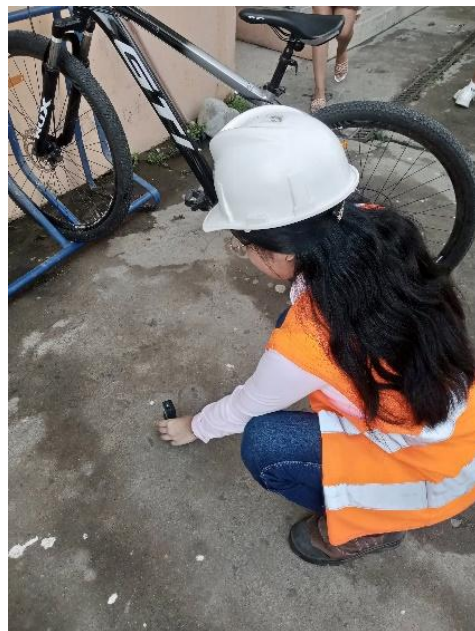
Fuente: Elaboración propia

Anexo 7. Medición de vigas peraltadas



Fuente: Elaboración propia

Anexo 8. Medición de vigas inclinadas en voladizo



Fuente: Elaboración propia

Anexo 9. Medición de fachada



Fuente: Elaboración propia

Anexo 10. Cubierta de edificación



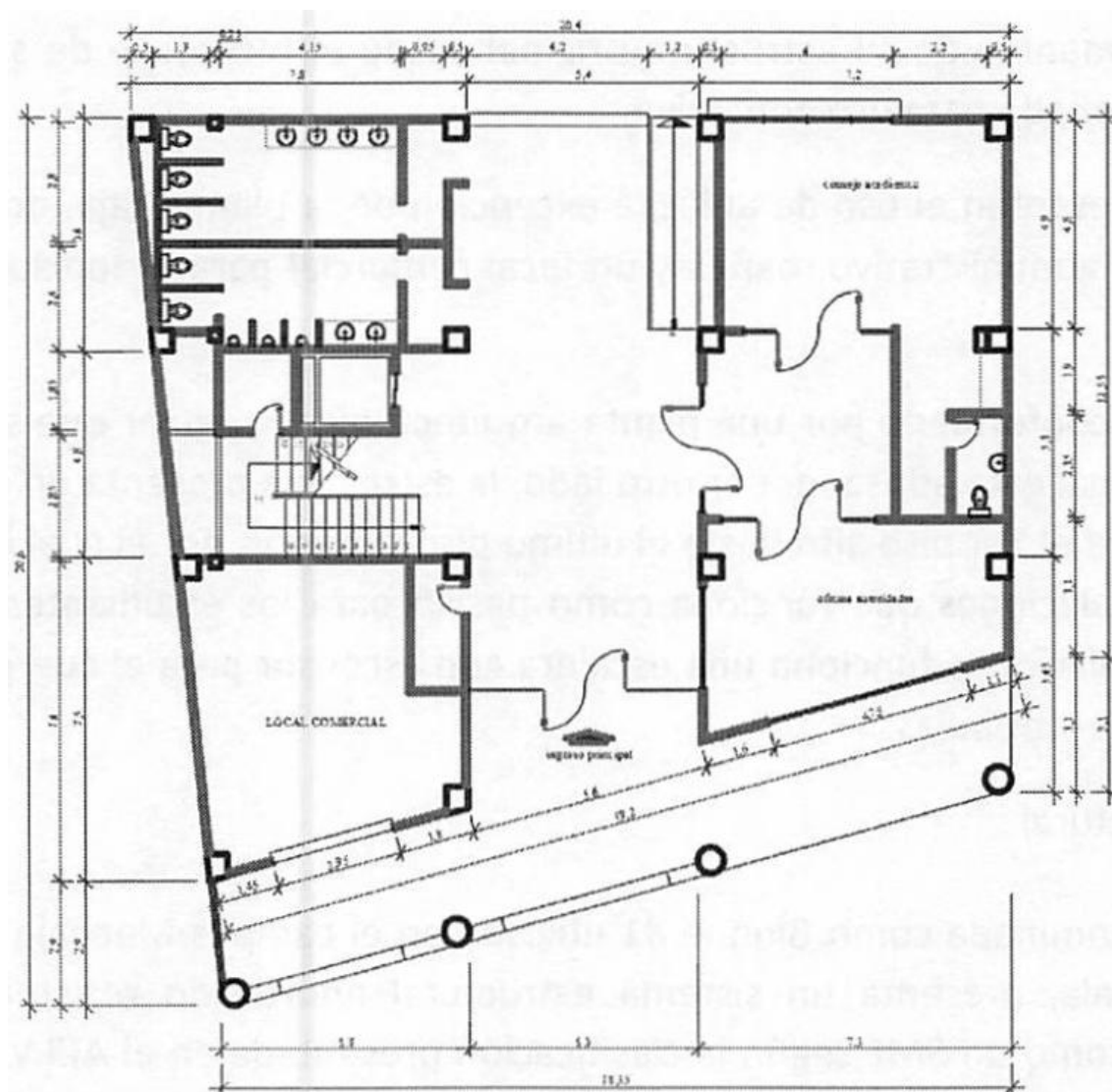
Fuente: Elaboración propia

Anexo 11. Verificación de medidas de la edificación



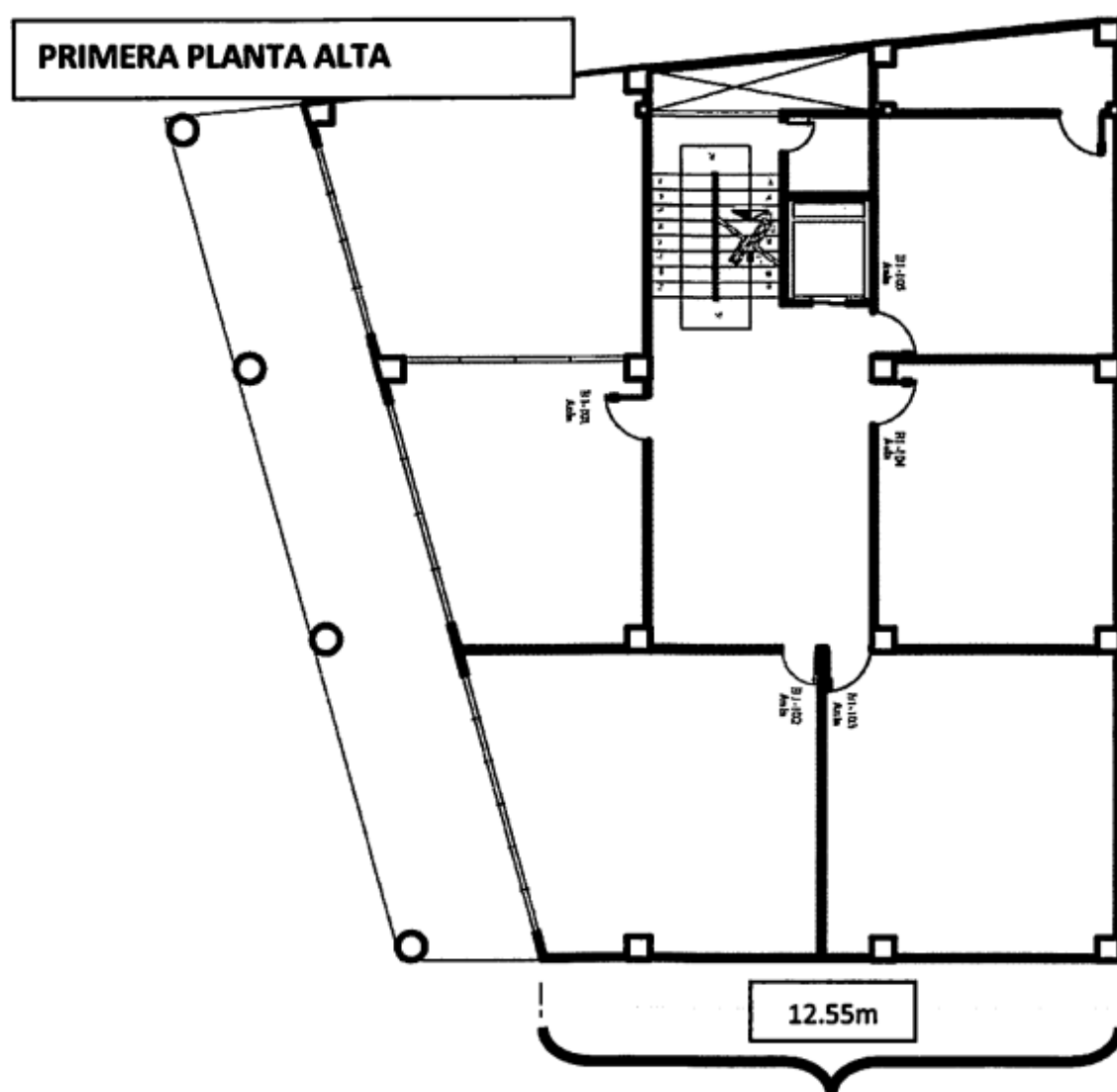
Fuente: Elaboración propia

Anexo 12. Distribución de planta arquitectónica



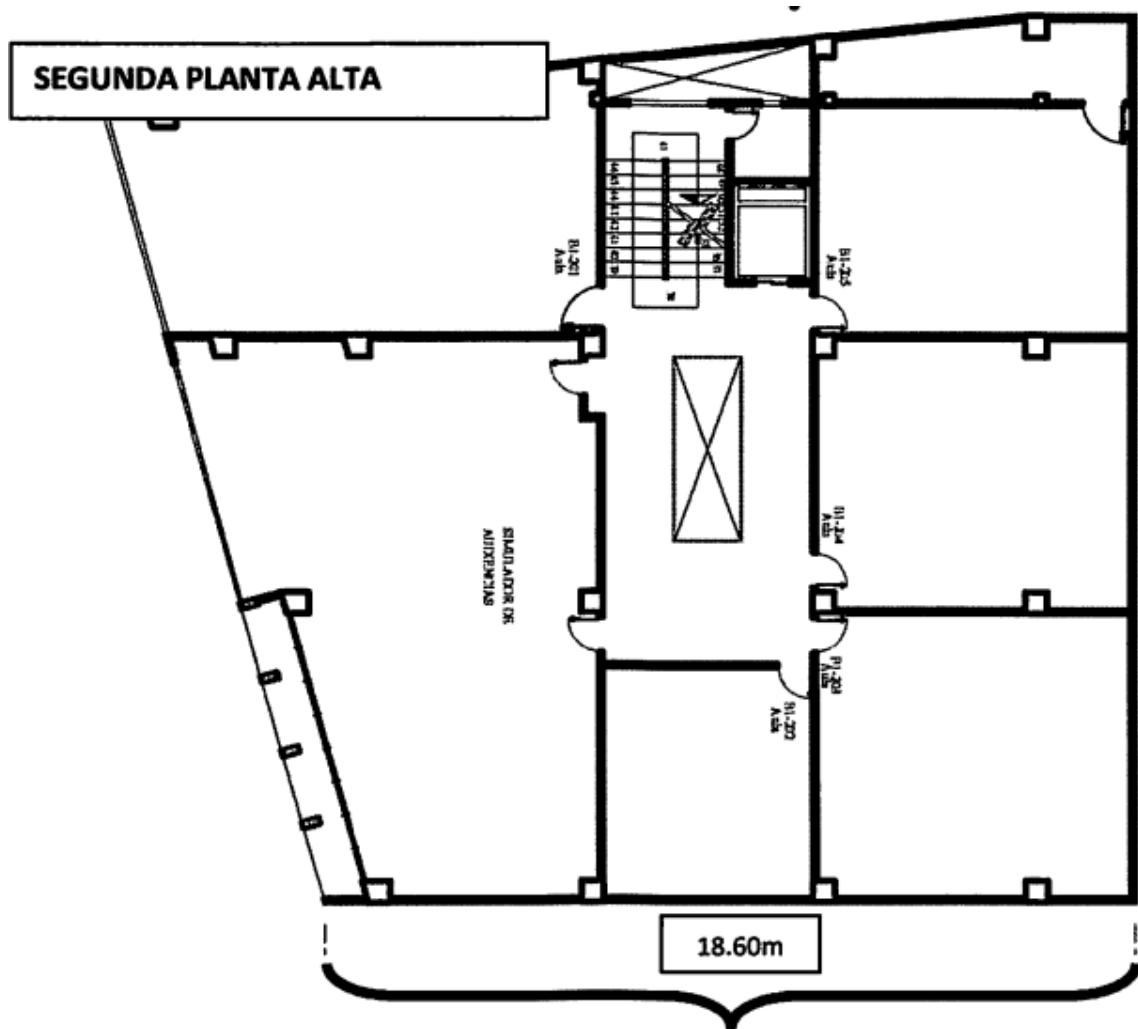
Fuente: Informe municipal del edificio

Ilustración 28. Plano arquitectónico de primera planta alta



Fuente: Informe municipal del edificio

Ilustración 29. Plano arquitectónico de segunda planta alta



Fuente: Informe municipal del edificio

Anexo 13. Cuantías mínima y máxima de viga

Cuantías mínimas y máximas:

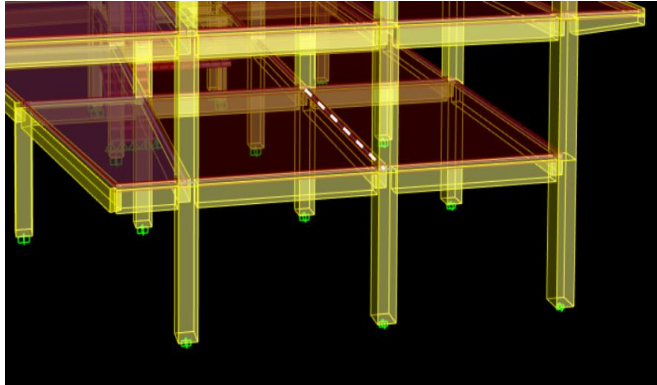
$$\rho_{min} = \frac{\sqrt{f'c}}{4 * f_y} = \frac{\sqrt{24}}{4 * 420} = 0.0029 = 0.29\%$$

$$\rho_{max} = 0.5(0.51 * B1 * \frac{f'c}{f_y}) = 0.5 * (0.51 * 0.85 * \frac{24}{420}) = 0.0124 = 1.24\%$$

Fuente: Elaboración propia

Anexo 14. Cálculo de viga más solicitada en dirección X con sismo de diseño

DATOS		
Ton-m	Mu Sap2000	16,51
cm	h	50
cm	b	30
kg/cm ²	f'c	240
kg/cm ²	fy	4200
cm	d	42,5
adimensional	Ø	0,9



As	11,31	cm ²
-----------	-------	-----------------

a	7,762	cm
----------	-------	----

ρ	0,0089	
ρ	0,89	%
Cumple ρ < 1%		

ρmin	0,0029	0,29	%
ρmax	0,0124	1,24	%

FORMULAS

$$As = \frac{Mu}{\phi * fy * (d - \frac{a}{2})}$$

$$a = \frac{As * fy}{0,85 * f'c * b}$$

$$\rho = \frac{As}{b * d} < 1\%$$

Procedimiento:

$$As = \frac{16.51 \text{ Ton} - m * 10^5}{0.9 * 4200 \frac{kg}{cm^2} * (42.5cm - \frac{a}{2})}$$

$$a = \frac{As * 4200 \frac{kg}{cm^2}}{0,85 * 240 \frac{kg}{cm^2} * 30cm}$$

Despeje:

$$As = \frac{16.51 \text{ Ton} - m * 10^5}{0.9 * 4200 \frac{kg}{cm^2} * (42.5cm - \frac{As * 4200 \frac{kg}{cm^2}}{0,85 * 240 \frac{kg}{cm^2} * 30cm} - \frac{a}{2})}$$

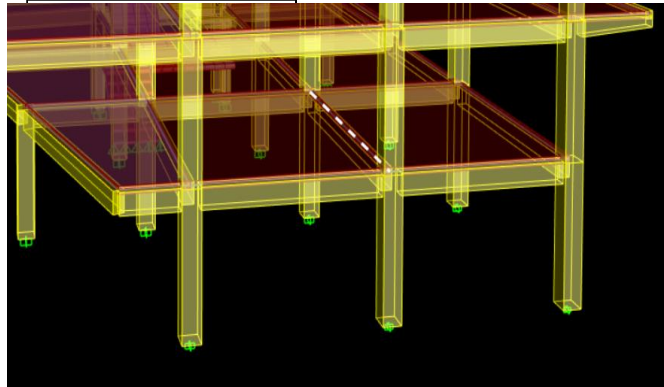
$$As = 11.31 \text{ cm}^2$$

$$\rho = \frac{As}{b * d} = \frac{11.31 \text{ cm}^2}{30cm * 42.5cm} = 0.0089 = \mathbf{0.89\%}$$

Fuente: Elaboración propia

Anexo 15. Cálculo de viga más solicitada en dirección X con sismo de respuesta

DATOS		
Ton-m	Mu Sap2000	26,02
cm	h	50
cm	b	30
kg/cm ²	f'c	240
kg/cm ²	fy	4200
cm	d	42,5
adimensional	Ø	1



As	16,88	cm ²
-----------	-------	-----------------

a	11,584	cm
----------	--------	----

ρ	0,0132	
ρ	1,32	%
No Cumple ρ < 1%		

ρmin	0,0029	0,29	%
ρmax	0,0124	1,24	%

FORMULAS

$$As = \frac{Mu}{\phi * fy * (d - \frac{a}{2})}$$

$$a = \frac{As * fy}{0,85 * f'c * b}$$

$$\rho = \frac{As}{b * d} < 1\%$$

$$d = 0,85 * h$$

Procedimiento:

$$As = \frac{26.02 \text{ Ton} - m * 10^5}{1 * 4200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * (42.5 \text{ cm} - \frac{a}{2})}$$

$$a = \frac{As * 4200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{0,85 * 240 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * 30 \text{ cm}}$$

Despeje:

$$As = \frac{26.02 \text{ Ton} - m * 10^5}{1 * 4200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * (42.5 \text{ cm} - \frac{0,85 * 240 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * 30 \text{ cm}}{2})}$$

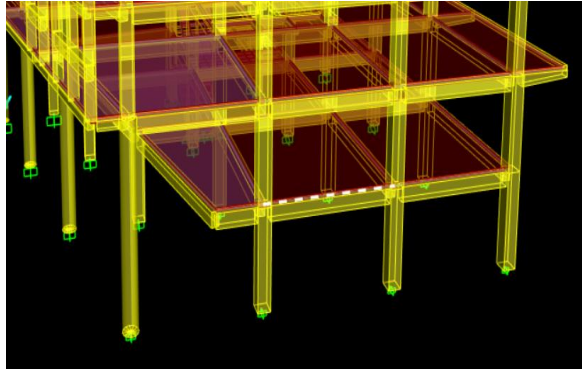
$$As = 16.88 \text{ cm}^2$$

$$\rho = \frac{As}{b * d} = \frac{16.88 \text{ cm}^2}{30 \text{ cm} * 42.5 \text{ cm}} = 0.0132 = \mathbf{1.32\%}$$

Fuente: Elaboración propia

Anexo 16. Cálculo de viga más solicitada en dirección Y con sismo de diseño

DATOS		
Ton-m	Mu Sap2000	16,34
cm	h	50
cm	b	30
kg/cm ²	f'c	240
kg/cm ²	fy	4200
cm	d	42,5
adimensional	Ø	0,9



As	11,18	cm ²
-----------	-------	-----------------

a	7,673	cm
----------	-------	----

ρ	0,0088	
ρ	0,88	%
Cumple ρ < 1%		

ρmin	0,0029	0,29	%
ρmax	0,0124	1,24	%

FORMULAS

$$As = \frac{Mu}{\phi * fy * (d - \frac{a}{2})}$$

$$a = \frac{As * fy}{0,85 * f'c * b}$$

$$\rho = \frac{As}{b * d} < 1\%$$

$$d = 0,85 * h$$

Procedimiento:

$$As = \frac{16.34Ton - m * 10^5}{0.9 * 4200 \frac{kg}{cm^2} * (42.5cm - \frac{a}{2})}$$

$$a = \frac{As * 4200 \frac{kg}{cm^2}}{0,85 * 240 \frac{kg}{cm^2} * 30cm}$$

Despeje:

$$As = \frac{16.34Ton - m * 10^5}{0.9 * 4200 \frac{kg}{cm^2} * (42.5cm - \frac{As * 4200 \frac{kg}{cm^2}}{0,85 * 240 \frac{kg}{cm^2} * 30cm} * \frac{1}{2})}$$

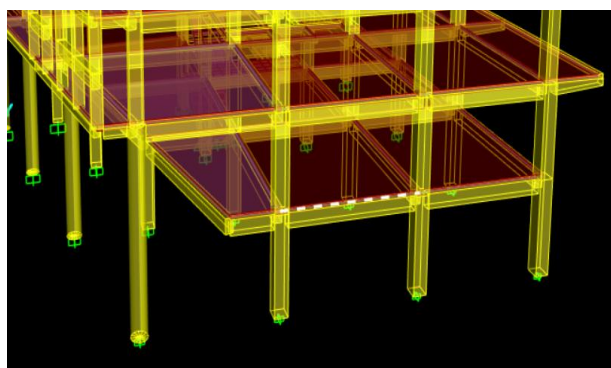
$$As = 11.18 cm^2$$

$$\rho = \frac{As}{b * d} = \frac{11.18 cm^2}{30cm * 42.5cm} = 0.0088 = \mathbf{0.88\%}$$

Fuente: Elaboración propia

Anexo 17. Cálculo de viga más solicitada en dirección Y con sismo de respuesta

DATOS		
Ton-m	Mu Sap2000	32,68
cm	h	50
cm	b	30
kg/cm ²	f'c	240
kg/cm ²	fy	4200
cm	d	42,5
adimensional	Ø	1



As	22,34	cm ²
-----------	-------	-----------------

a	15,331	cm
----------	--------	----

ρ	0,0175	
ρ	1,75	%
No Cumple ρ < 1%		

ρmin	0,0029	0,29	%
ρmax	0,0124	1,24	%

FORMULAS

$$As = \frac{Mu}{\phi * fy * (d - \frac{a}{2})}$$

$$a = \frac{As * fy}{0,85 * f'c * b}$$

$$\rho = \frac{As}{b * d} < 1\%$$

$$d = 0,85 * h$$

Procedimiento:

$$As = \frac{32.68 \text{ Ton} - m * 10^5}{1 * 4200 \frac{kg}{cm^2} * (42.5 \text{ cm} - \frac{a}{2})}$$

$$a = \frac{As * 4200 \frac{kg}{cm^2}}{0,85 * 240 \frac{kg}{cm^2} * 30 \text{ cm}}$$

Despeje:

$$As = \frac{32.68 \text{ Ton} - m * 10^5}{1 * 4200 \frac{kg}{cm^2} * (42.5 \text{ cm} - \frac{\frac{As * 4200 \frac{kg}{cm^2}}{0,85 * 240 \frac{kg}{cm^2} * 30 \text{ cm}}}{2})}$$

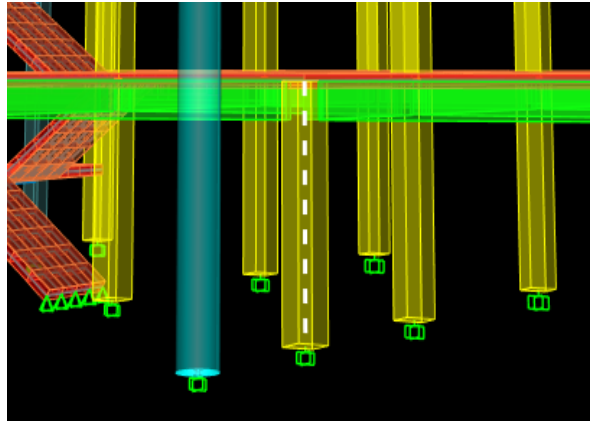
$$As = 22.34 \text{ cm}^2$$

$$\rho = \frac{As}{b * d} = \frac{22.34 \text{ cm}^2}{30 \text{ cm} * 42.5 \text{ cm}} = 0.0175 = \mathbf{1.75\%}$$

Fuente: Elaboración propia

Anexo 18. Cálculo de columna más solicitada con sismo de diseño

DATOS		
Ton-m	Mu Sap2000	41,69
cm	H	50
cm	b	50
kg/cm ²	f'c	240
kg/cm ²	fy	4200
cm	d	42,5
adimensional	Ø	0,9



As	30,439	cm ²
-----------	--------	-----------------

a	12,534	cm
----------	--------	----

ρ	0,0122	
ρ	1,22	%
Cumple 1% < ρ < 3%		

FORMULAS

$$As = \frac{Mu}{\phi * fy * (d - \frac{a}{2})}$$

$$a = \frac{As * fy}{0,85 * f'c * b}$$

$$\rho = 1\% < \frac{As}{b * H} < 3\%$$

$$d = 0,85 * H$$

Procedimiento:

$$As = \frac{41.69 \text{ Ton} - m * 10^5}{0.9 * 4200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * (42.5 \text{ cm} - \frac{a}{2})}$$

$$a = \frac{As * 4200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{0,85 * 240 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * 50 \text{ cm}}$$

Despeje:

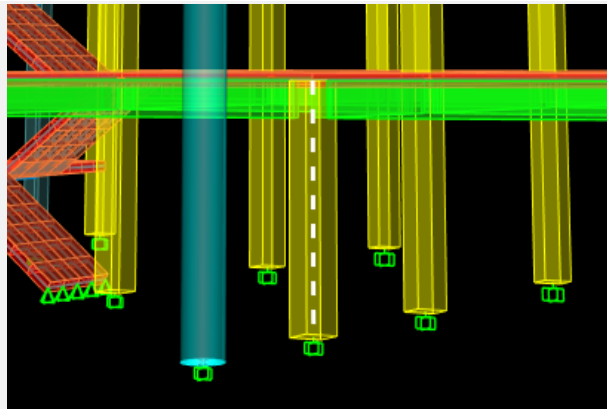
$$As = \frac{41.69 \text{ Ton} - m * 10^5}{0.9 * 4200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * (42.5 \text{ cm} - \frac{As * 4200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{0,85 * 240 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * 50 \text{ cm} * 2})}$$

$$As = 30.439 \text{ cm}^2$$

$$\rho = \frac{As}{b * h} = \frac{30.439 \text{ cm}^2}{50 \text{ cm} * 50 \text{ cm}} = 0.0122 = 1.22\%$$

Fuente: Elaboración propia

DATOS		
Ton-m	Mu Sap2000	73,477
cm	H	50
cm	b	50
kg/cm ²	f'c	240
kg/cm ²	fy	4200
cm	d	42,5
adimensional	Ø	1



As	56,783	cm ²
-----------	--------	-----------------

a	23,381	cm
----------	--------	----

ρ	0,0227	
ρ	2,27	%
Cumple 1% < ρ > 3%		

FORMULAS

$$As = \frac{Mu}{\phi * fy * (d - \frac{a}{2})}$$

$$a = \frac{As * fy}{0,85 * f'c * b}$$

$$\rho = \frac{As}{b * H} < 1\%$$

$$d = 0,85 * h$$

Procedimiento:

$$As = \frac{73.477 - m * 10^5}{1 * 4200 \frac{kg}{cm^2} * (42.5cm - \frac{a}{2})}$$

$$a = \frac{As * 4200 \frac{kg}{cm^2}}{0,85 * 240 \frac{kg}{cm^2} * 50cm}$$

Despeje:

$$As = \frac{73.477Ton - m * 10^5}{1 * 4200 \frac{kg}{cm^2} * (42.5cm - \frac{As * 4200 \frac{kg}{cm^2}}{0,85 * 240 \frac{kg}{cm^2} * 50cm})}$$

$$As = 56.783 \text{ cm}^2$$

$$\rho = \frac{As}{b * h} = \frac{56.783 \text{ cm}^2}{50cm * 50cm} = 0.0227 = \mathbf{2.27\%}$$

Fuente: Elaboración propia