

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Análisis de los factores de irregularidad de la NEC, mediante comparación de respuesta
dinámica entre edificios regulares e irregulares.**

Edgar Fausto Millingalli Vega

Ingeniería Civil

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de INGENIERO CIVIL

Quito, 23 de mayo de 2024

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**Análisis de los factores de irregularidad de la NEC, mediante comparación de respuesta
dinámica entre edificios regulares e irregulares.**

Edgar Fausto Millingalli Vega

Nombre del profesor, Título académico

Fabrizio Yépez, PhD

Quito, 23 de mayo de 2024

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Edgar Fausto Millingalli Vega

Código: 00135339

Cédula de identidad: 0503968091

Lugar y fecha: Quito, 23 de mayo de 2024

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>

DEDICATORIA

Esta meta alcanzada va dedicada a mi familia, en especial a mis padres, quienes apostaron por mi educación. Quiero expresar mi agradecimiento a mis hermanos, quienes estuvieron siempre a mi lado, y que fueron mi guía a lo largo de mi trayectoria como estudiante de ingeniería civil.

Quiero expresar mi gratitud a mis amigos por haber creído en mí y por haber compartido una de las experiencias más enriquecedoras que he vivido durante mi carrera universitaria. Asimismo, a todas las personas maravillosas que conocí durante el intercambio cultural.

RESUMEN

Para la estructura irregular objeto de análisis, se constata que el coeficiente de penalización de 0.9, en total 0.81, por irregularidad de La Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-DS 2015) no es adecuado. Esto se evidencia al compararla con la misma estructura, pero tratada como si fuera regular, con los mismos elementos estructurales incluyendo la misma cantidad del peso propio. El coeficiente de penalización propuesto por la NEC-SE-DS no corresponde al comportamiento real de la estructura irregular en análisis. Al comparar la respuesta dinámica de la estructura regular e irregular, incluyendo las diferencias porcentuales en las derivas, fuerzas laterales, esfuerzo cortante, momento flector y rigidez de los pisos bajo carga sísmica de diseño, se encontró un coeficiente de irregularidad promedio de 0.71, que discrepa del valor de 0.81 sugerido por NEC-SE-DS.

Aunque esta discrepancia podría atribuirse a la diferencia de masas entre las estructuras, las variables comparadas dependen del coeficiente sísmico (donde influye el coeficiente de irregularidad) y de la carga sísmica, que se obtiene a partir de la carga muerta de la estructura. Al equiparar las masas de ambas estructuras, la única variable independiente en el cortante basal es el coeficiente de irregularidad, utilizado para determinar la respuesta dinámica de las estructuras. Por lo tanto, es razonable inferir que esta diferencia se debe a la irregularidad de la estructura, dado que todos los demás parámetros en el cortante basal son iguales. Cabe resaltar que la estructura irregular en estudio presenta discontinuidades geométricas significativas y, aun así, solo entra en dos categorías de irregularidad según la NEC-SE-DS, lo que sugiere que los factores de irregularidad son simplemente disuasorios para evitar construcciones irregulares.

ABSTRACT

It has been confirmed that the penalty coefficient of 0.9, a total of 0.81, for irregularity of La Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-DS 2015) is not appropriate for the irregular structure under analysis. This is evident when comparing it with the same structure treated as if it were regular, with the same structural elements including the same amount of self-weight. The penalty coefficient proposed by the NEC-SE-DS does not correspond to the real behavior of the irregular structure under analysis. When comparing the dynamic response of the regular and irregular structure, including the percentage differences in drifts, lateral forces, shear stress, bending moment, and stiffness of the floors under design seismic loading, an irregularity coefficient of 0.71 was found, which disagrees with the value of 0.81 suggested by NEC-SE-DS.

Although this discrepancy could be attributed to the difference in masses between the structures, the variables compared depend on the seismic coefficient (where the irregularity coefficient influences) and the seismic load, which is obtained from the dead load of the structure. By equating the masses of both structures, the only independent variable in the basal shear is the irregularity coefficient, used to determine the dynamic response of the structures. Therefore, it is reasonable to infer that this difference is due to the irregularity of the structure, given that all other parameters in the basal shear are the same. It should be noted that the irregular structure under study presents significant geometric discontinuities and, even so, it only falls into two categories of irregularity according to the NEC-SE-DS, which suggests that the irregularity factors are simply deterrents to avoid irregular constructions.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	16
OBJETIVOS	17
Objetivo general	17
Objetivo específico.....	17
ANTECEDENTES	18
Origen de terremotos en Ecuador.....	18
Evento sísmico de Pedernales	19
El espectro de respuesta sísmica	19
Espectro combinado desplazamiento, velocidad y aceleración	20
Espectro de diseño elástico	21
Diseño basado en fuerzas DBF	21
Estructura irregular.....	21
La irregularidad en estructuras según la NEC 2015.....	23
Distribución de vertical de fuerzas laterales	23
Excentricidad y torsión accidental	24
DESARROLLO	25
Carga viva, permanente y muerta.....	25
Definición de cargas en ETABS	26
Definición de vigas, columnas, muros y losa en ETABS	26
Elementos estructurales utilizada en el edificio irregular	27
Inercia de las secciones agrietados.....	28
La carga muerta sobre la estructura regular e irregular.....	30
Modelo en ETABS de la estructura regular e irregular.....	32
Definición de diafragma rígido	33
Centro de masas y rigideces	35
Irregularidad del edificio según la norma NEC 15	36
Irregularidad en planta	36

Tipo 3. Discontinuidad en el sistema de piso.	36
Tipo 4. Ejes estructurales no paralelas.	37
Irregularidad en elevación.....	39
Tipo 1. Piso flexible.....	39
Tipo 2. Distribución de masa.....	40
Tipo 3. Irregularidad geométrica.	42
Coefficiente de regularidad en planta $\emptyset P$ para la estructura irregular	43
Coefficiente de regularidad en elevación $\emptyset E$ para la estructura irregular.....	44
Coefficiente de regularidad en planta $\emptyset P$ para la estructura regular.....	44
Coefficiente de regularidad en elevación $\emptyset E$ para la estructura irregular.....	44
Periodo de vibración de la estructura	45
Por método 1.....	45
Zonificación sísmica y factor de zona Z	46
Tipos de perfiles de suelos para el diseño sísmico para el edificio regular e irregular	46
Coefficientes de perfiles de suelo F_a , F_d , F_s	47
F_a : Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de periodo corto.	47
F_d : amplificación de las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca.	47
F_s : comportamiento no lineal de los suelos.....	48
Espectro elástico horizontal de diseño en aceleraciones.....	48
Cálculo estático según la NEC 2015, definición de fuerza sísmica.....	49
El efecto de las masas sísmicas en el cálculo.....	49
Coefficiente sísmico	50
Cortante basal.....	50
Análisis estático para estructura irregular en eje x	51
Distribución de vertical de fuerzas laterales en análisis estático de la estructura	52
Análisis estático para estructura regular en eje x	53
Análisis dinámico.....	54
Distribución de vertical de fuerzas laterales en análisis dinámico.....	56

Ajuste de cote basal de los resultados obtenidos por el análisis dinámico en estructura irregular	57
Ajuste de cote basal de los resultados obtenidos por el análisis dinámico en estructura regular.....	58
Se reduce el peso propio de la estructura regular por un factor	59
RESULTADOS.....	61
Periodo y frecuencia de la infraestructura regular e irregular	61
La demanda de esfuerzo de cortante y flexión en los elementos estructurales (muros y columnas) debido al sismo en eje x.....	65
Esfuerzo de cortante y el momento flector en la estructura regular	65
Esfuerzo de cortante y el momento flector en las columnas debido al sismo en eje x	69
CONCLUSIÓN.....	72
REFERENCIA.....	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de carga viga. Según la NEC 15	25
Tabla 2. Valores de carga en la cubierta. Según la NEC 15	26
Tabla 3. Losa aliviada	27
Tabla 4. La carga muerta para pisos inferiores sobre la estructura regular e irregular	31
Tabla 5. La carga muerta para la cubierta sobre la estructura regular e irregular	31
Tabla 6. centro de masa y rigidez para la estructura irregular	35
Tabla 7. centro de masa y rigidez para la estructura regular	35
Tabla 8. Irregularidad del edificio. Tipo 3. Discontinuidad en el sistema de piso	37
Tabla 9. Irregularidad del edificio. Tipo 4. Ejes estructurales no paralelos	38
Tabla 10. Verificación de irregularidad de la estructura por rigideces. Edificio Irregular	40
Tabla 11. Verificación de irregularidad de la estructura por rigideces. Edificio Regular	40
Tabla 12. Irregularidad en elevación. Tipo 2: distribución de masa. Edificio Irregular	41
Tabla 13. Irregularidad en elevación. Tipo 2: distribución de masa. Edificio Regular	41
Tabla 14. Irregularidad en elevación. Tipo 4. Irregularidad geométrica	42
Tabla 15. Coeficiente según el tipo de edificio. (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)	45
Tabla 16. Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada. (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)	46
Tabla 17. Tipo de suelo y Factores de sitio F_a	47
Tabla 18. Tipo de suelo y Factores de sitio F_d	48
Tabla 19. Tipo de suelo y Factores del comportamiento inelástico del subsuelo F_s	48
Tabla 20. Carga sísmica para estructura irregular	52
Tabla 21. Distribución de vertical de fuerzas laterales en análisis estático. Estructura irregular	53
Tabla 22. Carga sísmica para la estructura regular	54
Tabla 23. Fuerza lateral en estructurar irregular. Análisis dinámico	56
Tabla 24. Fuerza lateral en estructurar irregular. Análisis dinámico	57
Tabla 25. Se reduce el peso propio de la estructura con el factor de reducción	59
Tabla 26. Peso propio de vigas y columnas de la estructura regular e irregular	60
Tabla 27. La magnitud igual del peso propio de la estructura regular e irregular	60
Tabla 28. Periodo y frecuencia de la infraestructura regular e irregular.	62
Tabla 29. La razón entre la rigidez de la estructura regular e irregular	63

Tabla 30. Fuerzas laterales en estructura regular e irregular	63
Tabla 31. Deriva inelástica entrepisos en estructura regular e irregular.....	65
Tabla 32. Muestra la magnitud de cortante y momento flector en muros para el sismo en x .	69
Tabla 33.Muestra la magnitud de cortante y momento flector en columnas para el sismo en x	70
Tabla 34. Cuadro de resumen de valores hallados por la comparación de respuesta dinámica de estructura regular e irregular	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Marco geodinámico del Ecuador.....	18
Figura 2. Interfaz del software Degtra	20
Figura 3. Edificio Irregular. Centro Internacional de Estudios Superiores de Comunicación para América Latina.....	22
Figura 4. Excentricidad entre la masa y rigidez.....	23
Figura 5. Distribución de vertical de fuerzas laterales y las derivas del piso	24
Figura 6. Losa alivianada con casetones.....	27
Figura 7. La dimensión típica de la viga utilizada en el edificio	28
Figura 8. Secciones agrietadas de vigas en ETABS	28
Figura 9. La dimensión geométrica de la columna. Piso 3 a Piso 10	29
Figura 10. La dimensión geométrica de la columna. Planta Baja a Piso 3	29
Figura 11. Secciones agrietadas de columnas en ETABS	29
Figura 12. La dimensión geométrica del muro estructural	30
Figura 13. Definición de cargas para el piso 1 a 9 en ETABS	31
Figura 14. Definición de cargas para de cubierta en ETABS	31
Figura 15. Modelo de estructura irregular en software ETABS. Vista en 3D.....	32
Figura 16. Modelo de estructura regular en software ETABS. Vista en 3D	32
Figura 17. Modelo de estructura irregular en software ETABS. Vista en planta	33
Figura 18. Modelo de estructura regular en software ETABS. Vista en planta.....	33
Figura 19. Asignación de losa como diafragma rígido en todos los entrepisos. Extraído: Software ETABS	34
Figura 20. Asignación de losa como diafragma rígido en todos los entrepisos para una estructura Regular. Extraído: Software ETABS	34
Figura 21. Irregularidad en planta. Tipo 3. Discontinuidad en el sistema de piso (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)	36
Figura 22. Análisis de irregularidad del edificio. Tipo 3. Discontinuidad en el sistema de piso	36
Figura 23. Análisis de irregularidad del edificio. Tipo 3. Discontinuidad en el sistema de piso	37
Figura 24. Irregularidad en planta. Tipo 3. Ejes estructurales no paralelas.....	38
Figura 25. Análisis de irregularidad del edificio. Tipo 4. Ejes estructurales no paralelas.....	38

Figura 26. Irregularidad en elevación. Tipo1: Piso flexible	39
Figura 27. Irregularidad en elevación. Tipo 2: Distribución de masa	41
Figura 28. Análisis de irregularidad del edificio en elevación, Planta Baja. Tipo 4. Irregularidad geométrica	42
Figura 29. Análisis de irregularidad del edificio en elevación, Piso 10. Tipo 4. Irregularidad geométrica	43
Figura 30. Irregularidad en elevación. Tipo 4. Irregularidad geométrica	43
Figura 31. Definición de la masa sísmica en ETABS.....	50
Figura 32. Se define el coeficiente sísmico para la estructura irregular en el eje x positivo y el 5 % de la excentricidad accidental.....	51
Figura 33. Se define el coeficiente sísmico para la estructura irregular en el eje x negativo y el 5 % de la excentricidad accidental.....	51
Figura 34. Espectro elástico horizontal de diseño en aceleraciones	54
Figura 35. Espectro de diseño en ETABS para la estructura irregular	55
Figura 36. Espectro de diseño en ETABS en eje x, y para la estructura irregular.....	56
Figura 37. Análisis dinámico de estructura irregular. Se multiplica la gravedad por el factor de 2.117.....	58
Figura 38. Análisis dinámico de estructura regular. Se multiplica la gravedad por el factor de 1.94.....	59
Figura 39. Fuerza lateral en estructura irregular en x, y	64
Figura 40. Fuerza lateral en estructura regular x, y	64
Figura 41. Vista en planta de estructura regular del eje 3-3	65
Figura 42. La demanda de momentos por la acción del sismo en estructura regular en el eje 3- 3.....	66
Figura 43. La demanda de cortante por la acción del sismo en estructura regular en el eje 3-3.	66
Figura 44. Demanda de cortante en los muros en el eje 3-3 en estructura regular debido al sismo.	66
Figura 45. Demanda de momento en los muros en el eje 3-3 en estructura regular debido al sismo.	67
Figura 46. Vista en planta de estructura irregular del eje 3-3.....	67
Figura 47. Demanda de momento en los muros en el eje 3-3 en estructura irregular debido al sismo.	68

Figura 48. Eje de análisis para encontrar el cortante y el momento en las columnas. Estructura regular, piso 6.....	69
Figura 49. Eje de análisis para encontrar el cortante y el momento en las columnas. Estructura irregular, piso 6.....	70

INTRODUCCIÓN

Cuando ocurre un desastre natural, como fue el caso del terremoto de Ecuador del 16 de abril de 2016, estos eventos dejan daños precedentes en edificaciones, pérdidas de vidas humanas, y los sectores productivos del país, según (Bello, Benítez, & Molina, 2017) “El costo de afectación del terremoto al sector productivo fue de US \$675.5 millones (...) con la afectación al sector productivo informal. Esto dio un valor de US \$1032 millones”. En total, las pérdidas en todos los sectores fueron más de 3000 millones de dólares americanos. Si bien es cierto que no se puede hallar la fecha exacta de cuando ocurrirá el próximo evento sísmico, se puede mitigar o disminuir los daños en infraestructuras. En tanto, los códigos de construcción como la Norma Ecuatoriana de Construcción (NEC-SE-DS) tienen como finalidad de reducir el peligro sísmico para el país.

En el presente trabajo se enfoca en la sección de coeficientes de irregularidad de la NEC con el objetivo de comprobar que estos parámetros mencionados en la norma representan la realidad del comportamiento de la estructura. De hecho, (Medina & Medina, 2017) menciona que en la discontinuidad de planta tipo 2 de la NEC-SE-DS no toma en consideración los límites permisibles para el porcentaje aberturas, entrantes o huecos, más bien se aplica el mismo coeficiente para todos los casos, y se repite el mismo patrón para el coeficiente de irregularidad por torsión. Además, de esta ambigüedad de criterios para aplicar los coeficientes de penalización, la norma Ecuatoriana NEC-SE-DS es una adopción de la norma Colombiana NSR – 10. Por lo tanto, los coeficientes de irregularidad podrían no representar la realidad de comportamiento de la estructura. En este proyecto de investigación se pretende comparar los coeficientes de penalización por irregularidad de la Norma Ecuatoriana de Construcción con el coeficiente obtenido a través de la respuesta dinámica de dos modelos de estructuras (regular e irregular) realizado en software ETBAS

OBJETIVOS

Objetivo general

Análisis de la aplicación de los coeficientes de irregularidad de la NEC-SE-DS al cálculo estructural y contraste con el comportamiento real de una estructura irregular respecto a una regular.

Objetivo específico

Comparar la respuesta dinámica de un edificio irregular versus el mismo edificio si fuera regular.

Verificar si los factores de irregularidades de la Norma Ecuatoriana de Construcción capturan las diferencias observadas en los parámetros de respuesta estructural.

ANTECEDENTES

Origen de terremotos en Ecuador

Según en el artículo “A new view for the geodynamics of Ecuador: Implication in seismogenic source definition and seismic hazard assessment for Ecuador” existen tres fuentes sísmicas de mayor relevancia en Ecuador.

Existen la zona de contacto, la superficie que está en unión de la placa oceánica con la continental sudamericana, esta zona de interfase acapara tres países, penetrando de manera diagonal al Ecuador continental, se ha registrado que producen terremotos de mayor magnitud en esta zona. Por ejemplo:

- Existen los registros de que el segmento de Esmeraldas produce los terremotos de magnitud superior a 7.5, en el caso, del terremoto ocurrido en 1906 de magnitud de 8.8 y esta relacionado con el proceso geológico de la subducción
- La otra fuente sísmica de menor magnitud de subducción que incluye la placa Nazca en la zona de transición del golfo de Guayaquil, en la unión de placa de nazca joven y Farallón antiguo, desde donde se interseca con la placa Norandino no existen registros de grandes terremotos
- Como tercera fuente sísmica, es la el segmento de Talara (en la antigua placa de Farrallón) de tipo subducción que tampoco tiene registro de grandes magnitudes.

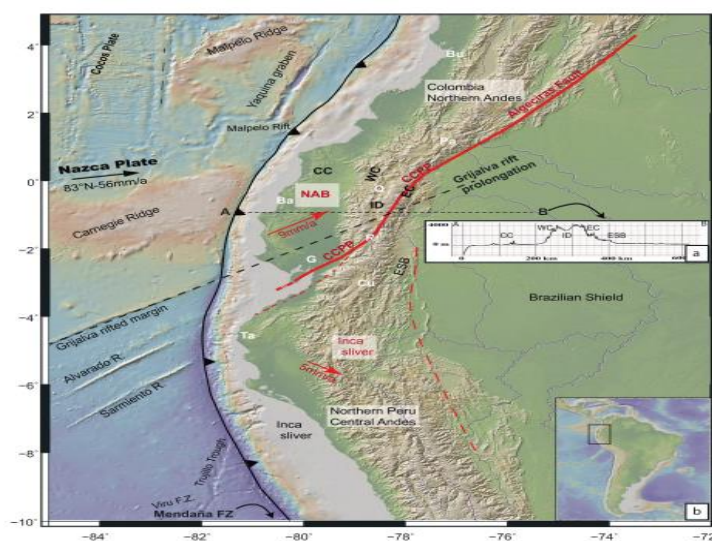


Figura 1. Marco geodinámico del Ecuador

(Yepes, y otros, 2016)

Marco geodinámico del Ecuador y países vecinos. La placa de Nazca converge en latitudes ecuatorianas con respecto al escudo de Brasil a 56 mm por año. Por otro lado, el bloque Norandino (NAB) se está alejando hacia NE a 9 mm por año a lo largo de fallas inversas CCPP que continúa en Colombia como la falla de Algeciras (línea roja gruesa). Y, la franja Inca se está moviendo hacia SE a 5 mm por año a lo largo del cinturón sub-andino de este del Perú (línea roja discontinua). Por último, el margen Grijalva está separando dos placas oceánicas de diferentes edades.

Evento sísmico de Pedernales

El último evento sísmico de mayor magnitud ocurrido en Pedernales dejó un alto impacto negativo en la economía y la población del país, el terremoto ocurrió el 16 de abril de 2016, la magnitud registrada fue Mw 7.8 que afectó a la provincia de Manabí, la parte sur de la provincia de Esmeraldas. En los restos de estructuras colapsados se encontraron evidencias claras de la mala calidad construcción sin importar si está fuese formal e informal (IG_EPN, 2023). De hecho, el Ministerio de Desarrollo Humano y Vivienda reportó que el terremoto afectó a 35264 viviendas, más de la mitad de las infraestructuras estaban construidas en la zona urbana, de las viviendas afectadas apenas las 4960 viviendas golpeadas por el sismo fueron catalogados como infraestructuras seguras. En cambio, 13962 viviendas fueron colapsados o demolidos en su totalidad. Cabe mencionar que estas estructuras no estaban construidas con la Norma Ecuatoriana de Construcción vigente. Esta norma detalla los requerimientos y metodologías que deben ser aplicados al momento de diseñar infraestructuras sismo resistente. A continuación, se expone la metodología requerida por la Norma Ecuatoriana de Construcción.

El espectro de respuesta sísmica

Para obtener el espectro de respuesta sísmica, primero, se obtiene el registro acelerogramas que son llevados a cabo por un instrumento llamado acelerógrafos, este es un registro de aceleraciones del suelo debido al movimiento sísmico en un sitio específico. El acelerogramas se puede integrar mediante una expresión numérica (Boffi, 2018), o en se puede integrar empleando el software, por ejemplo: El software DEGTRA. Donde el usuario puede escoger el periodo natural de la estructura (debe cubrir un amplio intervalo de periodos de

vibración natural), y para un valor de amortiguamiento de la misma para el sistema de 1 GDL. Para luego, seleccionar el valor máximo de la respuesta de aceleraciones que está en función del periodo de la estructura, los valores máximos se emplean para la construcción de espectro de diseño elástico.



Figura 2. Interfaz del software Degtra

Espectro combinado desplazamiento, velocidad y aceleración

Los tres espectros constituyen formas distintas de presentar la misma información acerca de la respuesta estructural. A partir de cualquiera de las 3 variables se puede deducir uno de los espectros mediante expresiones algebraicas. El espectro de pseudo-aceleración está directamente relacionado con los valores máximos de la fuerza cortante basal. La ecuación (1) muestra cómo se relacionan las variables pseudo desplazamiento, D ; pseudo velocidad, V ; pseudo aceleración, A (Chopra, 2020).

$$\frac{A}{\omega_n} = V = \omega_n * D \quad (1)$$

Las variables pseudo aceleración, velocidad y desplazamiento son medidas de las aceleración, velocidad y desplazamiento relativa o efectiva entre la estructura y el suelo durante un evento sísmico. Se obtienen a partir de los registros de acelerogramas y se calcula por diferentes métodos; Por ejemplo, el método del espectro de respuesta. “Un espectro de respuesta debe cubrir un amplio intervalo de periodos de vibración natural y varios valores de amortiguamiento, de modo que proporcione la respuesta máxima de todas las estructuras posibles” (Chopra, 2020)

Espectro de diseño elástico

El espectro de diseño elástico es la máxima respuesta sísmica de una estructura frente al sismo, y se obtiene a partir del análisis de espectro de respuesta que considera las propiedades dinámicas de la estructura, las condiciones geológicas, sismológicas y el amortiguamiento de 5% con fines de diseño que representa los efectos dinámicos del sismo de diseño. (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

Sin embargo, para el presente análisis del comportamiento dinámico de la estructura regular e irregular se empleará el método de análisis espectral. Este método considera el espectro de respuesta elástico de aceleraciones S_a está expresado en fracción de la gravedad. Se tiene en cuenta los siguientes parámetros como: el factor de zona sísmica Z , el tipo de suelo, y los coeficientes de ampliaciones de suelos. (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015).

En tanto, en análisis espectral no considera el registro de acelerogramas, se toma en cuenta la parte geológica, tipos de suelo y la zona sísmica (la aceleración expresada en g).

Diseño basado en fuerzas DBF

Según (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015) el diseño basado en fuerzas es el método de referencia de la NEC 2015, utilizado para cualquiera tipo de estructura. Existen 3 métodos de análisis: el método estático, análisis dinámico espectral y análisis dinámico paso a paso en el tiempo. Para definir el coeficiente de cortante basal en método estático y dinámico (método de análisis espectral) se aplica para todo tipo de estructura, se considera el factor Z , el PGA, la irregularidad de la estructura, y el espectro sísmico de respuesta o se puede construir a partir de la curva de peligro sísmico de la NEC 15. Análisis paso a paso en el tiempo, se emplea los acelerogramas para una zona específica. (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

Estructura irregular

Una estructura es considerada irregular cuando se presenta distribuciones no uniformes de masa, rigidez. También se categoriza a las edificaciones que presentan

irregularidad en planta y elevación. Dicho esto, las estructuras generalmente siempre tienen alguna irregularidad.

Las estructuras irregulares en planta o en la elevación del edificio, son consideradas como susceptibles llegar a la falla durante un evento sísmico. Pero, mucha de estas estructuras fue diseñadas bajo métodos conservadores, con poca información, y bajo a otros requerimientos. Contra intuitivo a lo que catalogan que los edificios irregulares tienen un mal comportamiento a la influencia del sismo, no siempre es así. Por ejemplo, en un estudio se encontró que una estructura hecha de pórticos de concreto con irregularidad en masa no resultaba en un incremento de demandas plásticas (De Stefano & Pintucchi, 2008). Sin embargo, no existe un estudio extenso sobre edificios irregulares, y más aún de estructuras combinadas con irregularidad en planta y elevación para poder predecir el comportamiento de la estructura irregular

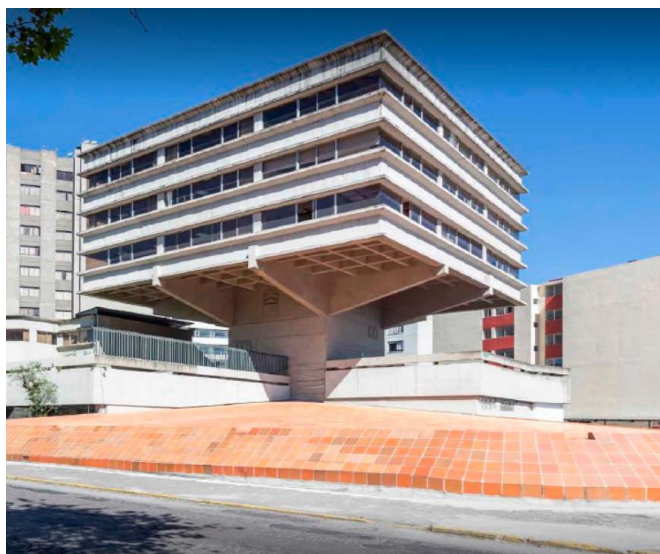


Figura 3. Edificio Irregular. Centro Internacional de Estudios Superiores de Comunicación para América Latina

Las investigaciones en el campo realizadas después de la ocurrencia de sismo se han confirmado que existe el mismo patrón en las estructuras irregulares; tienden a sufrir daños en mayor cantidad que las estructuras regulares. La causa principal del colapso de estas estructuras se radica en efecto de torsión en planta. La torsión ocurre cuando existe excentricidad entre el centro de masas del piso y su rigidez (ver la figura 4). El centro de rigidez es el punto en el que, al aplicar una fuerza horizontal a un sistema estructural

resistente a cargas laterales, este se desplaza sin rotar, se puede demostrar que el centro de rigidez existe en todo tipo de estructura sin importar la configuración. (Medina & Medina, 2017)

Este efecto mecánico de excentricidad entre el centro de masas y rigidez ocurre por la mala distribución en planta de la mampostería de relleno, ejes no paralelos, diferencia de masas, entre otros. Para mitigar este tipo de comportamiento la norma ecuatoriana de la construcción penaliza la irregularidad. (Medina & Medina, 2017)

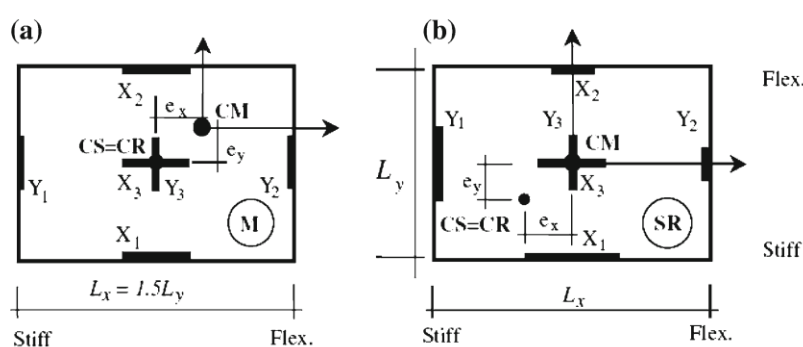


Figura 4. Excentricidad entre la masa y rigidez.

La irregularidad en estructuras según la NEC 2015

La Norma Ecuatoriana de Construcción emplea coeficientes dependiendo del tipo de irregularidad de la infraestructura como discontinuidad en el sistema de piso, ejes estructurales no paralelos, irregularidades en elevación por rigideces y distribución de masa, así también irregularidades geométricas (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015). Estas características hacen que la estructura sea deficiente al momento de disipar la energía, en tanto, los coeficientes que se asignan por irregularidad de la estructura son coeficientes de reducción.

Distribución de vertical de fuerzas laterales

La distribución de fueras verticales en la estructura es similar a la forma de triangular, al modo fundamental de vibración de la edificación. La distribución de la fuerza lateral se realiza para el análisis estático y dinámico. Se emplea las siguientes expresiones para calcular

los valores distribución de cortante en cada piso (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015). Se puede apreciar en la figura 4.

$$V = \sum_{i=1}^n F_i \quad V_x = \sum_{i=1}^n F_i \quad F_x = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i * h_i^k} * V$$

Donde,

V_x : cortante por piso; V : cortante total en la base.

F_i : la fuerza lateral por piso i ; F_x : la fuerza lateral por piso x .

w_x : peso asignado al piso, es una fracción de la carga reactiva.

w_i : peso asignado al piso, es una fracción de la carga reactiva.

h_i : la altura del piso

k : Coeficiente relacionado con el periodo de vibración de la estructura.

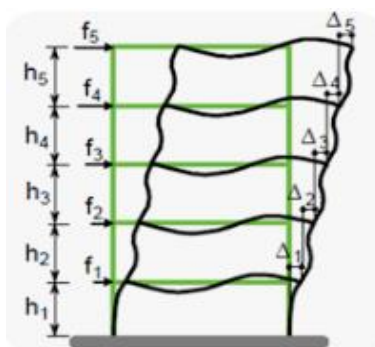


Figura 5. Distribución de vertical de fuerzas laterales y las derivas del piso

Excentricidad y torsión accidental

El momento torsional de diseño en un piso en particular se calcula como el momento resultante de excentricidades entre las fuerzas laterales de los pisos superiores y los elementos que resisten estas cargas. (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

Para tener en cuenta la torsión accidental por incertidumbre de la posición del centro de masa, se considera el valor de 5 % de excentricidad. La torsión accidental desplaza perpendicularmente a la dirección de la aplicación de las fuerzas laterales, tanto en estructuras regulares e irregulares. Este efecto se debe incluir en el cortante de piso y en los momentos torsionales (ver la figura 4). (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

DESARROLLO

Carga viva, permanente y muerta

A continuación, se define las cargas muertas y vivas de la edificación, según la (Guía práctica de diseño de viviendas de 2 pisos con luces de hasta 5 metros de conformidad con la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 2015, 2015) menciona que la carga viva a considerar es de $2 \text{ kN}/\text{m}^2$ para edificaciones de tipo residencial.

Tabla 1. Valores de carga viva. Según la NEC 15

Carga Viva:

Tabla 16: Determinación de cargas: carga viva	
Ocupación o Uso	Carga Unitaria kN/m ²
Cubiertas *	1
Residencias	2
Escaleras residenciales Unifamiliares	2

* En la región andina y sus estribaciones, desde una cota de 100 m sobre el nivel del mar, no se permite la reducción de carga viva en cubiertas para prevenir caídas de granizo o ceniza.

En sistema MKS la carga viva será de $200 \text{ kg}/\text{m}^2$ para los 8 pisos, en esta carga se considera todos los objetos movibles. Para la cubierta inaccesible se colocará una carga de $70 \text{ kg}/\text{m}^2$. (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

Tabla 2. Valores de carga en la cubierta. Según la NEC 15

Ocupación o Uso	Carga uniforme (kN/m ²)	Carga concentrada (kN)
Cubiertas		
Cubiertas planas, inclinadas y curvas	0.70	
Cubiertas destinadas para áreas de paseo	3.00	
Cubiertas destinadas en jardinería o patios de reunión.	4.80	
Cubiertas destinadas para propósitos especiales		
Toldos y carpas	i	i
Construcción en lona apoyada sobre una estructura ligera	0.24 (no reduc.)	
Todas las demás	1.00	
Elementos principales expuestos a áreas de trabajo		8.90
Carga puntual en los nudos inferiores de la celosía de cubierta, miembros estructurales que soportan cubiertas sobre fábricas, bodegas y talleres de reparación vehicular		1.40
Todos los otros usos		1.40
Todas las superficies de cubiertas sujetas a mantenimiento de trabajadores		
En la región andina y sus estribaciones, desde una cota de 1000 m sobre el nivel del mar, no se permite la reducción de carga viva en cubiertas para prevenir caídas de granizo o ceniza.		

Para la asignar la carga muerta en el edificio de la residencia se consideró el peso propio de la viga, de muros y la losa. Adicionalmente, se colocó el peso de las columnas como carga distribuida sobre la losa.

Definición de cargas en ETABS

Para modelar en ETABS, existen 3 maneras de introducir las masas: 1. Se toma en cuenta el peso propio y la masa específica, 2. Desde las cargas, 3. Por el peso propio, la masa específica y las cargas (Pranata & Milyardi, 2021). Para el propósito de análisis de la estructura regular e irregular se utiliza la opción 3. Por el peso propio, la masa especificada y las cargas. En esta opción se debe tener cuidado porque muchos usuarios tienden a incluir el peso propio en esa lista, lo que resulta en la duplicación del peso propio en el modelo de masa (Pranata & Milyardi, 2021).

Definición de vigas, columnas, muros y losa en ETABS

Losa aliviada utilizada en el edificio regular e irregular

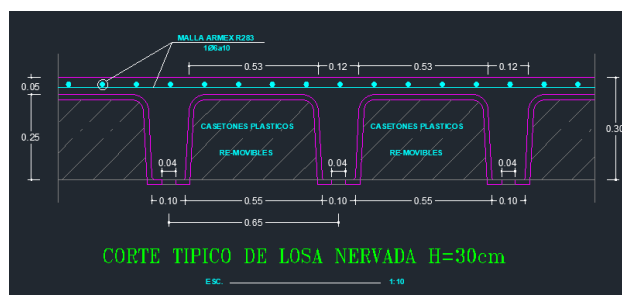


Figura 6. Losa alivianada con casetones

Para modelar la losa en el software ETABS. Primero, se transforma la losa alivianada a su equivalente de losa maciza, con cierto espesor. Para luego, se introduce el espesor equivalente en el software, y se modela como elemento de losa tipo Shell thin con un espesor de 130 [mm] en software ETABS. Peso propio se introduce como carga muerta distribuida sobre el área de la losa.

Tabla 3. Losa alivianada

Dimensiones de losa alivianada						
Tipo	Largo [m]	Ancho [m]	Altura [m]	Volumen [m ³]	Peso	Unidad
Losa Alivianada	100	100	30	0.3	312	kg/m ²
Casetones	55	55	25	0.076		
Total [m³]				0.130		

$$V_{\text{losa maciza}} * \rho_{\text{hormigón}} = \text{Peso losa aliviada}$$

$$1[m] * 1[m] * e * 2400 \frac{kg}{m^3} = 312 \frac{kg}{m^2}$$

$$e = 13 \text{ cm espesor de losa maciza}$$

Elementos estructurales utilizada en el edificio irregular

Como ya se mencionó anteriormente acerca de la definición de carga: por el peso propio, la masa especificada y las cargas, se considera el peso propio del elemento, el cual está dada por la densidad del hormigón $2400 \frac{kg}{m^3}$ y volumen de cada elemento estructural. A continuación, se muestra las dimensiones geométricas de los elementos estructurales: viga, columna y muro en la modelación de la estructura.

La dimensión geométrica de la viga

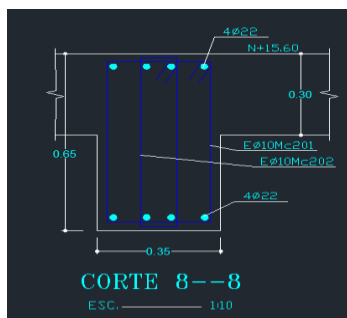


Figura 7. La dimensión típica de la viga utilizada en el edificio

Inercia de las secciones agrietados

Se toma en cuenta las secciones agrietadas de las vigas, columnas, y muros estructurales para el cálculo de la rigidez y de las derivas máximas, para esto se emplea ciertos valores con el fin de reducir las secciones de elementos estructurales (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015).

- $0.5 I_g$ para vigas
- $0.8 I_g$ para columnas
- $0.6 I_g$ para muros estructurales

Sin embargo, la misma norma enfatiza que en el caso de las vigas, el valor de la inercia de la sección transversal total debe considerar el espesor de la losa. Siempre cuando que éstas encuentren construidas monolíticamente unida a la viga. Por lo tanto, al momento de ingresar los valores de secciones agrietadas de las vigas en ETBAS se considera el valor de 1, dado que para la construcción de los elementos estructurales y no estructurales de la infraestructura irregular fueron en situ (ver la figura 7). Este mismo criterio se aplicó para la estructura regular.

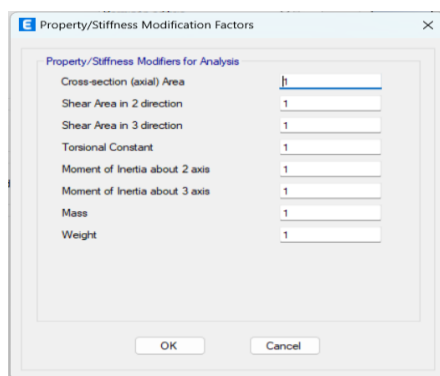


Figura 8. Secciones agrietadas de vigas en ETABS

La dimensión geométrica de la columna. Existen dos tipos de columnas: La columna tipo C60*70 abarca desde la planta baja hasta el tercer piso. La columna tipo C40*70 abarca los pisos restantes.

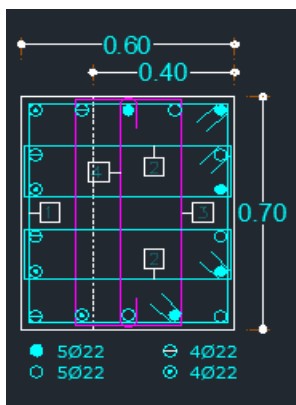


Figura 10. La dimensión geométrica de la columna.
Planta Baja a Piso 3

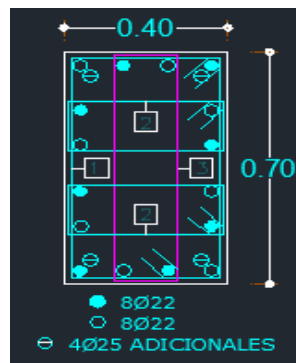


Figura 9. La dimensión geométrica de la columna.
Piso 3 a Piso 10

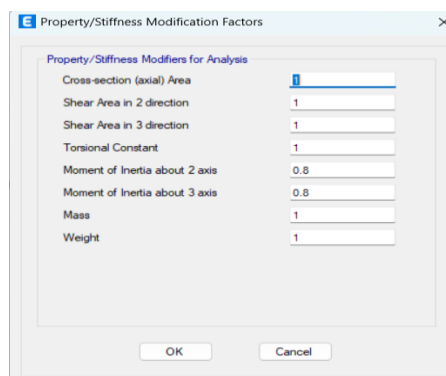


Figura 11. Secciones agrietadas de columnas en ETABS

La dimensión geométrica del muro estructural. Existen varios tipos de muros en el edificio regular e irregular con longitudes distintas, pero conservan la anchura del muro que es de 40 cm.

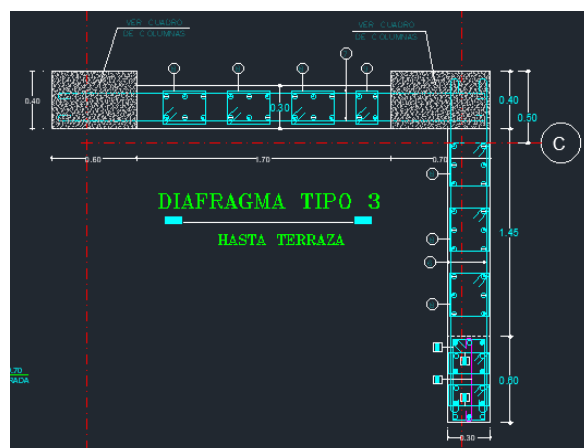
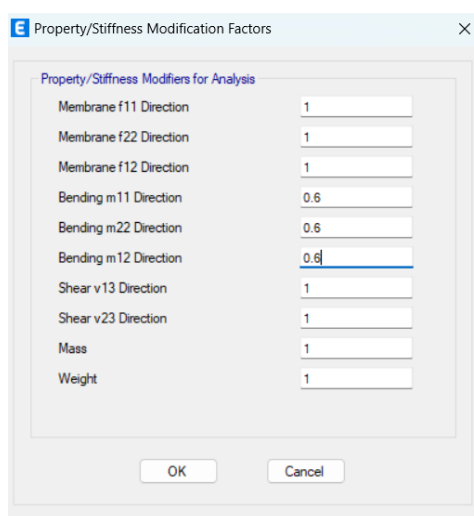


Figura 12. La dimensión geométrica del muro estructural

Existen criterio para la aplicación de coeficiente de reducción en muros estructurales según la (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015).

Para estructuras con subsuelos, se aplicarán en los dos primeros pisos y en el primer subsuelo. No obstante, para el caso de estudio no se considera el subsuelo. En tanto, se aplicará el criterio de los muros agrietadas en dos primeros pisos.



La carga muerta sobre la estructura regular e irregular

Las tablas 4 y 5 proporcionan un desglose detallado de la carga muerta que debe considerarse para la estructura regular e irregular. Es importante tener en cuenta que el peso

propio de las vigas, muros y columnas ya está incluido en el software, por lo que no se refleja en estas tablas.

Tabla 4. La carga muerta para pisos inferiores sobre la estructura regular e irregular

Carga Muerta. Piso 1 a 9		
Tipo	Cantidad	Unidad
Paredes	200	kg/m ²
Acabados	40	kg/m ²
Losa	312	kg/m²
Enlucido	70	kg/m ²
Instalaciones	15	kg/m ²
Peso Muerto	636.6	kg/m²

✓ Load Pattern: Dead	
> Uniform	312 kgf/m ²
> Uniform	325 kgf/m ²
✓ Load Pattern: Live	
> Uniform	200 kgf/m ²
✓ Load Pattern: U	
> Uniform	0 kgf/m ²

Figura 13. Definición de cargas para el piso 1 a 9 en ETABS

Tabla 5. La carga muerta para la cubierta sobre la estructura regular e irregular

Carga Muerta. Cubierta, piso 10		
Tipo	Cantidad	Unidad
Equipos	10	kg/m ²
Impermeabilización	40	kg/m ²
Losa	312	kg/m²
Enlucido	70	kg/m ²
Instalaciones	15	kg/m ²
Peso Muerto	446.6	kg/m²

✓ Load Pattern: Dead	
> Uniform	312 kgf/m ²
> Uniform	135 kgf/m ²
✓ Load Pattern: Live	
> Uniform	0 kgf/m ²
✓ Load Pattern: U	
> Uniform	70 kgf/m ²

Figura 14. Definición de cargas para de cubierta en ETABS

Modelo en ETABS de la estructura regular e irregular

A continuación, se muestra el modelo graficado en el software ETABS, el cual ha sido generado a partir de los planos estructurales del edificio en construcción ubicada en la provincia de Pichincha. El modelo realizado en software ETABS en las Figuras 6, 7, 8 y 9 contienen los elementos estructurales, muros y la losa con su respectivo dimensionamiento (tanto para la estructura regular e irregular). Además, el modelo incorpora las cargas vivas, muertas (el peso propio) y la de cubierta.

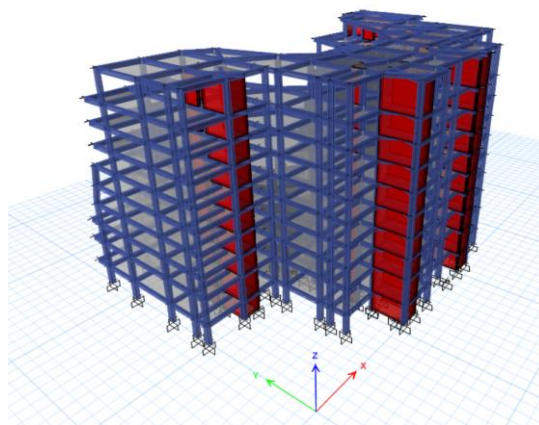


Figura 15. Modelo de estructura irregular en software ETABS. Vista en 3D

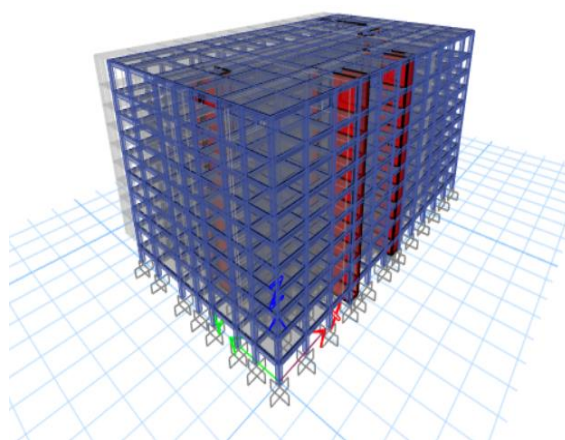


Figura 16. Modelo de estructura regular en software ETABS. Vista en 3D

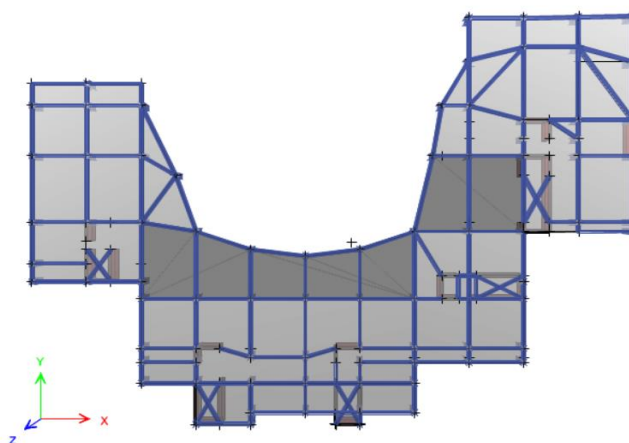


Figura 17. Modelo de estructura irregular en software ETABS. Vista en planta

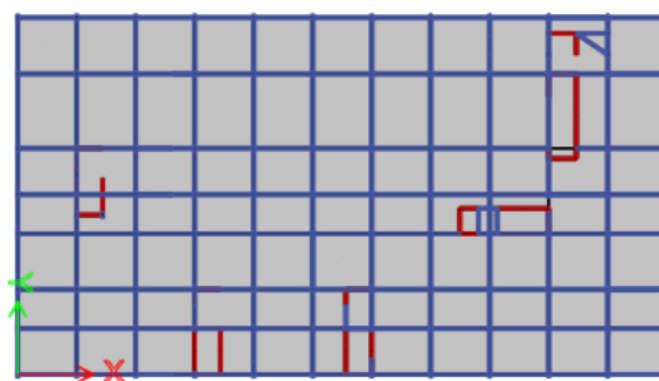


Figura 18. Modelo de estructura regular en software ETABS. Vista en planta

▼	Load Pattern: Dead	
>	Uniform	312 kgf/m ²
>	Uniform	135 kgf/m ²
▼	Load Pattern: Live	
>	Uniform	0 kgf/m ²
▼	Load Pattern: U	
>	Uniform	70 kgf/m ²

Definición de diafragma rígido

Para determinar el centro de masas y de rigideces de la estructura se emplea la herramienta del software ETABS para definir los elementos de losas como diafragma rígido, esto quiere decir que se asume que las losas por piso actúan como cuerpo rígido. Esto permite incorporar la torsión accidental a través de un momento aplicado en el centro de masa del

piso analizado (GULPPI, 2015). En la figura 8, muestra la losa del edificio como elementos de diafragma, esto se aplica para todos los entrepisos de la estructura.

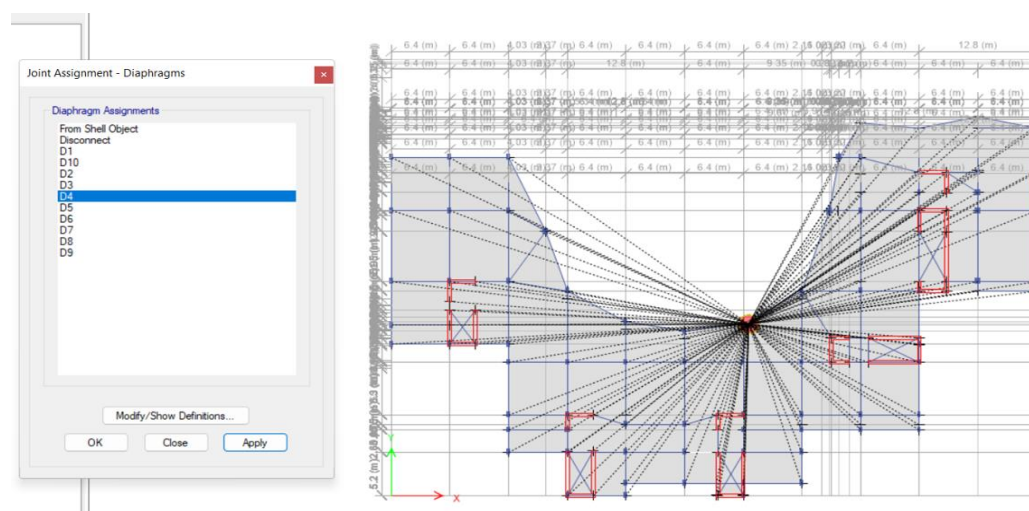


Figura 19. Asignación de losa como diafragma rígido en todos los entrepisos. Extraído: Software ETABS

El mismo procedimiento de asignación de diafragma se realiza para la estructura regular, y se puede observar en la figura 9.

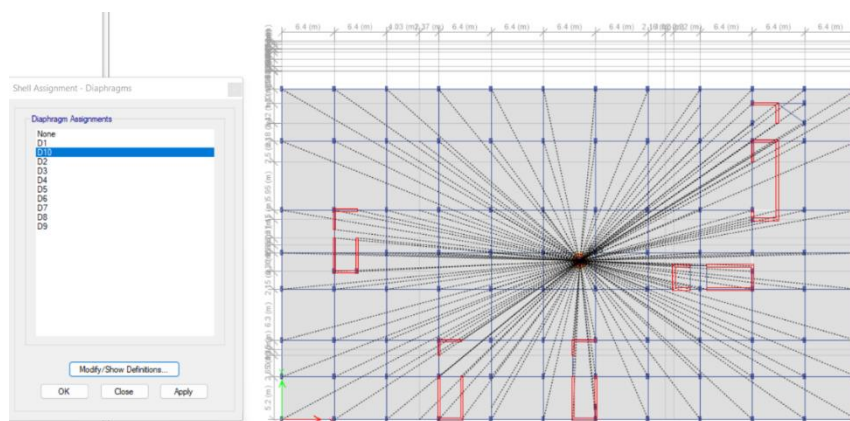


Figura 20. Asignación de losa como diafragma rígido en todos los entrepisos para una estructura Regular. Extraído: Software ETABS

Centro de masas y rigideces

Para definir los coeficientes de irregularidad en elevación según la norma NEC 15, se debe calcular el centro de masas y las rigideces del edificio. Para ello, se empleó el software ETABS para obtener la información requerida por el código de construcción.

Tabla 6. centro de masa y rigidez para la estructura irregular

Centro de Masa y Rigidez de la Estructura Irregular											
Story	Diaphragm	Mass X	Mass Y	XCM	YCM	Cum Mass X	Cum Mass Y	XCCM	YCCM	XCR	YCR
		kg	kg	m	m	kg	kg	m	m	m	m
Story1	D1	744511.0	744511.0	38.8	21.3	744511.0	744511.0	38.8	21.3	39.4	18.7
Story2	D2	758445.4	758445.4	38.2	21.3	758445.4	758445.4	38.2	21.3	42.0	18.6
Story3	D3	693853.4	693853.4	37.8	20.8	693853.4	693853.4	37.8	20.8	43.2	18.3
Story4	D4	713786.9	713786.9	38.5	20.0	713786.9	713786.9	38.5	20.0	43.8	18.0
Story5	D5	727631.5	727631.5	37.0	20.3	727631.5	727631.5	37.0	20.3	44.0	17.8
Story6	D6	727165.7	727165.7	36.7	20.1	727165.7	727165.7	36.7	20.1	43.9	17.5
Story7	D7	758271.0	758271.0	36.6	19.4	758271.0	758271.0	36.6	19.4	43.5	17.3
Story8	D8	748978.9	748978.9	36.1	19.2	748978.9	748978.9	36.1	19.2	42.9	17.1
Story9	D9	789186.9	789186.9	35.0	18.3	789186.9	789186.9	35.0	18.3	42.4	16.9
Story10	D10	544901.7	544901.7	34.6	17.3	544901.7	544901.7	34.6	17.3	41.9	16.6

Tabla 7. centro de masa y rigidez para la estructura regular

Centro de Masa y Rigidez de la Estructura Regular											
Story	Diaphragm	Mass X	Mass Y	XCM	YCM	Cum Mass X	Cum Mass Y	XCCM	YCCM	XCR	YCR
		kg	kg	m	m	kg	kg	m	m	m	m
Story1	D1	3111037	3111037	36.2992	19.6012	3111037	3111037	36.2992	19.6012	38.9634	18.4569
Story2	D2	3160535	3160535	35.9972	19.7673	3160535	3160535	35.9972	19.7673	40.5228	18.527
Story3	D3	2995019	2995019	35.9086	19.8071	2995019	2995019	35.9086	19.8071	41.1826	18.2417
Story4	D4	2940997	2940997	35.8903	19.8078	2940997	2940997	35.8903	19.8078	41.4576	17.9815
Story5	D5	2921066	2921066	35.9824	19.6865	2921066	2921066	35.9824	19.6865	41.5081	17.7991
Story6	D6	2940997	2940997	35.8903	19.8078	2940997	2940997	35.8903	19.8078	41.4216	17.6698
Story7	D7	2940997	2940997	35.8903	19.8078	2940997	2940997	35.8903	19.8078	41.2574	17.5777
Story8	D8	2905511	2905511	36.1141	19.5882	2905511	2905511	36.1141	19.5882	41.0523	17.5071
Story9	D9	3033417	3033417	35.7895	19.6946	3033417	3033417	35.7895	19.6946	40.9149	17.4434
Story10	D10	2195899	2195899	35.6927	19.7912	2195899	2195899	35.6927	19.7912	40.7963	17.3607

Irregularidad del edificio según la norma NEC 15

Irregularidad en planta

Tipo 3. Discontinuidad en el sistema de piso

Para el análisis de irregularidad de la estructura, el caso de estudio del edificio irregular existe discontinuidades en el sistema de piso. Se asemeja del tipo B, aunque no es simétrica (ver la gráfica). En tanto, se procede a evaluar la condición.

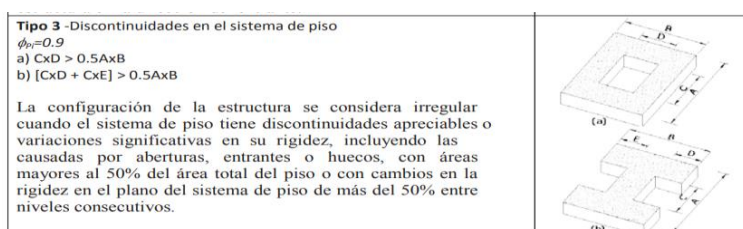


Figura 21. Irregularidad en planta. Tipo 3. Discontinuidad en el sistema de piso (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

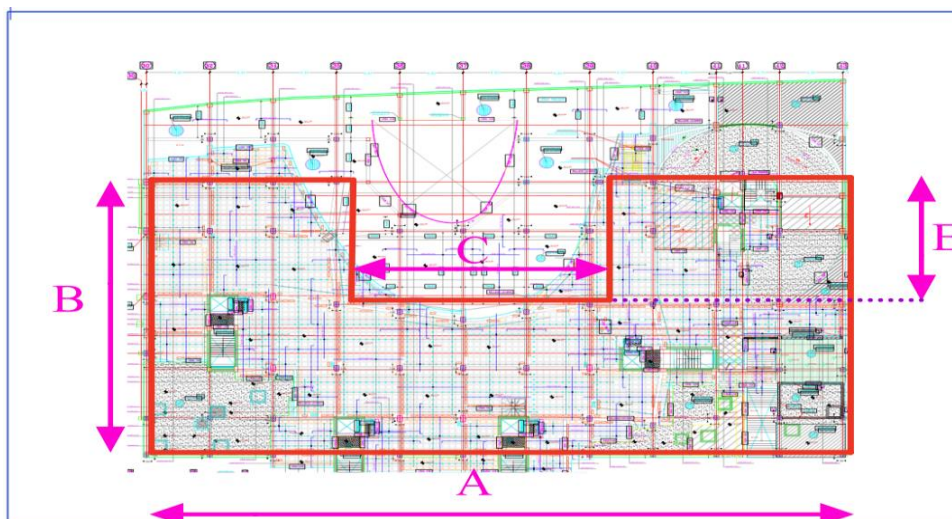


Figura 22. Análisis de irregularidad del edificio. Tipo 3. Discontinuidad en el sistema de piso

Tabla 8. Irregularidad del edificio. Tipo 3. Discontinuidad en el sistema de piso

Discontinuidades en el sistema de piso		
Configuración	Longitud	Unidades
E	16.35	m
C	25.77	m
A	71.05	m
B	39.08	m
C*E	421.3395	m ²
0.5*A*B	1388.317	m ²
No aplica		

La condición b del tipo 3. discontinuidad en el sistema de piso no aplica para el caso de estudio del edificio regular, se puede observar en la figura 23.

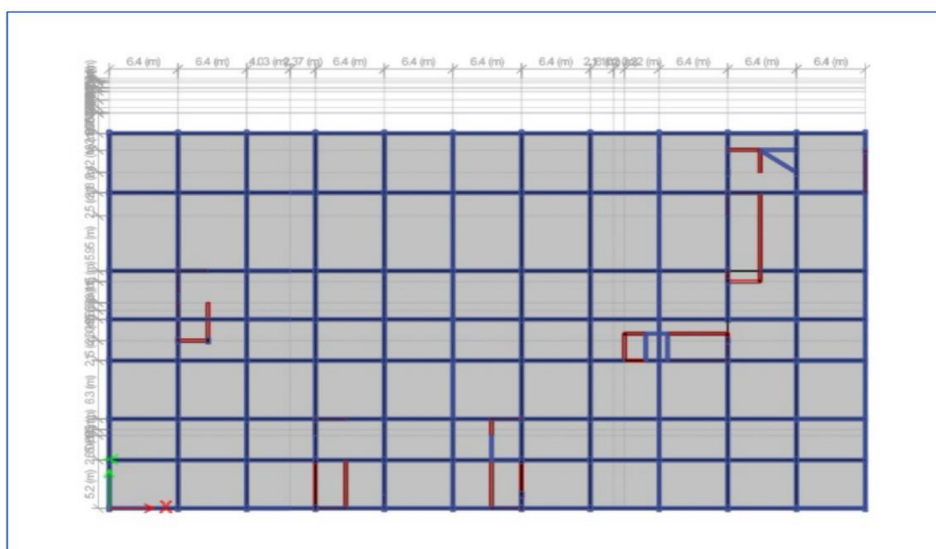


Figura 23. Análisis de irregularidad del edificio. Tipo 3. Discontinuidad en el sistema de piso

Tipo 4. Ejes estructurales no paralelas

“La estructura se considera irregular cuando los ejes estructurales no son paralelos o simétricos con respecto a los ejes ortogonales principales de la estructura” (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

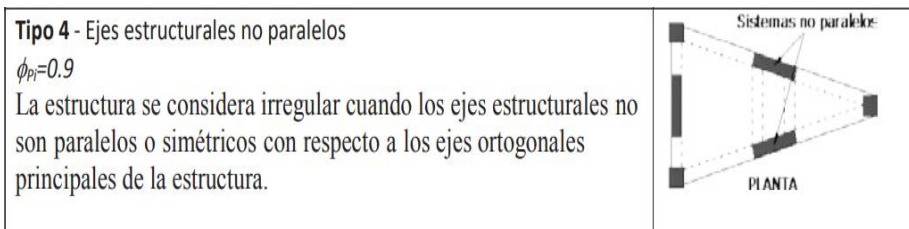


Figura 24. Irregularidad en planta. Tipo 3. Ejes estructurales no paralelas

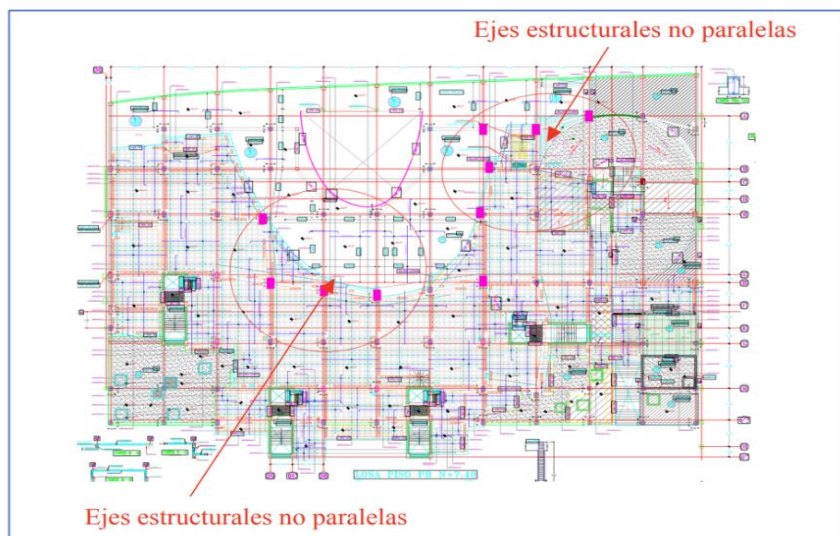


Figura 25. Análisis de irregularidad del edificio. Tipo 4. Ejes estructurales no paralelas.

Tabla 9. Irregularidad del edificio. Tipo 4. Ejes estructurales no paralelos

Ejes estructurales no paralelos	
Φ Ei	0.9
Aplica	

En la figura 23, se puede apreciar que la estructura regular tiene ejes paralelos, y no aplica las condiciones de eje no paralelos como es el caso de la estructura irregular.

Irregularidad en elevación

Tipo 1. Piso flexible

Condición 1: La irregularidad en elevación de tipo 1 considera la rigidez lateral del piso que sea menor que el 70 % de la rigidez lateral del piso superior (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015).

$$k_C < 0.7 * k_D$$

Condición 2: La irregularidad en elevación de tipo 1 considera que la rigidez de un piso cualquiera sea menor que el 80% del promedio de la rigidez lateral de los tres pisos superiores consecutivos (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015).

$$k_C < 0.80 * [(kD + kE + kF)/3]$$

Con la información obtenida en la tabla 9, se verifica las condiciones de irregularidad (condición 1 y 2) en elevación por rigideces.

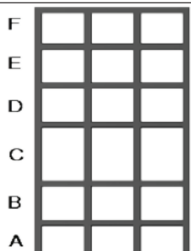
<p>Tipo 1 - Piso flexible $\phi_{EI}=0.9$ Rigidez $k_C < 0.70$ Rigidez k_D Rigidez $< 0.80 \frac{(k_D + k_E + k_F)}{3}$ La estructura se considera irregular cuando la rigidez lateral de un piso es menor que el 70% de la rigidez lateral del piso superior o menor que el 80 % del promedio de la rigidez lateral de los tres pisos superiores.</p>	
---	---

Figura 26. Irregularidad en elevación. Tipo1: Piso flexible

Tabla 10. Verificación de irregularidad de la estructura por rigideces. Edificio Irregular

Irregularidad en Elevación. Tipo 1: Piso flexible										
Story	EJE X					EJE Y				
	XCR	XCR	XCR	Condición 1	Condición 2	YCR	YCR	XCR	Condición 1	Condición 2
Tipo	m	kC	$k=0.80*[(KD+kE+kF)/3]$	$kc<0.70*kD$	$kC < k$	m	kC	$k=0.80*[(KD+kE+kF)/3]$	$kc<0.70*kD$	$kC < k$
Story1	39.4162	39.4	34.4	No cumple	No cumple	18.6894	18.7	14.6	No cumple	No cumple
Story2	41.9965	42.0	35.0	No cumple	No cumple	18.6397	18.6	14.4	No cumple	No cumple
Story3	43.2325	43.2	35.1	No cumple	No cumple	18.2877	18.3	14.2	No cumple	No cumple
Story4	43.832	43.8	35.0	No cumple	No cumple	17.9908	18.0	14.0	No cumple	No cumple
Story5	44.0138	44.0	34.7	No cumple	No cumple	17.7555	17.8	13.8	No cumple	No cumple
Story6	43.8856	43.9	34.4	No cumple	No cumple	17.5314	17.5	13.7	No cumple	No cumple
Story7	43.4854	43.5	33.9	No cumple	No cumple	17.304	17.3	13.5	No cumple	No cumple
Story8	42.9261	--	--	No cumple	--	17.083	--	--	No cumple	--
Story9	42.4359	--	--	No cumple	--	16.8623	--	--	No cumple	--
Story10	41.9038	--	--	No cumple	--	16.5901	--	--	No cumple	--

El coeficiente de irregularidad no aplica en eje x, y

Al analizar las rigideces por pisos de la estructura irregular, se puede concluir que no cumplen con las condiciones de irregularidad en elevación, entonces, $\Phi_{Ei} = 1$

A continuación, se analiza la irregularidad en elevación en la estructura regular. En tabla 11 se puede apreciar que las condiciones de irregularidad por rigidez no cumplen, en tanto el valor es $\Phi_{Ei} = 1$

Tabla 11. Verificación de irregularidad de la estructura por rigideces. Edificio Regular

Irregularidad en Elevación. Tipo 1: Piso flexible										
Story	EJE X					EJE Y				
	XCR	XCR	XCR	Condición 1	Condición 2	YCR	YCR	XCR	Condición 1	Condición 2
Tipo	m	kC	$k=0.80*[(KD+kE+kF)/3]$	$kc<0.70*kD$	$kC < k$	m	kC	$k=0.80*[(KD+kE+kF)/3]$	$kc<0.70*kD$	$kC < k$
Story1	38.96	39.0	32.8	No cumple	No cumple	18.46	18.5	14.6	No cumple	No cumple
Story2	40.52	40.5	33.1	No cumple	No cumple	18.53	18.5	14.4	No cumple	No cumple
Story3	41.18	41.2	33.2	No cumple	No cumple	18.24	18.2	14.3	No cumple	No cumple
Story4	41.46	41.5	33.1	No cumple	No cumple	17.98	18.0	14.1	No cumple	No cumple
Story5	41.51	41.5	33.0	No cumple	No cumple	17.80	17.8	14.1	No cumple	No cumple
Story6	41.42	41.4	32.9	No cumple	No cumple	17.67	17.7	14.0	No cumple	No cumple
Story7	41.26	41.3	32.7	No cumple	No cumple	17.58	17.6	13.9	No cumple	No cumple
Story8	41.05	--	--	No cumple	--	17.51	--	--	No cumple	--
Story9	40.91	--	--	No cumple	--	17.44	--	--	No cumple	--
Story10	40.80	--	--	No cumple	--	17.36	--	--	No cumple	--

El coeficiente de irregularidad no aplica en eje x, y

Tipo 2. Distribución de masa

Para la verificación de irregularidad por masa la estructura debe cumplir con cualquiera de las dos condiciones. El coeficiente de irregularidad en elevación es 0.9 cuando la masa de cualquier piso es mayor a 1.5 veces la masa de uno de los pisos adyacentes. (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

<p>Tipo 2 - Distribución de masa $\phi_{Ei}=0.9$ $m_D > 1.50 m_E$ ó $m_D > 1.50 m_C$</p> <p>La estructura se considera irregular cuando la masa de cualquier piso es mayor que 1,5 veces la masa de uno de los pisos adyacentes, con excepción del piso de cubierta que sea más liviano que el piso inferior.</p>	
--	--

Figura 27. Irregularidad en elevación. Tipo 2: Distribución de masa

En la tabla 12 y 13, se puede comprobar que la condición de irregularidad por masas en la estructura regular e irregular no cumple. En tanto, $\Phi_{Ei} = 1$

Tabla 12. Irregularidad en elevación. Tipo 2: distribución de masa. Edificio Irregular

Irregularidad en Elevación. Tipo 2: Distribución de masa						
Story	EJE X			EJE Y		
	XCCM	Condición 1	Condición 2	YCCM	Condición 1	Condición 2
Tipo	m	$m_D > 1.50 * m_E$	$m_D > 1.50 * m_C$	m	$m_D > 1.50 * m_E$	$m_D > 1.50 * m_C$
Story1	38.8	No cumple	No cumple	21.3	No cumple	No cumple
Story2	38.2	No cumple	No cumple	21.3	No cumple	No cumple
Story3	37.8	No cumple	No cumple	20.8	No cumple	No cumple
Story4	38.5	No cumple	No cumple	20.0	No cumple	No cumple
Story5	37.0	No cumple	No cumple	20.3	No cumple	No cumple
Story6	36.7	No cumple	No cumple	20.1	No cumple	No cumple
Story7	36.6	No cumple	No cumple	19.4	No cumple	No cumple
Story8	36.1	No cumple	No cumple	19.2	No cumple	No cumple
Story9	35.0	No cumple	No cumple	18.3	No cumple	No cumple
Story10	34.6	--	--	17.3	--	--
El coeficiente de irregularidad no aplica en eje x, y						

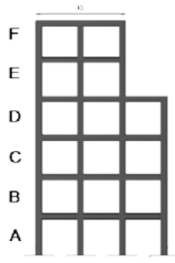
Tabla 13. Irregularidad en elevación. Tipo 2: distribución de masa. Edificio Regular

Irregularidad en Elevación. Tipo 2: Distribución de masa						
Story	EJE X			EJE Y		
	XCCM	Condición 1	Condición 2	YCCM	Condición 1	Condición 2
Tipo	m	$m_D > 1.50 * m_E$	$m_D > 1.50 * m_C$	m	$m_D > 1.50 * m_E$	$m_D > 1.50 * m_C$
Story1	36.30	No cumple	No cumple	19.60	No cumple	No cumple
Story2	36.00	No cumple	No cumple	19.77	No cumple	No cumple
Story3	35.91	No cumple	No cumple	19.81	No cumple	No cumple
Story4	35.89	No cumple	No cumple	19.81	No cumple	No cumple
Story5	35.98	No cumple	No cumple	19.69	No cumple	No cumple
Story6	35.89	No cumple	No cumple	19.81	No cumple	No cumple
Story7	35.89	No cumple	No cumple	19.81	No cumple	No cumple
Story8	36.11	No cumple	No cumple	19.59	No cumple	No cumple
Story9	35.79	No cumple	No cumple	19.69	No cumple	No cumple
Story10	35.69	--	--	19.79	--	--
El coeficiente de irregularidad no aplica en eje x, y						

Tipo 3. Irregularidad geométrica

La geometría de la estructura no es simétrica tanto planta como en elevación. En tanto, se analiza si la edificación entra dentro de esta categoría.

Tabla 14. Irregularidad en elevación. Tipo 4. Irregularidad geométrica

<p>Tipo 3 - Irregularidad geométrica $\phi_{Et}=0.9$ $a > 1.3 b$</p> <p>La estructura se considera irregular cuando la dimensión en planta del sistema resistente en cualquier piso es mayor que 1,3 veces la misma dimensión en un piso adyacente, exceptuando el caso de los altillos de un solo piso.</p>	
--	---

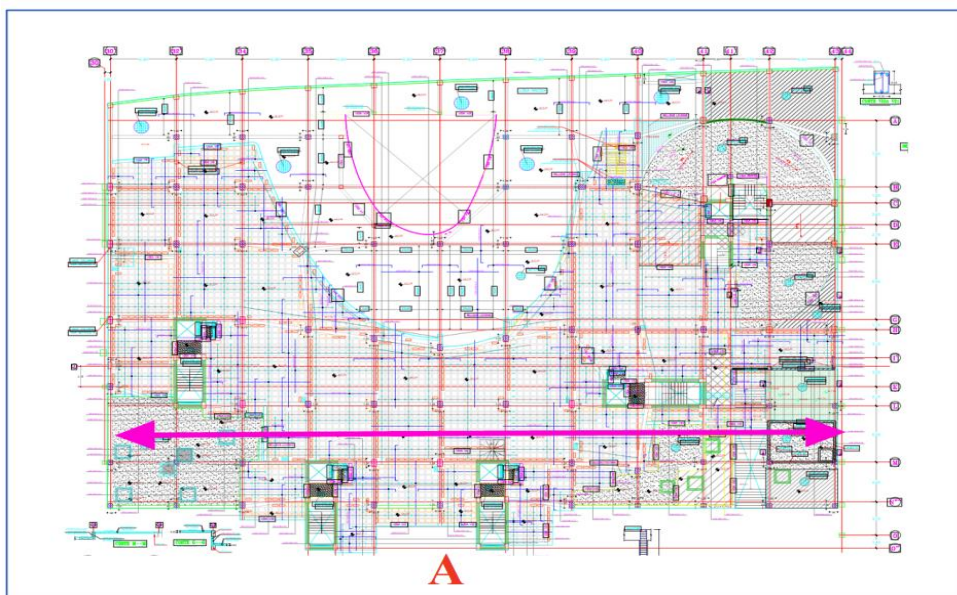


Figura 28. Análisis de irregularidad del edificio en elevación, Planta Baja. Tipo 4. Irregularidad geométrica

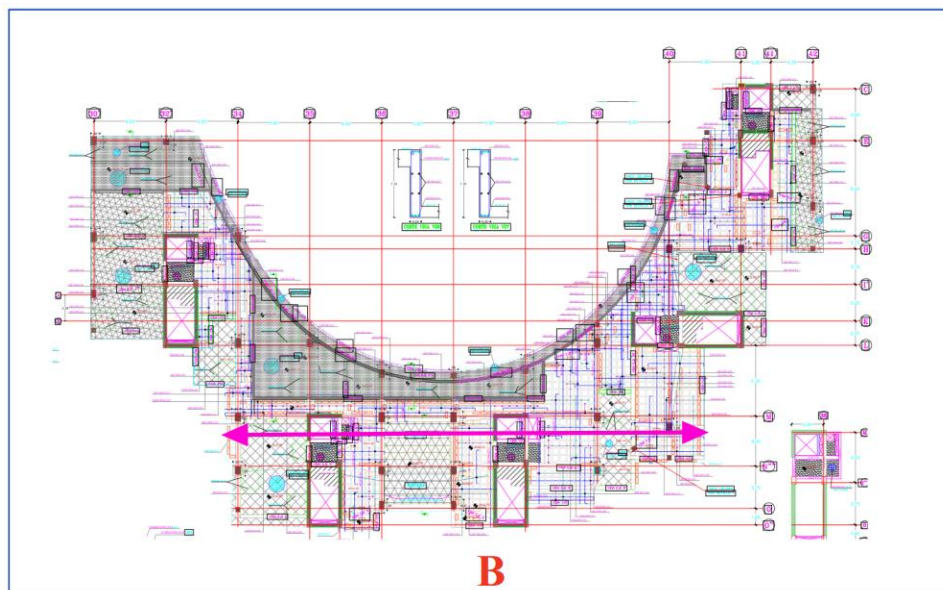


Figura 29. Análisis de irregularidad del edificio en elevación, Piso 10. Tipo 4. Irregularidad geométrica.

Irregularidad geométrica	
Piso Inferior	Piso Superior
A [m]	B [m]
71.1	45.4
A/B	1.6
Φ_{Ei}	0.9
Aplica	

Figura 30. Irregularidad en elevación. Tipo 4. Irregularidad geométrica

No obstante, este coeficiente no aplica para el edificio regular ya que la base y la cubierta tienen la misma dimensión.

Coefficiente de regularidad en planta Φ_P para la estructura irregular

Según la (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015) el coeficiente Φ_P se estima a partir del análisis de las características de regularidad e irregularidad en las plantas en la estructura.

$$\Phi_P = \Phi_{PA} \times \Phi_{PB}$$

Dónde

ϕ_{PA} *Mínimo valor de cada piso en caso de irregularidad tipo 1, 2 y 3*

ϕ_{PB} *Mínimo valor de cada piso de la estructura en el caso de irregularidad tipo 4*

$$\phi_{PA} = 1 \quad \phi_{PB} = 0.9$$

$$\phi_P = 1 * 0.9 = 0.9$$

Coefficiente de regularidad en elevación ϕ_E para la estructura irregular

Según la (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015) el coeficiente ϕ_E se estima a partir del análisis de las características de regularidad e irregularidad en elevación en la estructura.

$$\phi_E = \phi_{EA} \times \phi_{EB}$$

Dónde

ϕ_{EA} *Mínimo valor de cada piso en caso de irregularidad tipo 1*

ϕ_{EB} *Mínimo valor de cada piso de la estructura en el caso de irregularidad tipo 1, 2 y 3*

$$\phi_{EA} = 1 \quad \phi_{EB} = 0.9$$

$$\phi_E = 1 * 0.9 = 0.9$$

Coefficiente de regularidad en planta ϕ_P para la estructura regular

Se determina los coeficientes de regularidad en elevación y planta para la estructura regular. En análisis previo, se determinó que esta estructura entra dentro de la clasificación de irregularidad estimulado en la NEC 15. En tanto, los coeficientes son 1 para todos los casos.

$$\phi_{PA} = 1 \quad \phi_{PB} = 1$$

$$\phi_P = 1 * 1 = 1$$

Coefficiente de regularidad en elevación ϕ_E para la estructura irregular

$$\phi_{EA} = 1 \quad \phi_{EB} = 1$$

$$\phi_E = 1 * 1 = 1$$

Periodo de vibración de la estructura

El período de vibración de una estructura se refiere al tiempo necesario para que la estructura complete un ciclo completo de vibración bajo ciertas condiciones de excitación (Chopra, 2020). En caso de la Norma Ecuatoriana de Construcción se puede calcular el periodo de vibración de una estructura por dos métodos. La primera, se considera el coeficiente para el tipo de edificio (depende de dos variables), y la altura máxima, existe un método alternativo donde se toma en cuenta las dimensiones de los muros, y la cantidad de la misma. El segundo método, se emplea las propiedades estructurales y las características de deformación de los elementos resistentes, se aplica a cada dirección principal de la estructura o por medio de análisis modal. (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015).

Se empleó el método 1 para obtener el periodo de vibración de la estructura irregular y regular. En método uno tanto la estructura regular e irregular tienen los mismos periodos de vibración. En el método alternativo, el periodo de vibración tanto para estructura regular e irregular son las mismas. No obstante, se difiere en el valor con el método 1.

Por método 1

$$T = C_t * h_n^\alpha$$

C_t Coeficiente que depende del tipo de edificio

h_n Altura máxima de la edificación de n pisos, medida desde la base de la estructura en metros

T Período de vibración

Tabla 15. Coeficiente según el tipo de edificio. (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

Tipo de estructura	C_t	α
Estructuras de acero		
Sin arriostramientos	0.072	0.8
Con arriostramientos	0.073	0.75
Pórticos especiales de hormigón armado		
Sin muros estructurales ni diagonales rigidizadoras	0.055	0.9
Con muros estructurales o diagonales rigidizadoras y para otras estructuras basadas en muros estructurales y mampostería estructural	0.055	0.75

$$T = 0.055 * 38.2 [m]^{0.75}$$

$$T = 0.845 [s]$$

Zonificación sísmica y factor de zona Z

Para determinar el espectro de aceleración para el análisis de estructuras regulares e irregulares, es necesario definir varios parámetros, tales como el tipo de suelo, el factor 'z' (que representa la aceleración máxima en la roca), la importancia de la infraestructura, el material del cual está hecha la estructura y la regularidad de la misma.

Según (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015) el mapa de zonificación sísmica para diseño de estructuras proviene del estudio de peligro sísmico para un 10 % de excedencia en 50 años, con un periodo de retorno 475 años.

Tabla 16. Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada. (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

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

Tipos de perfiles de suelos para el diseño sísmico para el edificio regular e irregular

Para la zona de Quito, el perfil del suelo a considerar es de tipo C. Este suelo se caracteriza por tener arreglos densos o roca blanda, y tiene una velocidad de onda cortante de 360 m/s a 760 m/s.

Coeficientes de perfiles de suelo Fa, Fd, Fs

Fa: Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de periodo corto

Este factor permite que el espectro respuesta sísmica elástica de aceleración se ajuste de acuerdo con el sitio donde está construido la infraestructura. **Fa=1.2** (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

Tabla 17. Tipo de suelo y Factores de sitio Fa

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥0.5
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.4	1.3	1.25	1.23	1.2	1.18
D	1.6	1.4	1.3	1.25	1.2	1.12
E	1.8	1.4	1.25	1.1	1.0	0.85
F	Véase Tabla 2 : Clasificación de los perfiles de suelo y la sección 10.5.4					

Fd: amplificación de las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca

El coeficiente Fd amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca. **Fd=1.11** (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

Tabla 18. Tipo de suelo y Factores de sitio F_d

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.5
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.36	1.28	1.19	1.15	1.11	1.06
D	1.62	1.45	1.36	1.28	1.19	1.11
E	2.1	1.75	1.7	1.65	1.6	1.5
F	Véase Tabla 2 : Clasificación de los perfiles de suelo y 10.6.4					

F_s : comportamiento no lineal de los suelos

El coeficiente F_s considera el comportamiento no lineal de los suelos, la degradación del periodo del sitio depende de la intensidad y contenido de frecuencia de la excitación sísmica y los desplazamientos. **$F_s=1.11$** (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

Tabla 19. Tipo de suelo y Factores del comportamiento inelástico del subsuelo F_s

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.5
A	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
B	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
C	0.85	0.94	1.02	1.06	1.11	1.23
D	1.02	1.06	1.11	1.19	1.28	1.40
E	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
F	Véase Tabla 2 : Clasificación de los perfiles de suelo y 10.6.4					

Espectro elástico horizontal de diseño en aceleraciones

El espectro de respuesta elástico de aceleraciones S_a está expresado en fracción de la gravedad. Se tiene en cuenta los siguientes parámetros como: el factor de zona sísmica Z , el tipo de suelo, y los coeficientes de ampliaciones de suelos. (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

A continuación, se define los valores de la relación de amplificación espectral, η , que varía dependiendo de la región del Ecuador. Según la (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015) para la región sierra este coeficiente de amplificación es de $\eta = 2.48$. Para la definición de la otra variable, se considera el tipo de suelo donde $r=1$ es para todo tipo de suelo, con excepción del tipo E. (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

Se define el periodo límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño, T_0 y T_C . Estos valores marcan el límite de cambio en la ordenada del espectro elástico horizontal de diseño de aceleraciones.

$$T_C = 0.55 * F_S * \frac{F_d}{F_a}$$

$$T_C = 0.55 * 1.11 * \frac{1.11}{1.2} = 0.564$$

$$T_0 = 0.1 * F_S * \frac{F_d}{F_a}$$

$$T_0 = 0.1 * 1.11 * \frac{1.11}{1.2} = 0.103$$

$$T_L = 2.4 * F_d$$

$$T_L = 2.4 * 1.11 = 2.66$$

Cálculo estático según la NEC 2015, definición de fuerza sísmica

El efecto de las masas sísmicas en el cálculo

La fuente de carga sísmica (W) representa la carga reactiva por sismo acuerdo con la (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015) es la carga muerta total de la estructura sin considerar la base. Esta carga se emplea para calcular la respuesta de la estructura ante un sismo.

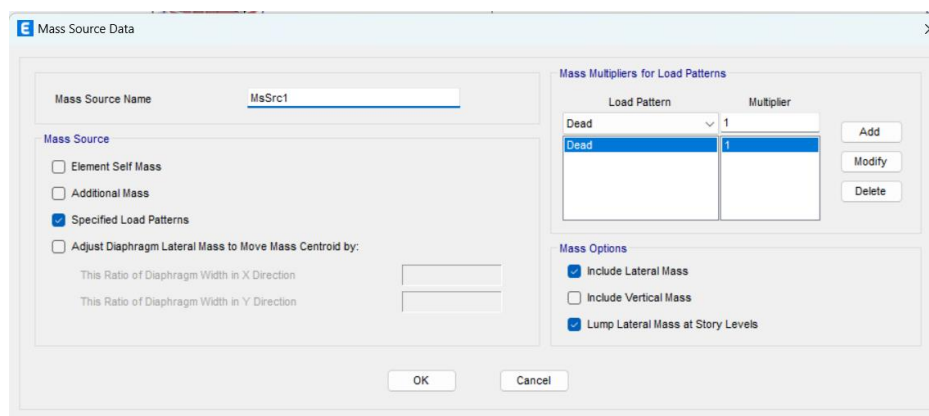


Figura 31. Definición de la masa sísmica en ETABS.

Coefficiente sísmico

Según la (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015) el coeficiente sísmico se calcula teniendo en cuenta varios factores, como la ubicación geográfica, el tipo del suelo, la intensidad esperada del terremoto y las propiedades de la estructura. Con el objetivo de diseñar infraestructuras que puedan resistir a las fuerzas generadas durante un evento de sismo.

Cortante basal

Según la (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015) El valor del cortante basal de diseño, se calcula en términos de cargas últimas, que se aplica a una estructura en una dirección específica. En otras palabras, el cortante basal hace referencia a la fuerza cortante máxima que actúa en la base de una estructura durante un sismo y depende de varios parámetros, se detalla a continuación.

$$V = \frac{I * Sa(Ta)}{R * \Phi_P * \Phi_E} * W$$

$Sa(Ta)$ Espectro de diseño en aceleración

$\Phi_P * \Phi_E$ Coeficiente de configuración en planta y elevación

$I = 1$ Coeficiente de importancia para residencia

$R = 8$ Factor de reducción de resistencia

W Carga sísmica reactiva

Ta Periodo de vibración de la estructura

(Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

Análisis estático para estructura irregular en eje x

Para calcular la carga reactiva no se toma en cuenta la masa del primer piso (planta baja). Se considera a partir del piso 2. Y, se calcula el cortante basal para la estructura irregular.

$$V = \frac{1 * 1.19}{8 * 0.9 * 0.9} * W_{carga\ reactiva}$$

$$Coeficiente = \frac{1 * 1.19}{8 * 0.9 * 0.9} = 0.1836$$

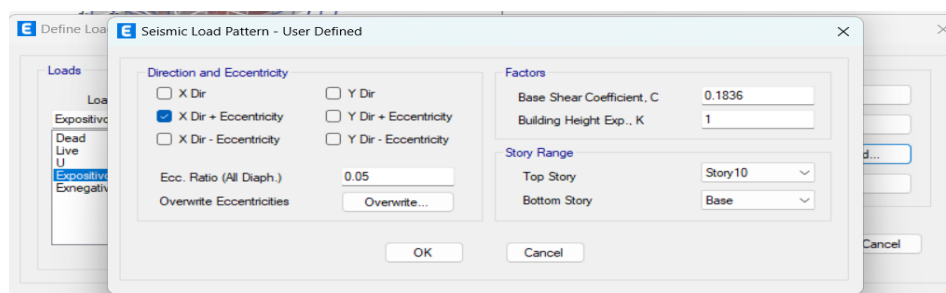


Figura 32. Se define el coeficiente sísmico para la estructura irregular en el eje x positivo y el 5 % de la excentricidad accidental.

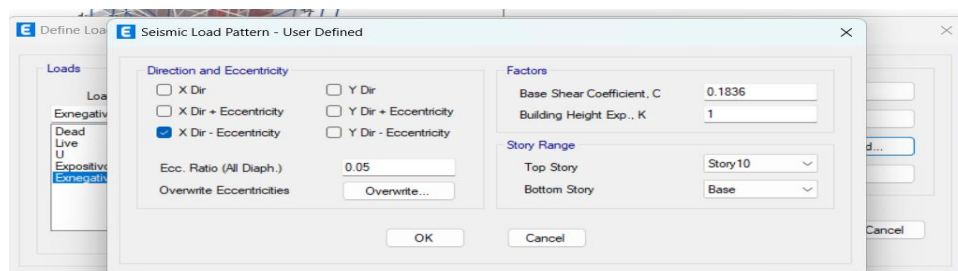


Figura 33. Se define el coeficiente sísmico para la estructura irregular en el eje x negativo y el 5 % de la excentricidad accidental.

Tabla 20. Carga sísmica para estructura irregular

La carga sísmica	
Story	UY
	ton
Story10	1099.0
Story9	1646.8
Story8	1685.4
Story7	1695.1
Story6	1783.2
Story5	1808.4
Story4	1851.7
Story3	1919.0
Story2	1973.4
Story1	2080.9
Base	No aplica
Total	17542.9

$$V = 0.1836 * W_{\text{carga reactiva}}$$

$$V = 0.1836 * 17542.9 \text{ [kg]}$$

$$V = 3220.9 \text{ [ton]}$$

Distribución de vertical de fuerzas laterales en análisis estático de la estructura

Se emplea las siguientes expresiones para calcular los valores distribución de cortante en cada piso según la (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015).

$$V = \sum_{i=1}^n F_i \quad V_x = \sum_{i=1}^n F_i \quad F_x = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i * h_i^k} * V$$

Donde,

V_x : cortante por piso; V : cortante total en la base.

F_i : la fuerza lateral por piso i ; F_x : la fuerza lateral por piso x .

w_x : peso asignado al piso, es una fracción de la carga reactiva.

w_i : peso asignado al piso, es una fracción de la carga reactiva.

h_i : la altura del piso

$k = 1$: Coeficiente relacionado con el periodo de vibración de la estructura.

Tabla 21. Distribución de vertical de fuerzas laterales en análisis estático. Estructura irregular

Story	W	hx	W*(hx ^k)	Cvx	Fx=Cvx*V	
	kg	m		%	kg	ton
Story10	1098955.16	38.2	41980087.1	12.43%	400245.747	400.25
Story9	1646768.05	33.2	54672699.3	16.18%	521259.408	521.26
Story8	1685403.96	29.6	49887957.2	14.77%	475640.812	475.64
Story7	1695083.49	26	44072170.7	13.05%	420192.051	420.19
Story6	1783210.93	22.4	39943924.8	11.82%	380832.608	380.83
Story5	1808398.49	18.8	33997891.6	10.06%	324142.051	324.14
Story4	1851736.4	15.2	28146393.3	8.33%	268352.807	268.35
Story3	1919029.55	11.6	22260742.8	6.59%	212237.95	212.24
Story2	1973435.78	8	15787486.2	4.67%	150520.751	150.52
Story1	2080891.02	3.4	7075029.47	2.09%	67454.6112	67.45
Total			337824383	100%		3220.88

Análisis estático para estructura regular en eje x

Para calcular la carga reactiva no se toma en cuenta la masa del primer piso (planta baja). Se considera a partir del piso 2. Y, se calcula el cortante basal para la estructura regular.

$$V = \frac{1 * 1.19}{8 * 1} * W_{carga\ reactiva}$$

$$Coeficiente = \frac{1 * 1.19}{8 * 1} = 0.14875$$

$$V = 0.14875 * W_{carga\ reactiva}$$

Tabla 22. Carga sísmica para la estructura regular

La carga sísmica	
Story	UX
	ton
Story10	2195.90
Story9	3033.42
Story8	2933.05
Story7	2941.00
Story6	2941.00
Story5	2941.00
Story4	2941.00
Story3	2995.02
Story2	3160.54
Story1	3140.13
Base	No aplica
Total	29222.04

$$V = 4346.78[\text{ton}]$$

Análisis dinámico

Para graficar la curva de espectro elástico horizontal de diseño de aceleraciones, se emplea las ecuaciones que se presenta en la figura 34 dependiendo del tramo de la curva. La misma respuesta de diseño sísmica se puede graficar en el software ETABS (se muestra en la figura 36) introduciendo los parámetros como el factor z , el tipo de suelo, el factor F_a , F_d , y entre otros.

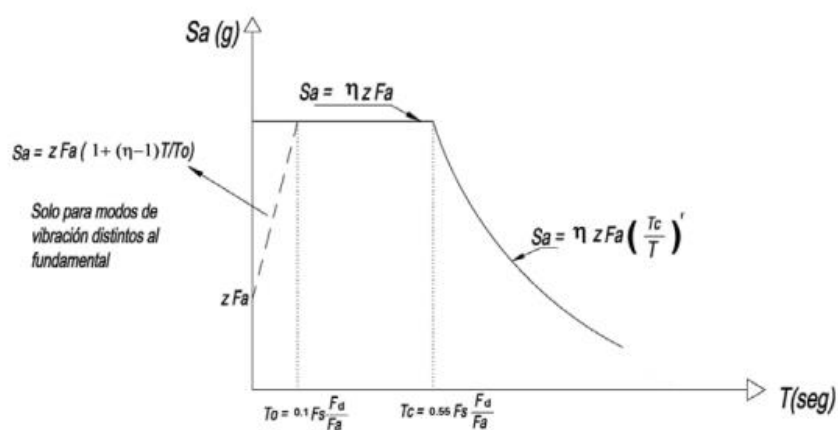


Figura 34. Espectro elástico horizontal de diseño en aceleraciones

La curva de espectro elástico de diseño es la misma para la estructura regular e irregular, en otras palabras, para ambas estructuras los valores de los coeficientes de cada parámetro son las misma (ver la figura 34) y estos valores fueron definidos previamente en el análisis estático de la estructura. Tanto en la figura 35 y 36 muestran la definición del espectro elástico de respuesta en ETABS introduciendo los parámetros de encontrados previamente en el análisis estático.

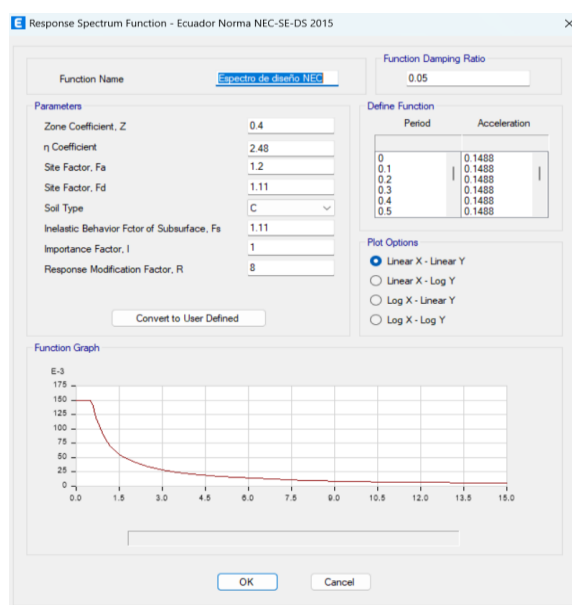


Figura 35. Espectro de diseño en ETABS para la estructura irregular

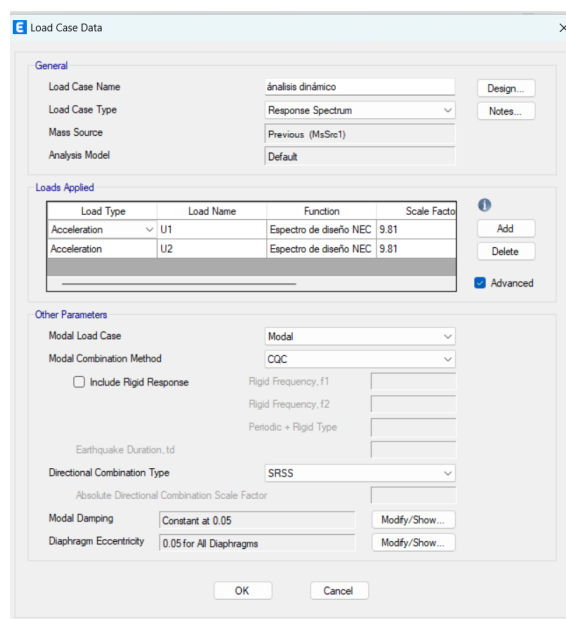


Figura 36. Espectro de diseño en ETABS en eje x, y para la estructura irregular

Distribución de vertical de fuerzas laterales en análisis dinámico

Se emplea las siguientes expresiones para calcular los valores distribución de cortante en cada piso según la (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015).

Tabla 23. Fuerza lateral en estructurar irregular. Análisis dinámico

Story	Output Case	Case Type	Step Type	Location	P Kgf	VX Kgf	VY Kgf	T kgf-m	MX kgf-m	MY kgf-m	Fuerza lateral en el piso de la estructura [kgf]	Fuerza lateral en el piso de la estructura [tonf]
Story10	análisis dinámico	LinRespSpec	Max	Top	0.0006	220110.45	187010.5	8397788	0.009	0.0211	220110.4	220.1
Story9	análisis dinámico	LinRespSpec	Max	Top	0.0018	448379.04	395227.5	18245660	935052.5	1100552	228268.6	228.3
Story8	análisis dinámico	LinRespSpec	Max	Top	0.0006	627847.32	566285.9	27107056	2350951	2703076	179468.3	179.5
Story7	análisis dinámico	LinRespSpec	Max	Top	0.0006	773998.09	706859.7	34368573	4367543	4924210	146150.8	146.2
Story6	análisis dinámico	LinRespSpec	Max	Top	0.0016	904794.49	830347.2	40688851	6865021	7626419	130796.4	130.8
Story5	análisis dinámico	LinRespSpec	Max	Top	0.003	1018409.4	936100	46097420	9769816	10740736	113614.9	113.6
Story4	análisis dinámico	LinRespSpec	Max	Top	0.0032	1117559.6	1026691	50741994	13013850	14209610	99150.2	99.2
Story3	análisis dinámico	LinRespSpec	Max	Top	0.0042	1204151.8	1101457	54596296	16542769	17984756	86592.2	86.6
Story2	análisis dinámico	LinRespSpec	Max	Top	0.0029	1269938.9	1153636	57415647	20307680	22024832	65787.1	65.8
Story1	análisis dinámico	LinRespSpec	Max	Top	0.0027	1292890.7	1170529	58389673	25359568	27483679	22951.8	23.0
Fuerza lateral dinámica total											1292890.729	1292.89

Tabla 24. Fuerza lateral en estructurar irregular. Análisis dinámico

Story	Output Case	Case Type	Step Type	Location	P	VX	VY	T	MX	MY	Fuerza lateral en el piso de la estructura [kgf]	Fuerza lateral en el piso de la estructura [tonf]
					kgf	kgf	kgf	kgf-m	kgf-m	kgf-m		
Story10	Análisis dinámico	LinRespSpec	Max	Top	0.0003	383179.5	337305.6	15477565	0.0014	0.0051	383179.5	383.18
Story9	Análisis dinámico	LinRespSpec	Max	Top	0.0006	700862.3	651441.1	29494444	1686528	1915897	317682.8	317.68
Story8	Análisis dinámico	LinRespSpec	Max	Top	0.0005	927209.8	892765.7	40162940	4003172	4399244	226347.5	226.35
Story7	Análisis dinámico	LinRespSpec	Max	Top	0.0023	1105949	1090572	48905283	7142881	7625964	178739.7	178.74
Story6	Análisis dinámico	LinRespSpec	Max	Top	0.0043	1256991	1255982	56196135	10942956	11406869	151041.3	151.04
Story5	Análisis dinámico	LinRespSpec	Max	Top	0.0064	1398374	1400459	62618473	15278131	15627255	141382.8	141.38
Story4	Análisis dinámico	LinRespSpec	Max	Top	0.0078	1531458	1525193	68242464	20061353	20235418	133084.3	133.08
Story3	Análisis dinámico	LinRespSpec	Max	Top	0.0091	1651353	1628829	72996590	25229535	25217194	119894.7	119.89
Story2	Análisis dinámico	LinRespSpec	Max	Top	0.0077	1753801	1710892	76858475	30724355	30559041	102448.8	102.45
Story1	Análisis dinámico	LinRespSpec	Max	Top	0.0079	1791887	1740353	78287224	38109971	37848800	38086.0	38.09
Fuerza lateral dinámica total												1791.89

Ajuste de cote basal de los resultados obtenidos por el análisis dinámico en estructura irregular

El valor del cortante dinámico total en la base, independientemente del método de análisis dinámico empleado, no debe ser menor que el 80% del cortante basal V obtenido mediante el método estático para estructuras regulares. No menor que el 85% del cortante basal V obtenido mediante el método estático para estructuras irregulares.

Cortante basal estático para estructura irregular

$$Cortante\ basal\ estático = 3220.88 [ton]$$

Cortante basal dinámico para estructura irregular

$$Cortante\ basal\ dinámico = 1292.89 [ton]$$

Ajuste de cote basal de los resultados obtenidos

$$0.85 * Cortante\ basal\ estático = 2737.75 [ton]$$

$$0.85 * Cortante\ basal\ estático > Corte\ basal\ dinámico$$

Entonces, se considera el 85 % de cortante basal estático para el análisis dinámico de la estructura irregular.

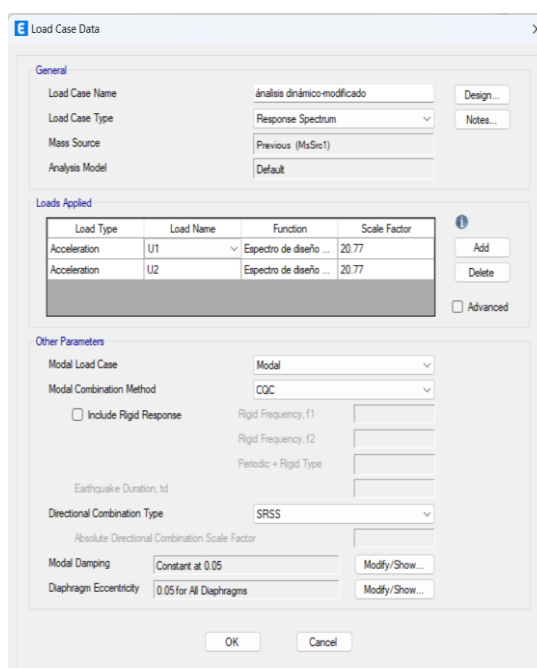


Figura 37. Análisis dinámico de estructura irregular. Se multiplica la gravedad por el factor de 2.117

Ajuste de cote basal de los resultados obtenidos por el análisis dinámico en estructura regular

Cortante basal estático para estructura regular

$$\text{Cortante basal estático} = 4346.78 \text{ [ton]}$$

Cortante basal dinámico para estructura regular

$$\text{Cortante basal dinámico} = 1791.89 \text{ [ton]}$$

Ajuste de cote basal de los resultados obtenidos

$$0.80 * \text{Cortante basal estático} = 3477.42 \text{ [ton]}$$

$$0.80 * \text{Cortante basal estático} > \text{Corte basal dinámico}$$

De manera similar, se considera el 80 % de cortante basal estático para el análisis dinámico de la estructura regular. El factor de ajuste para cumplir con el criterio de 80 % cortante basal estático en análisis dinámico es de 1.94. Y, este valor es multiplicado por la gravedad, dando el número de 19.03 m/s².

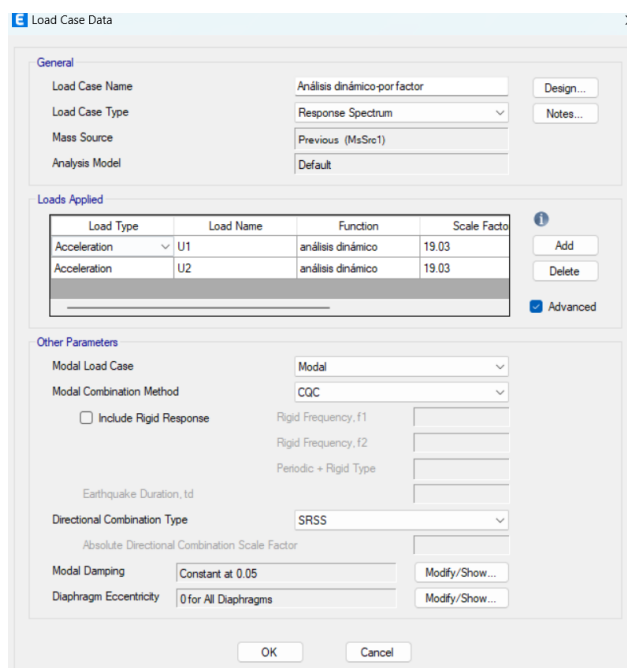


Figura 38. Análisis dinámico de estructura regular. Se multiplica la gravedad por el factor de 1.94

Se reduce el peso propio de la estructura regular por un factor

Para determinar el factor de reducción de la carga muerta en la estructura regular, se realizó iteración e interpolación lineal para igualar la carga muerta en la losa de la estructura regular (incluyendo el peso propio de la losa, los muros, vigas y columnas) con la de la estructura irregular. Esto se debe a que la geometría en elevación de la estructura irregular disminuye el área bruta en altura (ver las figuras 28 y 29), reduciendo así la carga muerta en elevación.

Tabla 25. Se reduce el peso propio de la estructura con el factor de reducción

Story	La carga sísmica regular	La carga sísmica irregular	La carga muerta definida	Factor de reducción	La carga muerta por Factor de reducción
	UY ton	UY ton	kg/m2		kg/m2
Story10	2195.90	1099.0	446.6	0.2335417	104.300
Story9	3033.40	1646.8	636.6	0.1497386	95.324
Story8	2933.00	1685.4	636.6	0.174528	111.105
Story7	2941.00	1695.1	636.6	0.1736066	110.518
Story6	2941.00	1783.2	636.6	0.1926582	122.646
Story5	2941.00	1808.4	636.6	0.1872335	119.193
Story4	2941.00	1851.7	636.6	0.1909185	121.539
Story3	2995.00	1919.0	636.6	0.1866651	118.831
Story2	3160.50	1973.4	636.6	0.1505272	95.826
Story1	3140.10	2080.9	636.6	0.1605765	102.223
Base	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Total	29221.90	17542.92		0.18000	

En tabla 25 se reduce el peso propio de la estructura regular con la finalidad de igualar las masas de ambas estructuras. El ítem de carga muerta modificada se aplica en la estructura regular por piso. El peso propio de la estructura regular con la carga definida es 60 % mayor que la estructura irregular. De hecho, se encontró que el edificio regular es mayor al 46 % en promedio en el peso propio de las vigas y columnas del edificio irregular (ver la tabla 26)

Tabla 26. Peso propio de vigas y columnas de la estructura regular e irregular

Story	Estructura regular	Estructura regular	Irregular/Regular
	Columna y Viga	Columna y Viga	
	ton	ton	
ory10	693.71	300.92	0.43
ory9	820.72	344.82	0.42
ory8	771.32	374.62	0.49
ory7	771.32	374.62	0.49
ory6	771.32	381.22	0.49
ory5	771.32	373.08	0.48
ory4	771.32	376.88	0.49
ory3	825.34	385.26	0.47
ory2	941.76	411.65	0.44
ory1	931.18	418.32	0.45
ise	179.93	199.60	0.46
Promedio			0.46

Al modificar la carga muerta en la losa de la estructura regular se obtiene las cargas sísmicas por piso de la mismo, en la tabla 27 se puede apreciar que las cargas sísmicas tienen la misma magnitud independientemente de su geometría

Tabla 27. La magnitud igual del peso propio de la estructura regular e irregular

Story	La carga muerta por	La carga	La carga sísmica
	Factor de	sísmica regular	irregular
	kg/m2	UY	UY
		ton	ton
Story10	104.300	1099.0	1099.0
Story9	95.324	1646.8	1646.8
Story8	111.105	1685.4	1685.4
Story7	110.518	1695.1	1695.1
Story6	122.646	1783.2	1783.2
Story5	119.193	1808.4	1808.4
Story4	121.539	1851.7	1851.7
Story3	118.831	1919.0	1919.0
Story2	95.826	1973.4	1973.4
Story1	102.223	2080.9	2080.9
Base	No aplica	No aplica	No aplica
Total		17542.92	17542.92

RESULTADOS

Periodo y frecuencia de la infraestructura regular e irregular

El período de vibración de una estructura depende de varios parámetros. Primero, la altura de la estructura influye significativamente, ya que una mayor altura generalmente tiene un período de vibración más largo debido a una mayor flexibilidad. Segundo, la distribución de la masa en los pisos de la estructura; una mayor masa en pisos superiores tiende a aumentar el período. La rigidez de la estructura, la cual está determinada por los materiales y las características geométricas de los elementos estructurales como vigas, columnas y muros, afecta directamente el período natural de vibración de la estructura, siendo que una estructura más rígida tendrá un período de vibración más corto (Chopra, 2020).

En cuanto a la interpretación de los resultados, la estructura irregular tiene un período más largo en comparación con la estructura regular, lo cual se debe a que esta última cuenta con más elementos estructurales debido a su simetría. Asimismo, en la tabla 28 se puede observar que los desplazamientos en el eje x tienen una menor participación del movimiento en el eje y en comparación con la estructura irregular. Esto también se debe a la simetría de la estructura, así como a la distribución de masas y elementos estructurales, como columnas y vigas. Los colores resaltados en la tabla 28 representan los desplazamientos principales en la dirección indicada en UX, UY, RZ y RY.

Al dividir el valor del periodo de vibración de la estructura irregular para la regular, se obtiene el valor promedio de 0.89. Este valor incorpora la irregularidad de la estructura dado que todos los parámetros se mantienen constantes en la definición del cortante basal (como la carga sísmica reactiva, después de haber igualado las masas de ambas estructuras, y el coeficiente sísmico)

Tabla 28. Periodo y frecuencia de la infraestructura regular e irregular.

Case	Mode	Estructura Regular					Estructura Irregular					Φ periodo		
		Period sec	UX	UY	RX	RY	RZ	Period sec	UX	UY	RX		RY	RZ
		1	0.793	0.6734	0.0029	0.0015	0.3394	0.0098	0.84	0.5041	0.1003		0.0503	0.2279
2	0.673	0.0107	0.4386	0.2137	0.0053	0.2494	0.775	0.1862	0.3357	0.1606	0.0956	0.1884	0.87	
3	0.553	0.0022	0.2507	0.1251	0.0012	0.4379	0.574	0.0019	0.2552	0.1161	0.0034	0.4194	0.96	
4	0.216	0.1723	0.0005	0.0009	0.3238	0.0023	0.224	0.1527	0.0082	0.0161	0.3036	0.0127	0.96	
5	0.187	0.0024	0.0937	0.1897	0.005	0.0708	0.203	0.0179	0.0872	0.1893	0.0406	0.0508	0.92	
6	0.151	0.0004	0.0798	0.1521	0.0009	0.1013	0.153	0.0002	0.0776	0.1434	0.0006	0.1126	0.99	
7	0.101	0.0579	0.0001	0.0001	0.1103	0.0005	0.103	0.0541	0.0025	0.0043	0.108	0.0033	0.98	
8	0.088	0.0003	0.0281	0.0533	0.0005	0.0267	0.102	0.0001	0.0001	0.0001	0.0002	0	0.86	
9	0.074	0.0001	0.0273	0.0545	0.0002	0.0247	0.095	0.0001	0.0004	0.0007	0.0002	0.0003	0.78	
10	0.062	0.0291	1.18E-06	4.41E-06	0.0732	0.0002	0.095	0.0035	3.03E-02	5.57E-02	0.0065	0.0231	0.65	
Promedio													0.89	

En la tabla 28 se muestra la razón que existe entre la estructura regular e irregular en cuanto a la rigidez de las columnas y muros en los diferentes niveles de pisos, la estructura regular tiene una mayor rigidez, esto se atribuye al análisis sísmico, donde se considera el peso propio de las estructuras como la carga sísmica reactiva, generando fuerzas laterales en elevación. En este contexto, es pertinente recordar la ley de elasticidad de Hooke, que establece que el alargamiento del material es directamente proporcional al módulo de la fuerza aplicada, en el libro de (Chopra, 2020) se define que la fuerza es igual a la rigidez multiplicado por el desplazamiento $f_s = k * u$. Por lo tanto, se puede inferir que, a mayor fuerza lateral, la respuesta de rigidez de la estructura será mayor. Entonces, existe la correlación directamente proporcional entre la rigidez y la masa sísmica de la estructura, y la diferencia entre los valores se atribuye a la configuración irregular de la estructura, ya que el peso propio es la misma en ambas estructuras.

Sin embargo, la capacidad de resistencia de la estructura, la rigidez, también dependen de las propiedades geométricas y del material (hormigón armado). Por lo tanto, la estructura regular tiene una rigidez un 22% mayor en promedio que la estructura irregular, debido a su mayor cantidad de columnas gracias a su simetría. El valor promedio de 0.73 indica el coeficiente de irregularidad de la estructura, dado que todos los demás parámetros se mantienen constantes.

Tabla 29. La razón entre la rigidez de la estructura regular e irregular

Story	Estructura regular	Estructura irregular	Φ
	Y-Dir tonf/m	Y-Dir tonf/m	
Story10	7.33	5.51	0.75
Story9	20.11	15.18	0.75
Story8	27.35	20.38	0.74
Story7	32.92	23.74	0.72
Story6	38.05	31.47	0.83
Story5	43.55	28.79	0.66
Story4	50.59	34.55	0.68
Story3	61.57	41.95	0.68
Story2	66.28	46.53	0.70
Story1	195.49	145.03	0.74
Promedio			0.73

En la tabla 30 se muestra el cuadro comparativo entre las fuerzas laterales, la diferencia es mínima porque la carga y el coeficiente sísmicos es la misma, la única variable independiente es el factor de irregularidad

Tabla 30. Fuerzas laterales en estructura regular e irregular

Story	Estructura regular	Estructura irregular	Φ
	Fuerza lateral en el piso de la estructura [tonf]	Fuerza lateral en el piso de la estructura [tonf]	
Story10	456.99	466.18	0.98
Story9	460.07	483.46	0.95
Story8	371.37	380.11	0.98
Story7	304.44	309.54	0.98
Story6	265.78	277.02	0.96
Story5	232.09	240.63	0.96
Story4	203.11	210.00	0.97
Story3	170.07	183.39	0.93
Story2	130.41	139.34	0.94
Story1	48.87	48.61	1.01
Base	2643.20	2738.28	
Promedio			0.97

En la figura 39 y 40 se muestra la distribución de fuerzas laterales en la parte vertical de la edificación.

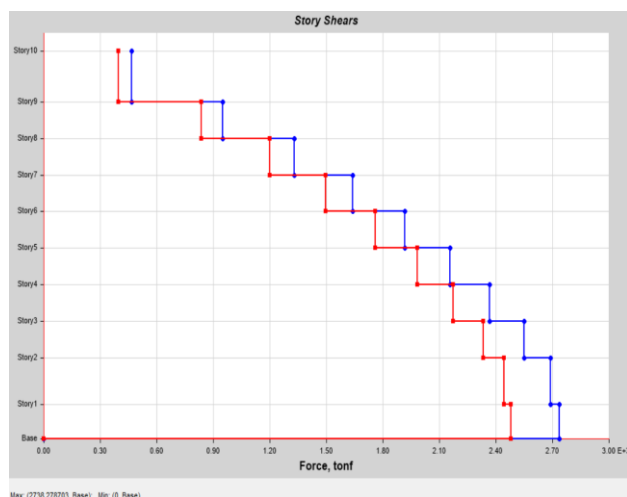


Figura 39. Fuerza lateral en estructura irregular en x, y

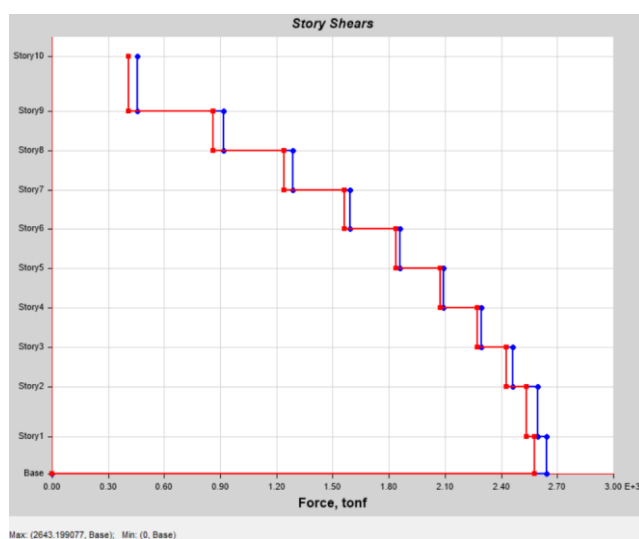


Figura 40. Fuerza lateral en estructura regular x, y

Finalmente, se obtuvieron los valores de la deriva inelástica máxima para cada nivel de piso en las estructuras regular e irregular. El desplazamiento entre pisos no presenta mucha variación, como se puede corroborar en la tabla 31. Al dividir la deriva inelástica de la estructura irregular con la regular, se encontró que el valor promedio es de 0.11, es decir, el 11%. Este valor se debe a la irregularidad de la estructura.

Tabla 31. Deriva inelástica entrepisos en estructura regular e irregular

Story	Altura del edificio m	Estructura regular	Estructura irregular	Φ Inelástica
		Deriva Inelástico	Deriva Inelástico	
Story10	3.4	0.81%	0.08%	0.10
Story9	8			
Story8	11.6	0.89%	0.10%	0.11
Story7	15.2			
Story6	18.8	0.93%	0.10%	0.11
Story5	22.4			
Story4	26	0.85%	0.09%	0.11
Story3	29.6			
Story2	33.2	0.74%	0.09%	0.12
Story1	38.2			
Promedio				0.11

La demanda de esfuerzo de cortante y flexión en los elementos estructurales (muros y columnas) debido al sismo en eje x

Esfuerzo de cortante y el momento flector en la estructura regular

Se analiza la demanda de esfuerzos de cortante y el momento flector en los muros del eje 3-3, y que el sismo de análisis tiene la dirección de x positivo.

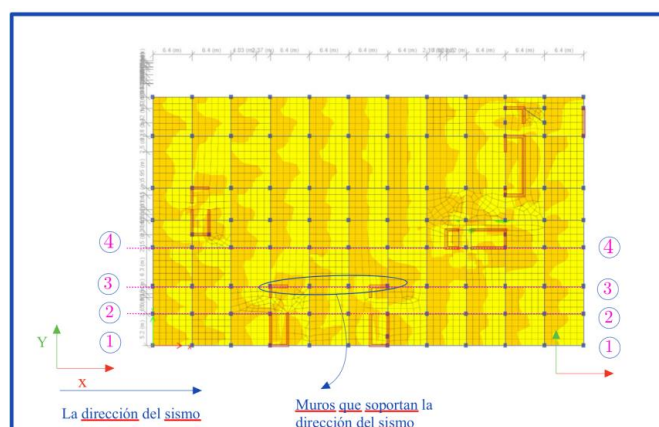


Figura 41. Vista en planta de estructura regular del eje 3-3

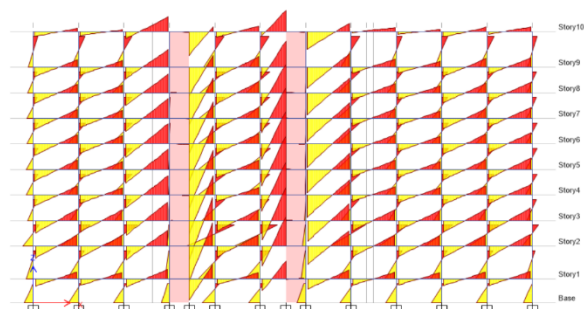


Figura 42. La demanda de momentos por la acción del sismo en estructura regular en el eje 3-3.



Figura 43. La demanda de cortante por la acción del sismo en estructura regular en el eje 3-3.

En la figura 44 se muestra los muros W20 Y W12 (de izquierda a derecha en sentido x positivo, siendo el muro W20 más cercana al eje global de 0,0,0) sometidos a esfuerzos de cortante por la acción del sismo en la dirección. El entonces, estos muros soportan los esfuerzos de cortante en dirección del eje x global.

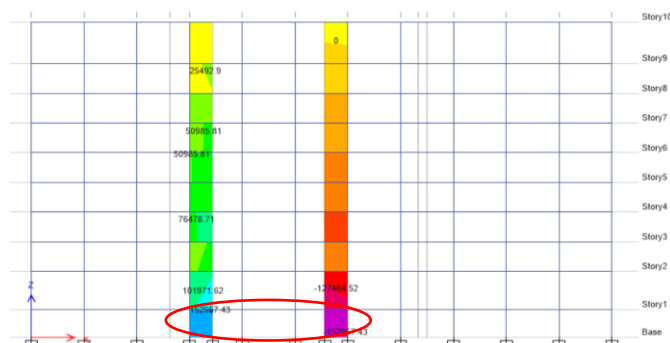


Figura 44. Demanda de cortante en los muros en el eje 3-3 en estructura regular debido al sismo.

En la figura 45 se muestra los muros W20 Y W12 (de izquierda a derecha en sentido x positivo, siendo el muro W20 más cercana al eje global de 0,0,0) sometidos a flexión por la acción del sismo en la dirección. El entonces, estos muros soportan los momentos que gira respecto al eje global y.

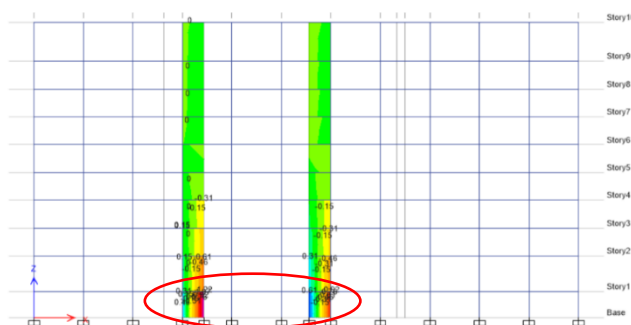


Figura 45. Demanda de momento en los muros en el eje 3-3 en estructura regular debido al sismo.

Esfuerzo de cortante y el momento flector en la estructura irregular

De manera similar, se escoge el mismo eje de 3-3 para analizar la demanda de esfuerzos de cortante y el momento flector en el edificio irregular.

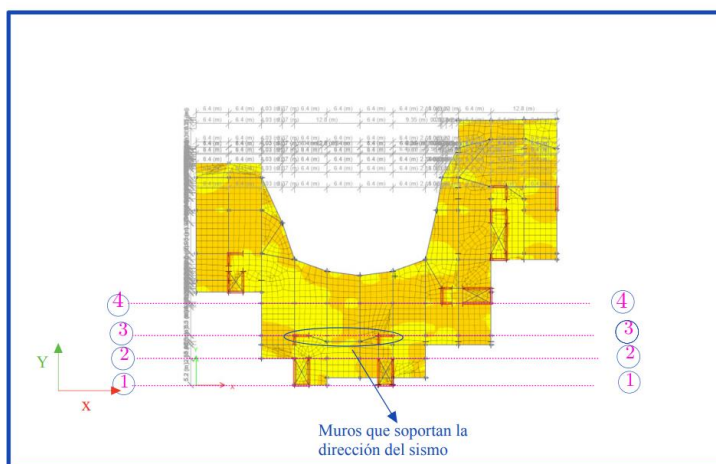


Figura 46. Vista en planta de estructura irregular del eje 3-3

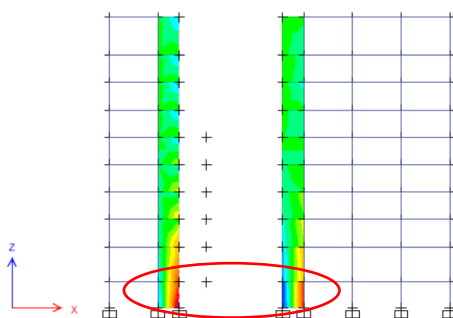
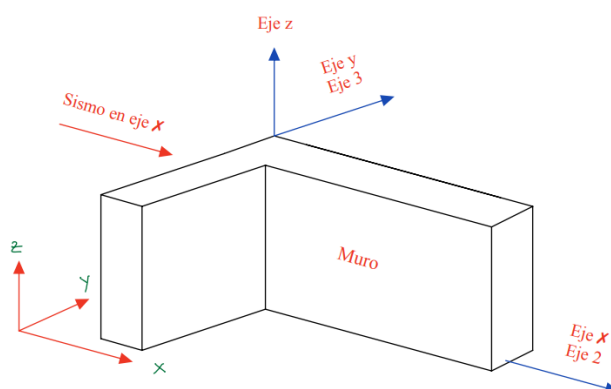


Figura 47. Demanda de momento en los muros en el eje 3-3 en estructura irregular debido al sismo.

A continuación, se muestra en la figura 48 la orientación del eje de los muros en el software ETABS. El eje 2 corresponde al eje x, y el eje 3 pertenece al y en coordenadas globales. La misma orientación de los ejes es compartida en las columnas.



En la figura 47 se muestra los muros W20 Y W12 (de izquierda a derecha en sentido x positivo, siendo el muro W20 más cercana al eje global de 0,0,0) sometidos a flexión por la acción del sismo en la dirección. El entonces, estos muros soportan los momentos que gira respecto al eje global y. Además, el cortante v_2 corresponde al eje x, y el momento flector, al eje y en coordenadas globales del programa ETABS.

Tabla 32. Muestra la magnitud de cortante y momento flector en muros para el sismo en x

Story	WallBay	Estructura regular		Estructura Irregular		$\Phi V3$	$\Phi M3$
		V2	M3	V2	M3		
		tonf	tonf-m	tonf	tonf-m		
Story1	W12	126.29	468.08	136.29	532.64	0.93	0.88
Story1	W20	110.85	455.17	122.23	520.68	0.91	0.87
Promedio						0.92	0.88

En la tabla 42 se puede observar que los muros soportan la carga de sismo en el eje global x. La razón promedio del esfuerzo cortante entre la estructura regular e irregular es de 0.92, siendo mayor el esfuerzo en la estructura irregular. Esto se debe a la asimetría en planta y elevación, lo que obliga a resistir una mayor cantidad de esfuerzo cortante (en la estructura irregular), así como el momento flector en la dirección del sismo en el eje x. Por otro lado, el valor de 0.92 para el cortante y 0.88 para el momento flector encontrado no difiere significativamente del factor de coeficiente de irregularidad propuesto por la NEC-SE-DS 2015. Además, la cantidad de muros estructurales es la misma para ambas estructuras, lo que explica la pequeña diferencia entre el factor de irregularidad de la norma y el valor hallado.

Esfuerzo de cortante y el momento flector en las columnas debido al sismo en eje x

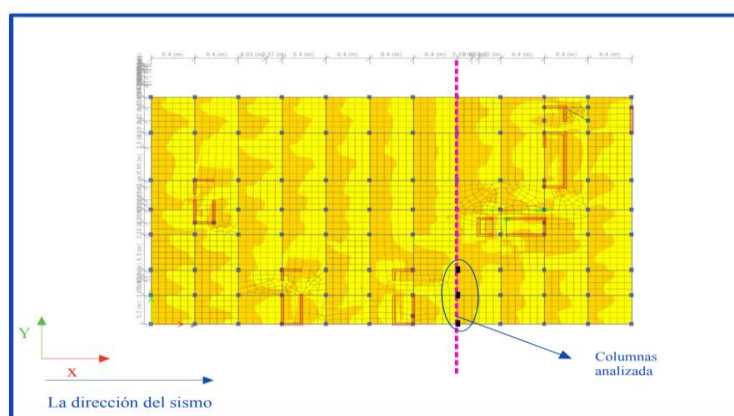


Figura 48. Eje de análisis para encontrar el cortante y el momento en las columnas.

Estructura regular, piso 6

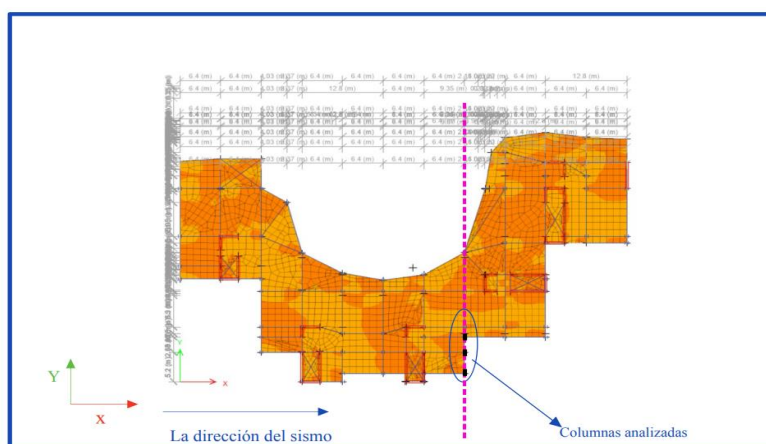


Figura 49. Eje de análisis para encontrar el cortante y el momento en las columnas.

Estructura irregular, piso 6

En la figura 46 y 47 muestran las columnas que van a hacer analizadas, se encontró que existen 3 columnas que comparte las mismas coordenadas tanto en la estructura regular e irregular.

Tabla 33. Muestra la magnitud de cortante y momento flector en columnas para el sismo en x

Story	WallBay	Estructura regular		Estructura Irregular		ΦV3	ΦM3
		V2 tonf	M3 tonf-m	V2 tonf	M3 tonf-m		
Story6	C136	6.3375	11.3965403	6.9	12.42	0.92	0.92
Story7	C139	6.8344	12.2914879	12.01	21.62	0.57	0.57
Story8	C140	9.3774	16.8458717	17.05	30.87	0.55	0.55
Promedio						0.68	0.68

En la tabla 41 se puede observar que las columnas soportan la carga de sismo en el eje global x. De manera similar al análisis de los muros, se nota que la demanda de cortante y momento flector en las columnas de la estructura irregular es mayor que en su contraparte regular, lo cual se debe a la asimetría. Al comparar los valores de cortante en las columnas de ambas estructuras, se concluye que la demanda de estos esfuerzos es menor en la estructura regular, lo que coincide con los esfuerzos observados en los muros. Esto se debe a que la geometría del edificio irregular disminuye con la altura, resultando en una menor cantidad de columnas. Sin embargo, la cantidad de muros estructurales es la misma en ambas estructuras.

Tabla 34. Cuadro de resumen de valores hallados por la comparación de respuesta dinámica de estructura regular e irregular

Valores de coeficiente analizado		
1	Coef. Irregularidad en Rigidez	0.73
2	Coef. Irregularidad en columnas por cortante	0.68
3	Coef. Irregularidad en columnas por momento volcante	0.68
4	Coef. Irregularidad en muros por cortante	0.92
5	Coef. Irregularidad en muros por momento volcante	0.88
6	Coef. Irregularidad Fuerza lateral	0.97
7	Coef. Irregularidad derivas	0.11
Coef. Promedio por análisis		0.71
Coef. Promedio por la NEC-SE-DS 20215		0.81

CONCLUSIÓN

Los resultados indican que la masa de la estructura regular supera significativamente a la de la estructura irregular. Esta diferencia se explica por las discontinuidades geométricas presentes en la estructura irregular, que la hacen más ligera. Para igualar el peso propio de ambas estructuras y determinar el factor de reducción de la carga muerta en la estructura regular, se realizaron iteraciones e interpolación lineal. Se igualó así la carga muerta en la losa de la estructura regular (incluyendo el peso propio de la losa, los muros, vigas y columnas) con la de la estructura irregular. Esto se debe a que la geometría en elevación de la estructura irregular disminuye el área bruta en altura (ver las figuras 28 y 29), reduciendo así la carga muerta en un factor del 18% en promedio por piso (ver las tablas 4 y 5), y se encontró la carga muerta reducida por piso que se aplica a la estructura regular para equiparar las masas (ver en la tabla 25).

La rigidez o la capacidad de resistencia de la estructura dependen de las propiedades geométricas y del material (hormigón armado). Por lo tanto, la estructura regular tiene una rigidez un 22% mayor en promedio que la estructura irregular, debido a su mayor cantidad de columnas debido a su simetría. Se encontró que la razón promedio entre la estructura regular e irregular es de 0.73 lo cual indica el coeficiente de irregularidad de la estructura, dado que todos los demás parámetros se mantienen constantes.

En cuanto a los valores de la fuerza lateral y la deriva inelástica máxima para cada nivel de piso en las estructuras regular e irregular. El desplazamiento entre pisos muestra poca variación, como se observa en la tabla 31. Al comparar la deriva inelástica de la estructura irregular con la regular, se encontró un valor promedio de 0.11 (11%), lo cual se atribuye a la irregularidad de la estructura, esta mínima variación se debe a que ambas estructuras tienen la misma carga sísmica reactiva (las mismas que son empleadas para determinar las fuerzas laterales en la estructura)

La razón promedio del esfuerzo cortante entre la estructura regular e irregular es de 0.92 (en este orden), siendo mayor el esfuerzo en la estructura irregular. Esto se debe a la asimetría en planta y elevación, lo que obliga a resistir una mayor cantidad de esfuerzo cortante (en la estructura irregular), así como el momento flector en la dirección del sismo en el eje x. Por otro lado, el valor de 0.92 para el cortante y 0.88 para el momento flector encontrado no difiere significativamente del factor de coeficiente de irregularidad propuesto por la NEC-SE-DS 2015. Además, la cantidad de muros estructurales es la misma para ambas

estructuras, lo que explica la pequeña diferencia entre el factor de irregularidad de la norma y el valor hallado. En cambio, en las columnas la demanda de estos esfuerzos es menor en la estructura regular, lo que coincide con los esfuerzos observados en los muros. Esto se debe a que la geometría del edificio irregular disminuye con la altura, resultando en una menor cantidad de columnas. Sin embargo, la cantidad de muros estructurales es la misma en ambas estructuras.

Finalmente, se concluye que el coeficiente de penalización de 0.9, 0.81 en total, sugerida en la NEC-SE-DS para la estructura irregular seleccionada, no resulta apropiado. Esta conclusión se basa en la comparación de las respuestas dinámicas de la estructura irregular con la misma estructura, pero forzando la regularidad. Se observa una discrepancia en las derivas, fuerzas laterales, rigidez en los pisos bajo carga sísmica, y en los esfuerzos de cortante en muros y columnas. Se sugiere que el valor óptimo del coeficiente de penalización por irregularidad debería ser aproximadamente 0.71, según la tabla 34, para estructuras asimétricas con discontinuidades geométricas en planta y elevación, así como ligeras variaciones en la alineación de los ejes de las columnas, aunque la presencia de elementos de muros en la estructura irregular permitió un mejor desempeño al eliminar la torsión producida por el sismo. Además, la estructura analizada presenta irregularidades pronunciadas, el coeficiente de penalización de 0.81 recomendado por la Norma Ecuatoriana de Construcción casi se iguala al valor hallado de 0.71. Este encontrado sugiere que para estructuras con irregularidades menos marcadas, estos factores de reducción pueden ser una herramienta para disuadir a los diseñadores de optar por este tipo de estructuras.

REFERENCIA

- Bello, O., Benítez, D., & Molina, A. (Abril de 2017). Estimando costos de un desastre. El costo en el sector productivo del terremoto de abril de 2016 en Ecuador: Una aproximación metodológica. Recuperado el 3 de 5 de 2024, de https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Bibliotecas/Libros/Estimando_Costos.pdf
- Boffi, G. (2018). *Earthquake excitation*. Milan: Dipartimento di Ingegneria Civile Ambientale e Territoriale Politecnico di Milano. Recuperado el 20 de 4 de 2024, de https://boffi.github.io/dati_2018/10/handout_e.pdf
- Chopra, A. K. (2020). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering*. Pearson Education Limited.
- De Stefano, M., & Pintucchi, B. (2008). A review of research on seismic behaviour of irregular building structures since 2002. *Bulletin of Earthquake Engineering*. doi:10.1007/s10518-007-9052-3
- Guía práctica de diseño de viviendas de 2 pisos con luces de hasta 5 metros de conformidad con la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 2015. (2015). *Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda.*, 114.
- GULPPI, D. (2015). *ANÁLISIS DE TORSIÓN ACCIDENTAL EN EDIFICIOS CON DIAFRAGMA FLEXIBLE*. Santiago de Chile: UNIVERSIDAD DE CHILE.
- IG_EPN. (1 de 11 de 2023). Mapa digital interactivo de peligro sísmico para Ecuador. Recuperado el 4 de 15 de 2024, de <https://storymaps.arcgis.com/stories/f885bc190d6442fa9fef91f8145d063e>
- Medina, C., & Medina, S. (7 de 2017). Coeficiente Irregularidad en Planta a partir del Análisis de Torsión en Estructuras Irregulares. *Universidad Técnica de Ambato*, 9. Recuperado el 20 de 4 de 2024, de http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-01292017000200051
- Norma Ecuatorina de la Construcción. (2015). PELIGRO SÍSMICO DISEÑO SISMO RESISTENTE. NEC - SE - DS.

Pranata, Y., & Milyardi, R. (Enero de 2021). The Effect of Seismic Masses in Calculation of a 17 Multi-story Concrete. ResearchGate. doi:10.5220/0010747800003113

Yepes, H., Audin, L., Alvarado, A., Beauval, C., Aguilar, J., Front, Y., & Cotton, F. (22 de 4 de 2016). A new view for the geodynamics of Ecuador: Implication in seismogenic source definition and seismic hazard assessment. *AGU Advancing Earth and Space Sciences*. doi:10.1002/2015TC003941