

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de ciencias e ingenierías

**Diseño sismorresistente de los elementos que conforman un pórtico
arriostrado concéntricamente en un edificio**

Carlos Andrés Paz Proaño

Ingeniería civil

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito para la obtención de título de

ingeniero civil

Quito, mayo del 2022

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de ciencias e ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

**Diseño sismorresistente de los elementos que conforman un pórtico
arriostrado concéntricamente en un edificio**

Carlos Andrés Paz Proaño

Nombre del profesor

Pablo Andrés Torres Rodas, Ph.D

Quito, mayo del 2022

© 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 el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Nombres y apellidos: Carlos Andrés Paz Proaño

Código: 00202152

Cédula de identidad: 1721071619

Lugar y fecha: Quito, mayo del 2022

ACLARACIÓN DE 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UNPUBLISHED DOCUMENT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>

RESUMEN

En el presente documento se presenta el diseño sismorresistente en acero de los miembros que componen un pórtico arriostrado concéntricamente (PAC) para un edificio de 6 pisos ubicado en la ciudad de Manta, Ecuador. Se comenzó determinando las cargas y los parámetros sísmicos en base a la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-15). Se utilizó el programa SAP2000 para realizar un modelo de la estructura, el cual fue modificado hasta llegar a un modelo final. Se programó un documento de Excel para realizar el cálculo del diseño por capacidad de las diagonales, vigas y columnas que componen el PAC. Se siguió el manual de diseño sísmico del American Institute of Steel Construction (AISC) y el manual de diseño sísmico de la Structural Engineers Association of California (SEAOC). El diseño de los elementos fue realizado conforme los lineamientos que dicta la AISC 360-16, AISC 341-16. Por último, se obtuvo como resultado una estructura sismorresistente que cumple con los requisitos exigidos en la NEC-15.

Palabras clave: diseño, sismorresistente, acero, pórtico, arriostrado, concéntricamente, SCBF.

ABSTRACT

This document presents the seismic-resistant steel design of the members that are part of a Special Concentrically Braced Frame (SCBF) for a 6-story building located in the city of Manta, Ecuador. The design process starts by determining the seismic loads and parameters based on the Ecuadorian Construction Standard (NEC-15). The SAP2000 program was used to build a model of the structure, which was modified until reaching a final model. An Excel document was programmed to calculate the capacity design of the braces, beams and columns that make up the SCBF. The American Institute of Steel Construction (AISC) seismic design manual and the Structural Engineers Association of California (SEAOC) seismic design manual design processes were followed. The design of the elements was carried out in accordance with the guidelines dictated by the AISC 360-16 and the AISC 341-16. The result is a seismic-resistant structure that meets the requirements of NEC-15.

Key words: design, seismic-resistant, steel, concentrically, braced, frame, SCBF.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1. Antecedentes.....	10
1.1.1. Contexto sísmico en el Ecuador	10
1.1.2. Pórticos arriostrados concéntricamente.....	11
1.1.3. Diseño por capacidad	12
1.2. Justificación	13
1.3. Objetivos.....	13
1.4. Descripción del proyecto	14
1.4.1. Descripción general.....	14
1.4.2. Definición de cargas.....	16
1.4.3. Características sísmicas.....	17
2. DESARROLLO	19
2.1. Modelado en SAP2000.....	19
2.1.1. Diseño de viguetas	19
2.1.2. Modelado preliminar de la estructura.....	22
2.2. Diseño de elementos	35
2.2.1. Diseño de diagonales.....	35
2.2.2. Diseño de vigas	41
2.2.3. Diseño de columnas	44
2.3. Modelado final.....	45
2.4. Verificación de requerimientos según NEC-15.....	46
2.4.1. Chequeo de cortante basal estático vs. dinámico	46
2.4.2. Chequeo de participación de masa modal acumulada.....	47
2.4.3. Chequeo de derivas de piso.....	47
3. CONCLUSIONES	49
4. REFERENCIAS.....	50
ANEXO 1: Tablas de cálculos de arriostramientos realizado en Excel	52
ANEXO 2: Tablas de cálculos de vigas realizado en Excel	53
ANEXO 3: Tablas de cálculos de columnas realizado en Excel.....	54
ANEXO 4: Tabla de derivas de piso completa	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de zonas sísmicas según la NEC-15	10
Figura 2. Tipos de PAC permitidos en zonas sísmicas	11
Figura 3. Disposición en planta del edificio	15
Figura 4. Disposición de los pórticos arriostrados concéntricamente.....	15
Figura 5. Espectros de aceleración elástico e inelástico para la estructura.....	18
Figura 6. Modelo de viguetas del sistema de piso	20
Figura 7. Patrones de carga para viguetas definidos en SAP2000.....	20
Figura 8. Carga lineal aplicada a las viguetas para el patrón de carga VIVA 2	21
Figura 9. Reacciones generadas por carga viva	22
Figura 10. Definición de ejes del modelo de la estructura.....	23
Figura 11. Configuración de materiales en el modelo de la estructura en SAP2000.....	23
Figura 12. Creación de autolistas para columnas y arriostramientos con sus perfiles correspondientes	24
Figura 13. Dibujo de vigas y columnas del primer piso de la estructura.....	25
Figura 14. Asignación de carga muerta 2 (izq.), carga de la fachada (centro) y carga de escaleras (der.) a la estructura	26
Figura 15. Definición de parámetros de cargas para el método de FHE	27
Figura 16. Ventana de patrones de carga incluidos en el modelo de SAP2000.....	28
Figura 17. Espectro de aceleración de diseño programado en SAP2000	30
Figura 18. Configuración del caso de carga P-Delta	30
Figura 19. Configuración del caso de carga muerta D.....	31
Figura 20. Configuración del caso de carga modal.....	32
Figura 21. Configuración del caso de carga sísmico Ex para el análisis modal espectral	32
Figura 22. Combinaciones básicas de carga para el diseño por última Resistencia	33
Figura 23. Ventana de SAP con las combinaciones de carga del modelo	34
Figura 24. Ventana de SAP con los grupos creados para el diseño preliminar de los elementos. 34	
Figura 25. Diseño preliminar por rigidez del pórtico A.....	35
Figura 26. Diseño preliminar por resistencia del pórtico A.....	36
Figura 27. Diagramas de carga axial para la combinación más crítica de carga del pórtico A	37
Figura 28. Diagrama de cuerpo libre de viga intersecada.....	42
Figura 29. Diagrama de cuerpo libre de viga no intersecada.....	42
Figura 30. Diagrama de cargas a compresión que generan las diagonales en la columna	44
Figura 31. Imagen tridimensional de la estructura en SAP2000	46
Figura 32. Ventana de SAP con los cortantes basales usados por el programa.....	47
Figura 33. Ventana de SAP con la participación de la masa modal acumulada.....	47
Figura 34. Derivas del primer piso para las cargas sísmicas analizadas.....	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cargas consideradas en la losa de piso	16
Tabla 2. Parámetros sísmicos según la NEC-15	17
Tabla 3. Factores de reducción para el cálculo del espectro de aceleración inelástico	17
Tabla 4. Cargas axiales requeridas en los arriostramientos por piso	37
Tabla 5. Selección y cálculo de capacidad de arriostramientos	52
Tabla 6. Verificación de límites de esbeltez y ductilidad de arriostramientos	52
Tabla 7. Análisis de mecanismo plástico	52
Tabla 8. Cargas requeridas para vigas	53
Tabla 9. Selección de perfiles y cálculo de capacidad de vigas	53
Tabla 10. Verificación de ductilidad y esbeltez de vigas	53
Tabla 11. Cargas requeridas para diseño de columnas	54
Tabla 12. Cálculos de diseño a compresión de columnas	54
Tabla 13. Cálculo de diseño a flexo-compresión de columnas	54
Tabla 14. Cálculo de derivas para cada piso y para las combinaciones de carga sísmica analizadas	55

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

1.1.1. Contexto sísmico en el Ecuador

El Ecuador es un país con alto peligro sísmico debido a su ubicación en el Cinturón de Fuego del Pacífico. La costa es la región ecuatoriana con la condición más crítica por estar situada más cerca de la zona de contacto entre la placa tectónica de Nazca y la Sudamericana (Quinde y Reinoso, 2016). La interacción entre estas placas genera sismos de subducción de gran magnitud como el sismo de 7.8 grados en la escala de Richter que se vivió en abril del 2016. Los efectos devastadores fueron causados no solo a causa del sismo, sino con la complicidad de errores en el diseño y construcción de muchas de las estructuras de la zona (Aguiar et al, 2016).

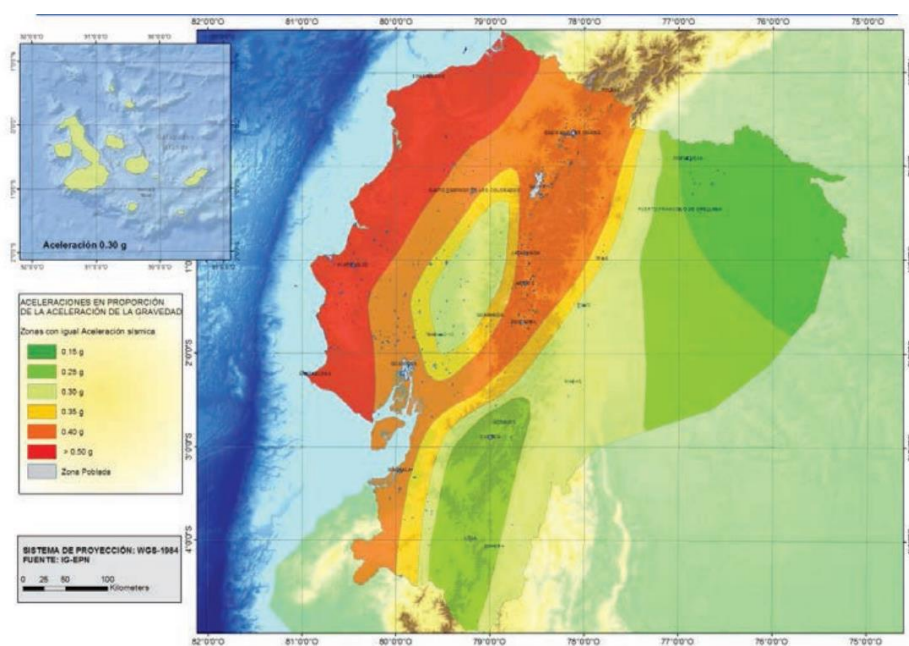


Figura 1. Mapa de zonas sísmicas según la NEC-15

Fuente: NEC-15, Peligro sísmico parte 1.

1.1.2. Pórticos arriostrados concéntricamente

Los pórticos arriostrados concéntricamente o PAC son pórticos con arriostramientos diagonales que convergen en un mismo punto. Estas diagonales están conectadas unicamente para soportar cargas axiales, por lo que tienen un comportamiento similar al de una armadura (Bruneau, Uang y Sabelli, 2011).

Surgieron a inicios del siglo XX como una alternativa para edificios medianos y pequeños. Los PAC se caracterizan por una elevada rigidez lateral que permite un adecuado control lateral de desplazamientos. La configuración de las diagonales se realiza a partir de temas estructurales, funcionales y estéticos. No obstante, por lo general desde la perspectiva arquitectónica los arriostramientos pueden generar limitaciones en cuanto al diseño. Cabe mencionar también que algunos diseños de PAC no son permitidos debido a que no presentan buen comportamiento cíclico.

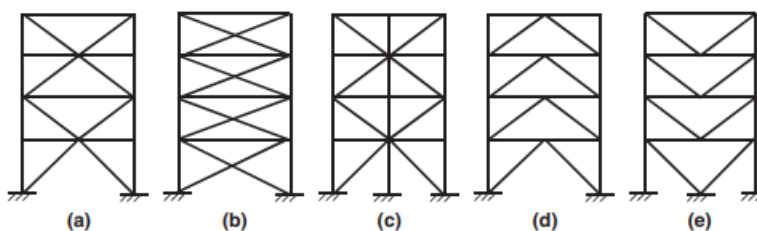


Figura 2. Tipos de PAC permitidos en zonas sísmicas

Fuente: *Ductile Design of Steel Structures*, 2011.

Las diagonales son útiles para disipar la energía histerética que genera un sismo por medio de su deformación plástica de manera estable. Para sobrevivir un sismo, los arriostramientos deben ser capaces de soportar grandes inversiones de desplazamiento inelásticas sin presentar mayor pérdida en su resistencia y rigidez (Bruneau, Uang y Sabelli, 2011). Para ello se debe hacer un

detallamiento dúctil especial, el cual es regido según la norma del Instituto Americano de Construcción en Acero AISC 341-16, en su sección F2. La norma contempla parámetros para la esbeltez global y local de la diagonal, así como del resto de elementos que componen el pórtico. El comportamiento dúctil de los PAC permite reducir las cargas sísmicas por un factor de 8 según la NEC-15, y por un factor de 6 según la ASCE-7.

Ahora se usan diagonales más esbeltas que tienen menores demandas de ductilidad en compresión. Eso provoca que la disipación de energía se dé más por fluencia a tensión de las diagonales, lo que reduce la fatiga y demora la generación de una rótula plástica. La desventaja es que habrá mayor diferencia en la resistencia a tensión y a compresión de la diagonal (Bruneau, Uang y Sabelli, 2011). Se controla la esbeltez debido a que una esbeltez global muy grande provocaría que la energía que disipa la diagonal a manera de daño sea muy baja como para presentar una respuesta sísmica efectiva. Aunque la AISC 341 no contempla un límite inferior, una esbeltez muy baja provocaría una fractura con menor ductilidad (Christopoulos y Packer, 2016).

1.1.3. Diseño por capacidad

Para realizar el diseño del PAC se aplica la filosofía de diseño por capacidad, cuyo objetivo es crear sistemas estructurales capaces de desarrollar un mecanismo plástico controlado y estable. Para ello, primero se debe escoger un modo de falla estable de la estructura. Se selecciona el elemento que va a permitir esa falla y se lo diseña para satisfacer con las fuerzas requeridas típicamente de un análisis elástico. Posteriormente se calcula la resistencia del elemento seleccionado para que falle. Por último, y se diseña el resto de los elementos considerando como demanda la capacidad máxima del elemento que debe fallar.

Otra manera de entenderlo es por medio de la frase: “una cadena es tan fuerte como su eslabón más débil”. En una estructura es igual: se tienen vigas, columnas, en este caso diagonales, etc. Se quiere evitar que el eslabón más débil sean las vigas, columnas o conexiones, y por el contrario se elige a las diagonales como el eslabón más débil. Se diseñan las diagonales para que sean los elementos que fallen, pero que sea un daño dúctil y controlado.

Se calcula la capacidad máxima de la diagonal, y se diseña el resto de los elementos para que se mantengan en rango elástico ante las fuerzas que transmitirían las diagonales en su máxima capacidad. Con eso se consigue que las diagonales plastifiquen, pero se evita que un colapso de la estructura. Es decir, las diagonales actuarían como fusibles de la estructura (Christopoulos y Packer, 2016).

1.2. Justificación

Tomando en cuenta el contexto sísmico en la costa ecuatoriana, así como la solución estructural que constituyen los pórticos arriostrados concéntricamente, este proyecto tiene como intención implementar esta solución en el diseño estructural de un edificio a construirse en la ciudad de Manta, Ecuador. Con ello se presenta una alternativa en el diseño y construcción de estructuras similares que puedan tener un comportamiento dúctil y sobre todo seguro ante sismos que seguramente vendrán en el futuro.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Diseñar los elementos que conforman un pórtico arriostrado concéntricamente (arriostramientos, vigas y columnas) de acuerdo con las normas AISC 341-16, AISC 360-16 y NEC-15.

1.3.2. Objetivos específicos

- Modelar en SAP200 el sistema de piso de Steel Deck con viguetas en una dirección para extraer las cargas que transmiten a la estructura.
- Realizar un modelo preliminar de la estructura en SAP2000 con el fin de extraer las cargas para el diseño del pórtico arriostrado concéntricamente.
- Programar un documento de Excel guiándose en el manual de diseño sísmico de la AISC y el manual de diseño sísmico de la asociación de ingenieros estructurales de California (SEAOC).
- Diseñar los arriostramientos, vigas y columnas con el programa de Excel, verificando que cumplan con los requerimientos de la AISC 360-16 y AISC 341-16.
- Obtener el modelo de la estructura con los elementos diseñados y verificar que cumpla con los chequeos de derivas, participación de masa modal y cortante basal de acuerdo con la NEC-15.

1.4.Descripción del proyecto

1.4.1. Descripción general

La estructura que se realiza en este proyecto es un edificio de oficinas de 6 pisos ubicado en la ciudad de Manta, Ecuador. Este edificio está hecho en acero realizada con pórticos arriostrados concéntricamente, por lo que según la NEC-15, está dentro de la categoría de pórticos especiales sismorresistentes de acero laminado en caliente. Tiene una disposición en planta bisimétrica que tiene 7 luces de 6 metros por eje, que genera una longitud máxima de 42 metros por lado. La altura entre ejes de piso es de 4 metros, espacio suficiente para colocar instalaciones y acabados.

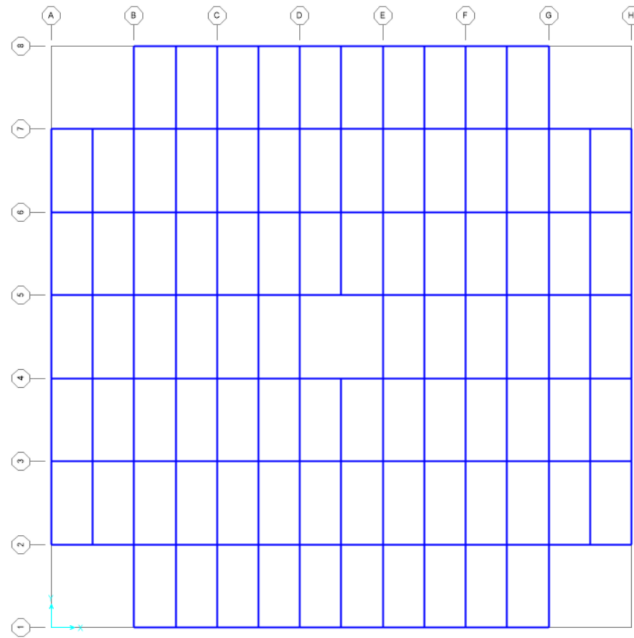


Figura 3. Disposición en planta del edificio

El sistema de arriostramientos es en V y V invertida, sobre todo para contrarrestar las cargas desbalanceadas que generan las diagonales. Se colocaron dos PAC por lado de la estructura simétricamente para mantener el centro de masa y de rigidez cerca y así evitar efectos torsionales.

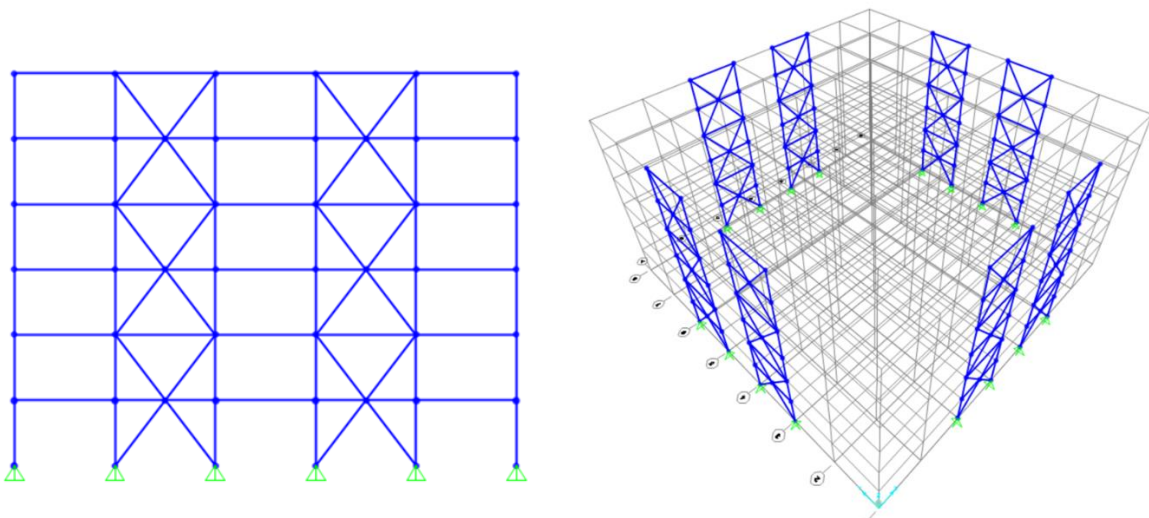


Figura 4. Disposición de los pórticos arriostrados concéntricamente

La sección utilizada para las diagonales es de tipo HSS circular, en acero ASTM A500 grado B. Para vigas y columnas se usó secciones tipo W con acero A992 grado 50, y para conexiones acero A36.

El sistema de piso consiste en una losa en Steel deck soportado sobre viguetas en una dirección. Las viguetas están ubicadas en el medio de las luces. La losa tiene en el centro del edificio una abertura para la colocación de gradas y ascensor. Cabe recalcar que no se consideró que el sistema de piso forme parte del sistema estructural, por lo que se diseñó únicamente para soportar cargas gravitacionales.

1.4.2. Definición de cargas

Se presenta un desglose de las cargas que se consideraron tanto del peso de la losa como de la sobrecarga. Estas cargas fueron extraídas de la NEC-15. Para el peso de la losa como tal (Steel deck) se realizó un diseño preliminar.

SOBRECARGA PERMANENTE		
Steel deck	250	kg/m ²
Mampostería	220	kg/m ²
Acabados piso	40	kg/m ²
Instalaciones	30	kg/m ²
Cielo raso	20	kg/m ²
Sobrecarga	20	kg/m ²
Total	580	kg/m ²
CARGA VIVA		
Edificio de oficinas	240	kg/m ²

Tabla 1. Cargas consideradas en la losa de piso

Estas cargas por área son posteriormente transformadas a cargas lineales por el método de áreas aferentes.

1.4.3. Características sísmicas

Para las características sísmicas se siguieron los parámetros descritos en la NEC-15.

Considerando que la estructura está en Manta y asumiendo un suelo tipo D, se tienen los parámetros de la tabla.

PARAMETROS		
Provincia	Manabí	
Ciudad	Manta	
Zona Sísmica	VI	
Factor z	0.5	g
Tipo de suelo	D	
n	1.8	
r	1	

Tabla 2. Parámetros sísmicos según la NEC-15

En la siguiente tabla se presenta la información para calcular el espectro de aceleración inelástico. Tiene factor de importancia I de 1 dado que es una estructura no esencial. Igualmente tiene un factor de reducción R de 8 debido a su ductilidad. Se considera únicamente irregularidad en planta debido a las esquinas, pero no hay irregularidad en elevación. Estos datos igualmente son usados para el cálculo del periodo estructural aproximado.

FACTORES DE REDUCCIÓN	
R	8
Irregularidad en Planta	si
ϕ_p	0.9
Irregularidad en Elevación	no
ϕ_e	1
Factor reducción	7.2
I	1

Tabla 3. Factores de reducción para el cálculo del espectro de aceleración inelástico

Con todos los valores definidos, se procede a calcular el espectro de aceleración elástico e inelástico utilizando las 3 ecuaciones de S_a presentadas en la parte 1 de peligro sísmico de la NEC.

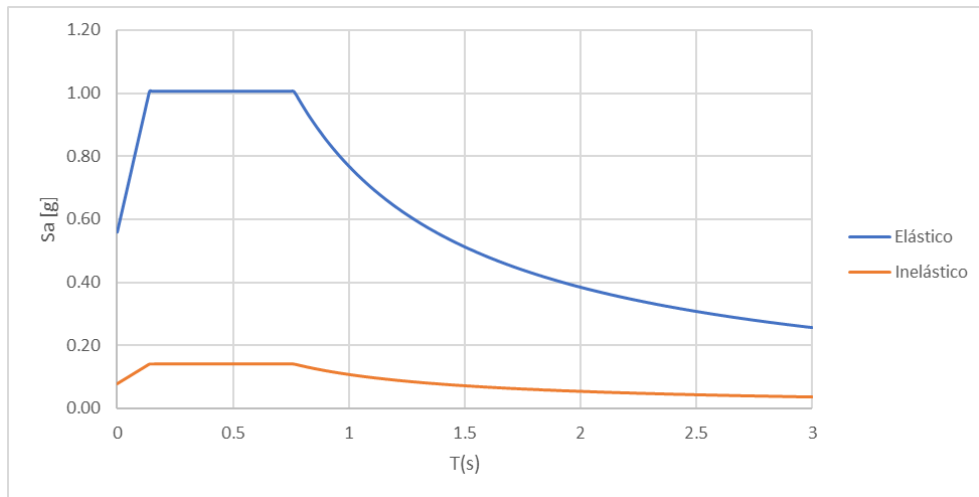


Figura 5. Espectros de aceleración elástico e inelástico para la estructura

2. DESARROLLO

2.1. Modelado en SAP2000

El modelado en SAP se compone de distintas secciones. Por un lado, está el diseño de las viguetas, que serán las que soporten el peso de la losa y toda la sobrecarga. Posteriormente se pasa al modelo para el diseño de las diagonales, que servirá como iteración para obtener cargas preliminares de diseño. Por último, está el modelo final que incluye los elementos ya diseñados. A este diseño se le realizarán los chequeos correspondientes para verificar que cumpla con las condiciones dadas en la NEC-15.

2.1.1. Diseño de viguetas

El sistema de piso incluye viguetas en una dirección que están colocadas en el medio de la luz, es decir, a 3 m. de distancia de cada viga.

2.1.1.1. Definición de parámetros iniciales

Estos elementos soportarán únicamente carga gravitacional, debido a que no pertenecen al sistema estructural sismorresistente. Para este modelo, se define la grilla de la misma manera que para el edificio principal. Para las viguetas se usará acero A992 con las propiedades que se muestra en la imagen. Para las secciones de las viguetas se usarán perfiles en I tipo W, por lo que se deberá importar todas las secciones dadas por la AISC para que SAP las use para diseño. Posteriormente, se define una autolista que será útil al momento de diseño. Para mayor detalle en el procedimiento referirse a la sección de modelado de la estructura.

2.1.1.2. Dibujo de viguetas

Se tienen tres distintos tipos de viguetas, según su longitud acorde con el modelo del edificio.

Estas viguetas estarán simplemente apoyadas sobre las vigas cargueras, por lo que en el modelo se define de esta manera.

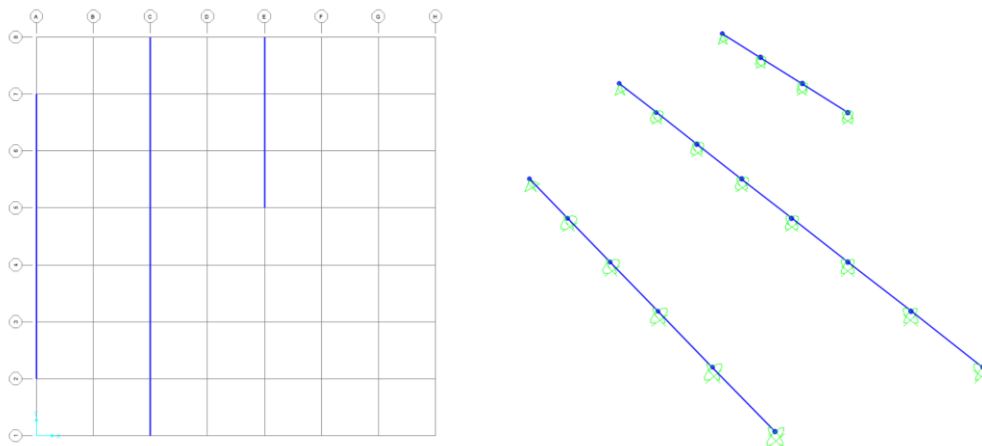


Figura 6. Modelo de viguetas del sistema de piso

2.1.1.3. Patrones de carga para viguetas

Las viguetas soportarán tres cargas distintas, que son su peso propio (muerta 1), la carga muerta sobreimpuesta (muerta 2) y la carga viva que se definieron previamente. Dado que la norma exige generar el efecto más adverso de estados de carga, se definieron tres estados de carga en que se coloca distintamente la carga viva, ya sea con todas las luces cargadas o alteradamente.

Load Pattern Name	Type	Self Weight Multiplier	Auto Lateral Load Pattern
MUERTA 1	Dead	1	
MUERTA 1	Dead	1	
MUERTA 2	Dead	0	
VIVA 1	Live	0	
VIVA 2	Live	0	
VIVA 3	Live	0	

Figura 7. Patrones de carga para viguetas definidos en SAP2000

Se deben considerar las áreas aferentes para cada vigueta (la mitad de la luz hacia cada lado de la vigueta). Para ello se toma la carga por área, se multiplica por el ancho del área aferente de la vigueta y se obtiene una carga lineal. Las cargas lineales son aplicadas directamente en las viguetas.

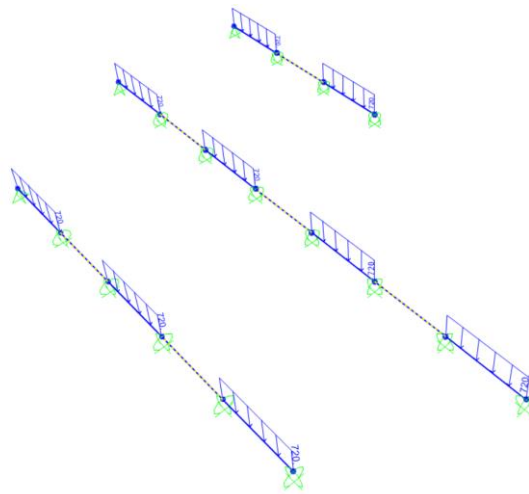


Figura 8. Carga lineal aplicada a las viguetas para el patrón de carga VIVA 2

2.1.1.4. Combinaciones de carga

Para la combinación de cargas se utilizaron las dadas por la NEC-15. Dadas las cargas que se tienen, las que rigen son $1.4D$ y $1.2D+1.6L$. Cabe mencionar que se realiza una envolvente para los tres estados de carga viva, con el fin de obtener las mayores cargas.

2.1.1.5. Diseño y obtención de reacciones

Se utilizan las herramientas de SAP para el diseño de las viguetas. Con ello se obtiene la sección que puede soportar las cargas vivas y muertas. Todas las viguetas tienen la misma sección. Una vez que se tienen las secciones definidas, se pueden extraer las reacciones de las viguetas, que serán transmitidas al resto de la estructura a través de cargas puntuales. Se extraen las reacciones

para cargas vivas y muertas por separado debido a que en el modelo del edificio completo se deberán colocar en diferentes patrones de carga.

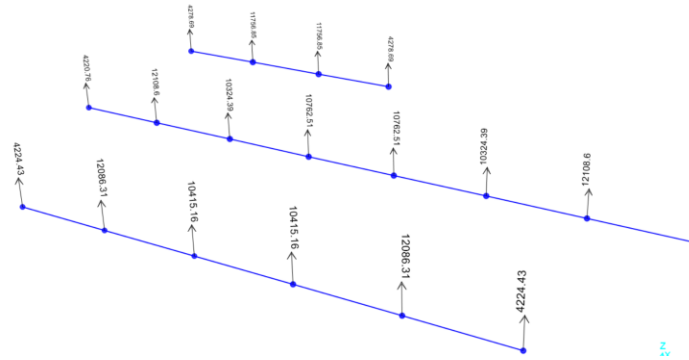


Figura 9. Reacciones generadas por carga viva

2.1.2. Modelado preliminar de la estructura

Para el modelo del edificio los pasos iniciales son los mismos que para el diseño de viguetas, pero con distintas características. No obstante, en esta sección se lo describirá un tanto más detallado. Cabe recalcar que, al ser un diseño preliminar, los resultados del diseño de este modelo serán iterados con los programas de Excel para cumplir el diseño por capacidad.

2.1.2.1. Definición de grilla

Se comenzó con la misma grilla que en para las viguetas. En esta sección se deben colocar las dimensiones esenciales de la estructura. Debido a que es una estructura simétrica de 7 luces por lado, se tienen 8 ejes en X y Y, con espaciamiento de 6 metros entre ellos. En Z se tienen 6 líneas acorde con el número de pisos, con una altura entre pisos definida de 3.90 m.

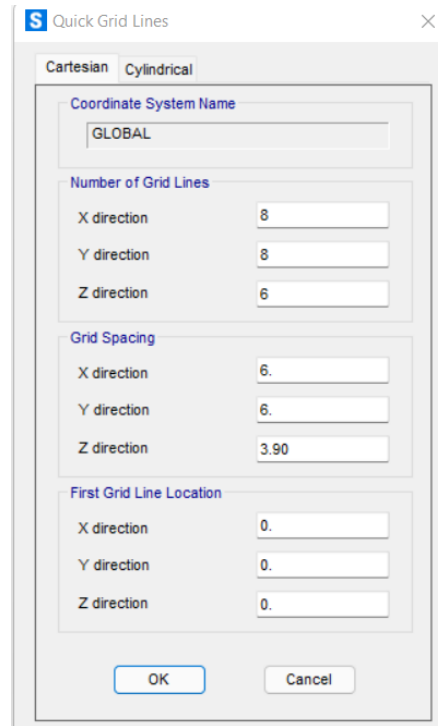


Figura 10. Definición de ejes del modelo de la estructura

2.1.2.2. Definición de materiales

Para este modelo se utilizan dos materiales. Las vigas y columnas son diseñadas con acero A992 grado 50, mientras que las secciones HSS circulares se diseñan con acero A500 grado B. Estos dos aceros tienen distintos esfuerzos de fluencia y se usan típicamente en la construcción.

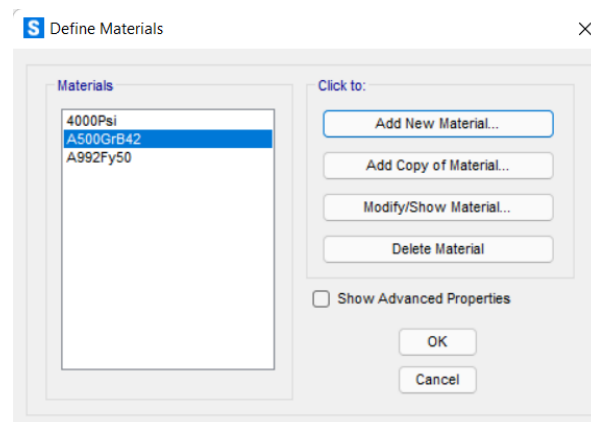


Figura 11. Configuración de materiales en el modelo de la estructura en SAP2000

2.1.2.3. Definición de secciones

Como se definió previamente, vigas y columnas son diseñadas con la misma sección tipo W, mientras que las diagonales son diseñadas con una sección circular tipo HSS. En cada caso se deben importar la lista de secciones de la AISC. Posteriormente se crean las autolistas para vigas, columnas y arriostramientos, que incluirán todas las secciones que el programa utilice al momento de diseñar los elementos. El diseño de vigas y columnas será preliminar y servirá como punto de inicio para el diseño por capacidad.

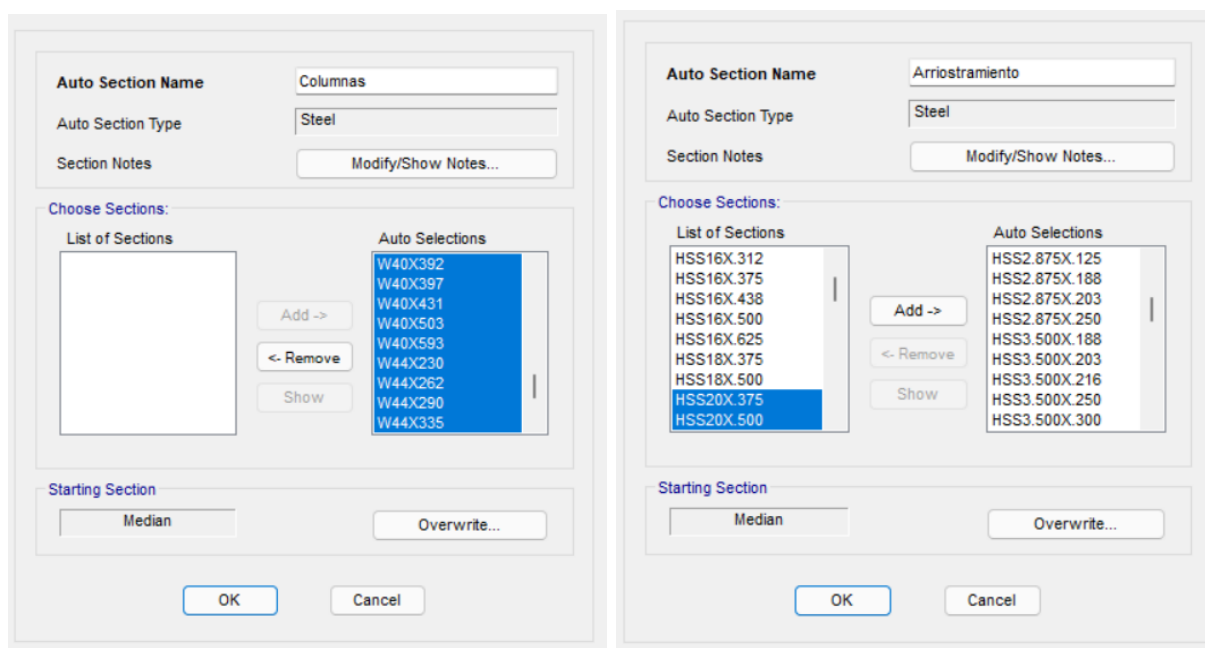


Figura 12. Creación de autolistas para columnas y arriostramientos con sus perfiles correspondientes

Para los arriostramientos se seleccionan únicamente los perfiles que cumplan con el criterio de ductilidad dado en la AISC 341-16, que para este caso define que D/t no puede superar 26.14. Esto permite ahorrarse un paso al momento de verificar los requisitos de ductilidad al momento de diseñar con el programa de Excel.

2.1.2.4. Dibujo de vigas y columnas

Para el dibujo de los elementos se considera el tipo de sección (viga o columna) y se definen las restricciones en los extremos. Las vigas se diseñan únicamente con conexiones a cortante (pinned), mientras que las columnas se diseñan como continuas.

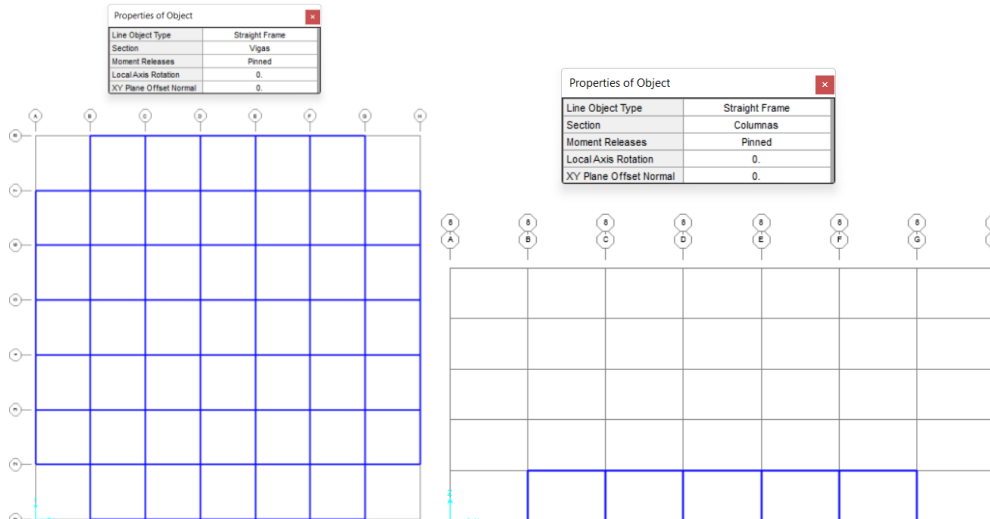


Figura 13. Dibujo de vigas y columnas del primer piso de la estructura

En los pórticos arriostrados, las diagonales y vigas en el plano deben conectarse al alma de la sección W de las columnas para que el pórtico actúe con el eje fuerte ante las cargas axiales de las diagonales. Por ello, se debe rotar 90 grados la orientación de ciertas columnas dibujadas en el modelo.

2.1.2.5. Patrones de carga

2.1.2.5.1. Cargas vivas y muertas

La carga muerta considerada se divide en 4 patrones de carga, que incluye el peso propio de los elementos (muerta 1), la carga muerta proveniente de las viguetas calculado en la sección previa (muerta 2), la carga de la fachada (muerta 3), y la carga de las escaleras que se colocarán en el

centro del edificio (muerta 4). Se crea también un patrón de carga viva. Una vez que se termina con la asignación de cargas a la estructura, se procede a replicar 6 veces el piso dado que tienen la misma configuración. En este caso no se considerará una carga distinta para la cubierta del edificio al asumir que se usará como área recreativa con similares solicitudes de carga.

La carga muerta 2 y viva se colocan como cargas distribuidas en las vigas paralelas a las viguetas y como cargas puntuales (provenientes del modelo de viguetas) en las vigas perpendiculares. Se coloca la mitad de estas cargas en las vigas exteriores y laterales al hueco. La carga de la fachada se asigna en las vigas laterales de la estructura, y la carga de las escaleras en la ubicación adecuada.

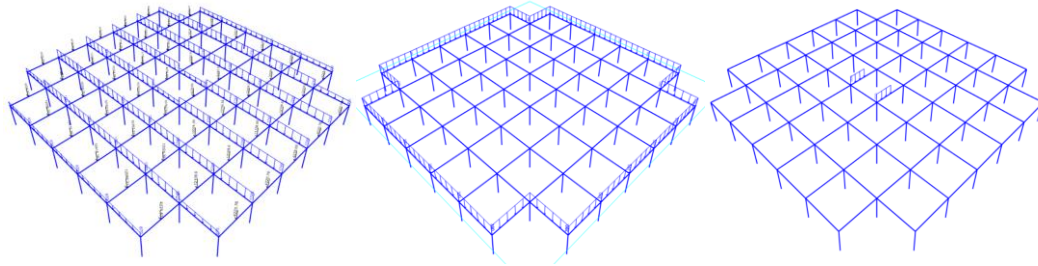


Figura 14. Asignación de carga muerta 2 (izq.), carga de la fachada (centro) y carga de escaleras (der.) a la estructura

2.1.2.5.2. Cargas ficticias

Estas cargas se colocan con la finalidad de considerar imperfecciones en la estructura. Se consideran como el 0.2% de la carga muerta o viva. Se consideran cargas ficticias en el eje X y Y para cada carga muerta y viva.

2.1.2.5.3. Cargas para método de fuerza horizontal equivalente (FHE)

Se crean estas cargas dado que la norma exige una comprobación que se realizará en pasos posteriores entre el modelo sísmico por el método de la fuerza horizontal equivalente y el análisis modal espectral. Estas cargas son de tipo quake.

Se deben configurar estas cargas considerando la aceleración S_a del espectro de diseño correspondiente al periodo de vibración (T) de la estructura calculado en base a la sección 6.3.3. de la NEC. Para SAP2000 este sería el coeficiente C . Igualmente, el factor K es el calculado con la ecuación que da la NEC.

Figura 15. Definición de parámetros de cargas para el método de FHE

En la siguiente figura se presenta la ventana de patrones de carga de SAP2000 que se describen en esta sección. Debido al tamaño de la ventana únicamente se pueden ver los patrones de carga ficticia y de FHE.

Load Pattern Name	Type	Self Weight Multiplier	Auto Lateral Load Pattern
FHEX	Quake	0	User Coefficient
Ficticia1y	Notional	0	Auto
Ficticia2x	Notional	0	Auto
Ficticia2y	Notional	0	Auto
Ficticia3x	Notional	0	Auto
Ficticia3y	Notional	0	Auto
Ficticia4x	Notional	0	Auto
Ficticia4y	Notional	0	Auto
Ficticia5x	Notional	0	Auto
Ficticia5y	Notional	0	Auto
FHEX	Quake	0	User Coefficient
FHEy	Quake	0	User Coefficient

Figura 16. Ventana de patrones de carga incluidos en el modelo de SAP2000

2.1.2.6. Dibujo de arriostramientos

Se dibujan los dos PAC por cara del edificio como se mostró en la figura 4. Las diagonales son dibujadas en forma de V o V invertida y unicamente tienen restricciones a desplazamientos, pero no a momentos.

2.1.2.7. Configuración de otros parámetros de diseño

Se definen distintos parámetros adicionales que permiten asemejar el modelo a una estructura real.

2.1.2.7.1. Definición de apoyos en bases de la columna

Se consideran apoyos de segundo grado en las bases de la columna. Esto indica que las bases son restringidas a desplazamientos en los tres ejes, pero no tienen restricciones a momentos. Esta es una representación válida de la realidad. Las bases de la columna y cimentaciones salen del alcance de este proyecto y no serán diseñadas.

2.1.2.7.2. Diafragma rígido

Se considera que la losa de cada piso actúa como diafragma rígido. Esta es una consideración válida debido a que la losa es regular. Se define un diafragma rígido por cada piso de la estructura.

2.1.2.7.3. Offsets

Se toma en cuenta una zona rígida hacia cada lado de los nodos para contemplar el ancho de vigas y columnas y la rigidez que se genera en las conexiones.

2.1.2.7.4. Mass source

Se define la mass source, que será de utilidad para SAP2000 para realizar el análisis modal espectral. Se consideran todas las cargas muertas de la estructura para su definición.

2.1.2.7.5. Espectro de aceleración de diseño

Este es el mismo espectro elástico que se define con los datos sísmicos presentados en la sección 1.4.3. del presente documento. Se Deben ingresar los mismos datos en SAP para que este lo use en el análisis modal espectral. Se configura con un factor R de 1 dado que el diseño por rigidez se realiza con el espectro elástico. Para el diseño por resistencia se dividen las cargas sísmicas para un $R=6$, dado que se considera para este diseño el espectro inelástico.

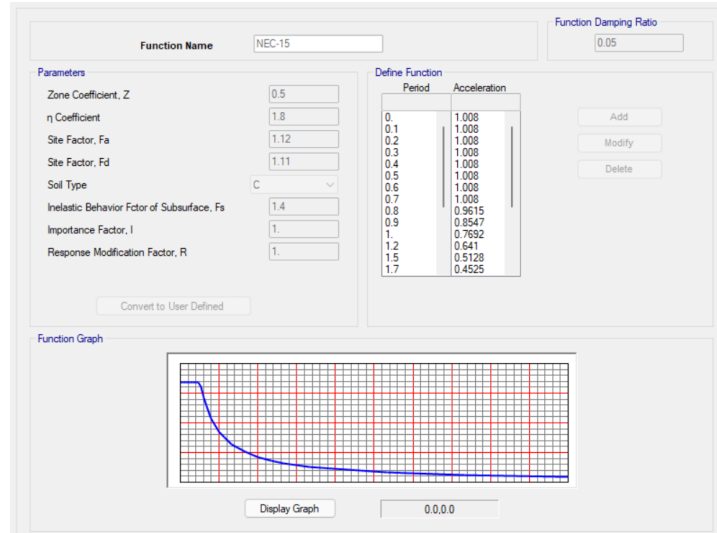


Figura 17. Espectro de aceleración de diseño programado en SAP2000

2.1.2.8. Casos de carga

2.1.2.8.1. Caso P-Delta

Se crea este caso con la finalidad de que el modelo considere los efectos por deformaciones no lineales P-Delta.

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	MUERTA1	1.2
Load Pattern	MUERTA2	1.2
Load Pattern	MUERTA3	1.2
Load Pattern	MUERTA4	1.2
Load Pattern	VIVA	1.

Figura 18. Configuración del caso de carga P-Delta

2.1.2.8.2. Casos estáticos lineales

Se crean los casos donde se unifican las cargas muertas en una carga D y las cargas por imperfecciones en una carga ND o NL. Asimismo, se crean casos de carga para carga viva L y para sismos FEx, FEy. En todos estos casos de carga se consideran los efectos P-Delta que generarán una reducción en la rigidez de los elementos.

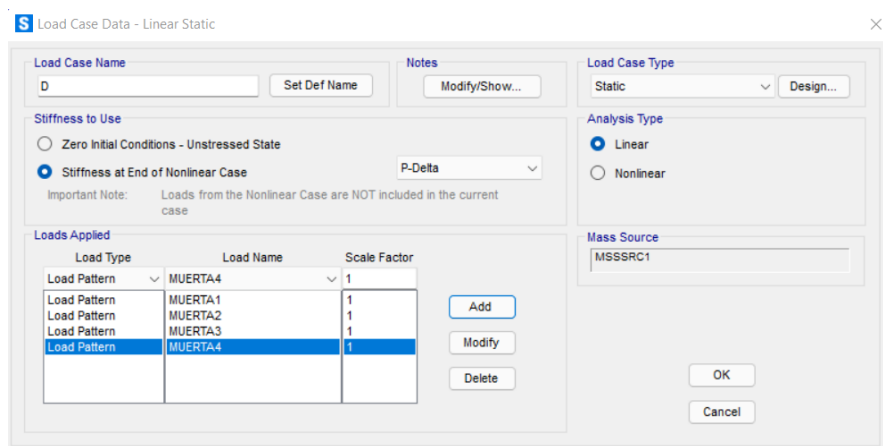


Figura 19. Configuración del caso de carga muerta D

2.1.2.8.3. Caso modal

Se crea este caso modal con la finalidad de obtener el periodo de vibración de la estructura a través del análisis modal espectral. En este caso se configura inicialmente para 12 modos de vibración. También se deberá comprobar más adelante que con estos modos de vibración se alcance una participación de la masa modal acumulada de al menos 90%.

Load Case Name: Modal

Load Case Type: Modal

Stiffness to Use: Stiffness at End of Nonlinear Case (P-Delta)

Number of Modes: Maximum Number of Modes: 12, Minimum Number of Modes: 1

Other Parameters: Allow Automatic Frequency Shifting

Mass Source: MSSSRC1

Figura 20. Configuración del caso de carga modal

2.1.2.8.4. Casos Ex y Ey para análisis modal espectral

Estos casos de carga son de tipo espectro de respuesta. Para la aplicación de cargas se coloca el espectro de diseño configurado previamente, con un factor de 9.81 dado que el espectro de aceleración tiene gravedades como unidad. Estos casos se usarán para el análisis modal espectral y para el diseño de elementos.

Load Case Name: Ex

Load Case Type: Response Spectrum

Modal Combination: CQC (GMC f1: 1.0, GMC f2: 0.0)

Directional Combination: Absolute (Scale Factor: 1)

Mass Source: Previous (MSSSRC1)

Modal Load Case: Standard - Acceleration Loading

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	NEC-15	9.81

Figura 21. Configuración del caso de carga sísmico Ex para el análisis modal espectral

2.1.2.9. Combinaciones de carga

Las combinaciones de carga que se utilizan para este modelo son las dadas por la NEC-15. Si bien en términos generales son similares a las utilizadas por las normas en la AISC tomadas de la ASCE-7, la manera de calcular las condiciones sísmicas no es igual. Es por ello por lo que se optó por diseñar con la norma ecuatoriana. Las combinaciones más críticas que se considerarán son la 1, 2, y 5.

<u>Combinación 1</u>
1.4 D
<u>Combinación 2</u>
1.2 D + 1.6 L + 0.5max[L _r ; S ; R]
<u>Combinación 3*</u>
1.2 D + 1.6 max[L _r ; S ; R] + max[L ; 0.5W]
<u>Combinación 4*</u>
1.2 D + 1.0 W + L + 0.5 max[L _r ; S ; R]
<u>Combinación 5*</u>
1.2 D + 1.0 E + L + 0.2 S
<u>Combinación 6</u>
0.9 D + 1.0 W
<u>Combinación 7</u>
0.9 D + 1.0 E

Figura 22. Combinaciones básicas de carga para el diseño por última Resistencia

Fuente: NEC-15, cargas no sísmicas

Debido a que el sismo puede afectar en cualquier dirección y sentido a la estructura, se deberían tener 4 combinaciones de carga por cada cuadrante del plano XY, formando un total de 12 combinaciones de carga. No obstante, debido a que la estructura es simétrica en los dos ejes, basta con considerar 4 combinaciones de carga sísmica: Ex, Ey, Ex+0.3Ey y Ey+0.3Ex.

Se deben crear combinaciones de carga donde se dividen las cargas sísmicas para el factor R y otras en que no, para los diseños por resistencia y rigidez, respectivamente.

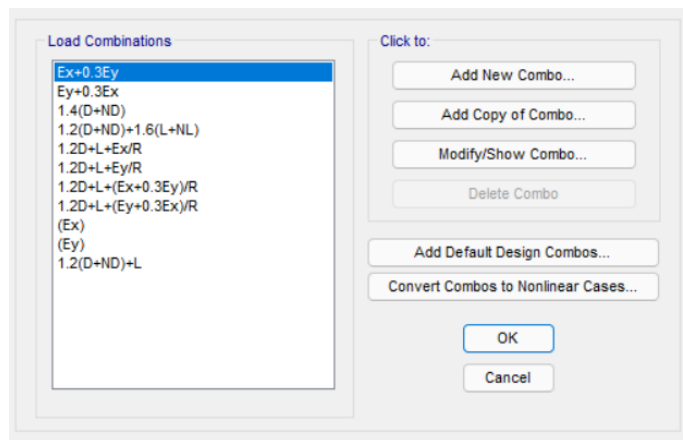


Figura 23. Ventana de SAP con las combinaciones de carga del modelo

2.1.2.10. Definición de grupos

Este modelo permite el diseño únicamente de las diagonales y columnas de gravedad. Sin embargo, como se mencionó antes se crean grupos para columnas y vigas exteriores e interiores con el fin de hacer un predimensionamiento que después es verificado con el programa en Exel.

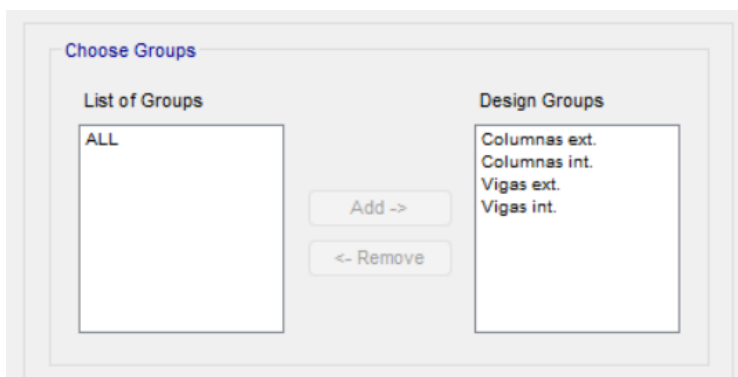


Figura 24. Ventana de SAP con los grupos creados para el diseño preliminar de los elementos

2.2. Diseño de elementos

2.2.1. Diseño de diagonales

2.2.1.1. Diseño por rigidez en SAP2000

Esta primera iteración se realiza para que el modelo cumpla con las derivas que exige la NEC con las secciones más pequeñas posibles. Para ello, se debe configurar adecuadamente la ventana de parámetros de diseño en SAP2000 con el fin de que el programa diseñe para rigidez. Este diseño debe realizarse utilizando las combinaciones sísmicas que no tengan R. Adicionalmente deben configurarse los desplazamientos objetivo (displacement targets).

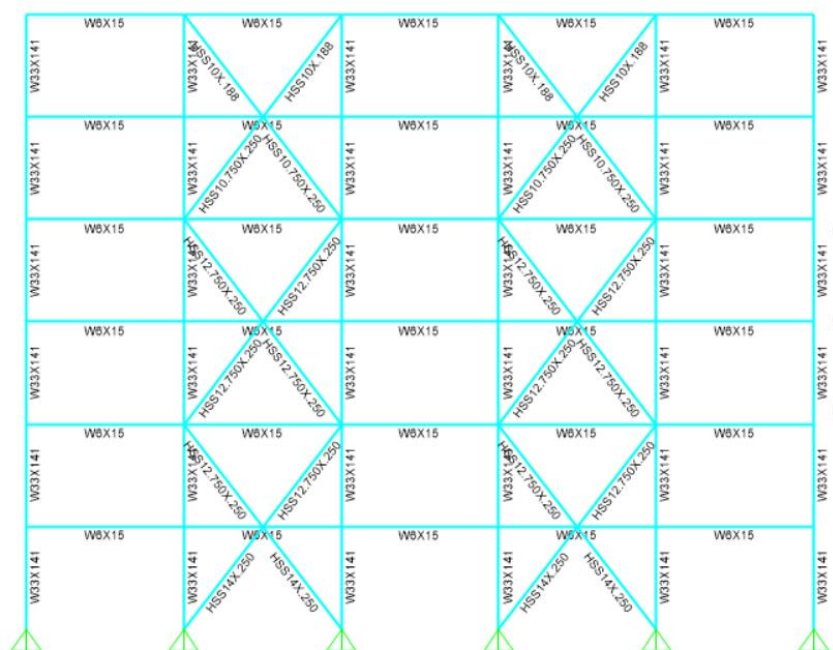


Figura 25. Diseño preliminar por rigidez del pórtico A

Como se puede ver en la figura, el programa arroja secciones que permiten cumplir con las derivas máximas.

2.2.1.2. Diseño por resistencia en SAP2000

Esta segunda iteración se realiza para que SAP2000 diseñe los elementos por resistencia. Se reconfigura la ventana de parámetros de diseño de acero. Se seleccionan para el diseño las combinaciones con las cargas mayoradas y las combinaciones con carga sísmica que consideren el factor R. De esta iteración se pueden extraer las secciones de las diagonales y de las columnas no pertenecientes al PAC.

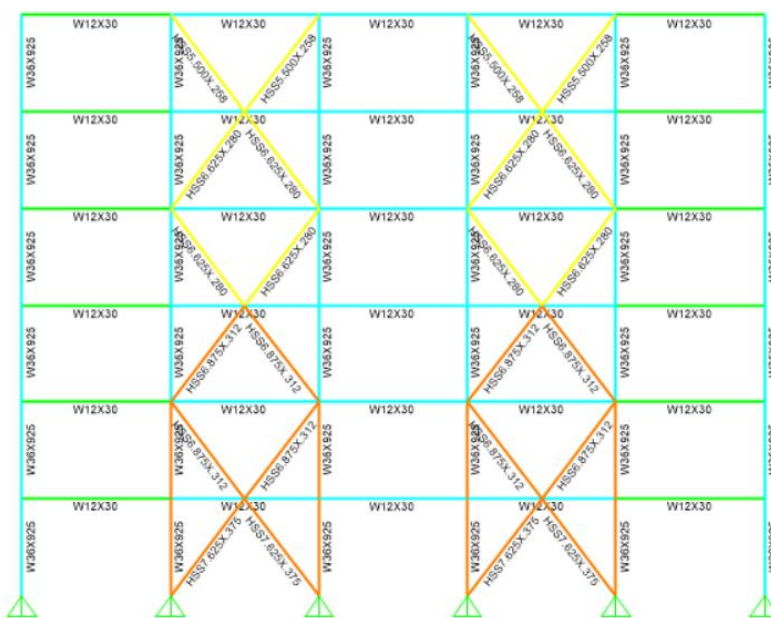


Figura 26. Diseño preliminar por resistencia del pórtico A

Los colores de los elementos van de acuerdo con su relación demanda/capacidad. El color naranja, por ejemplo, indica que el elemento tiene una relación demanda/capacidad entre 0.9 y 1.0.

2.2.1.3. Diseño en Excel

Se introdujeron las secciones de los arriostramientos del diseño por resistencia de SAP200 en el documento programado en Excel para verificar que efectivamente cumplan con todos los requerimientos. Para ello, se tomaron las fuerzas de tensión y compresión resultado del programa de SAP2000 de la combinación más crítica. Se presentará el procedimiento de cálculo del arriostramiento del piso 1, tomando la sección HSS8.625X0.375. El resto de cálculos está incluido en el Anexo 1.

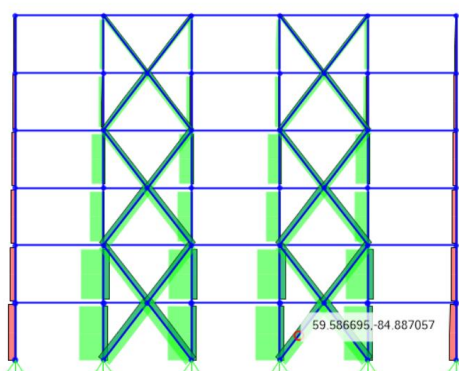


Figura 27. Diagramas de carga axial para la combinación más crítica de carga del pórtico A

Se procesaron los resultados para obtener las cargas axiales requeridas a tensión y a compresión tabuladas de la siguiente manera.

Piso	Pu Compresión (Ton)	Pu Tensión (Ton)
6	31.03	33.64
5	48.05	42.73
4	52.97	47.03
3	63.43	50.19
2	74.41	63.35
1	94.62	85.22

Tabla 4. Cargas axiales requeridas en los arriostramientos por piso

2.2.1.3.1. Capacidad del arriostramiento y verificación de ductilidad

El cálculo de las diagonales se centra en revisar que la sección sea adecuada tanto para cargas a tensión como a compresión del elemento. Para las cargas a tensión, se usó la ecuación

$$\phi P_{n-T} = 0.9 F_y A_g$$

En donde F_y es el esfuerzo de fluencia del acero A500 y A_g es el área total de la sección transversal. El F_y es de 2953 kg/cm².

$$\phi P_{n-T} = 0.9 (2953)(58.5) = 155.48 \text{ Ton}$$

Posteriormente, para la resistencia a la compresión se consideran los efectos de pandeo. Por ende, se calcula el esfuerzo crítico de Euler, donde E es el módulo de elasticidad del acero, kl es la longitud efectiva considerando un valor de $k=1.0$, y r es el radio de giro de la sección. En este caso, al ser una sección circular, el radio de giro es el mismo para cualquier eje.

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{kl}{r}\right)^2} = \frac{\pi^2 (2038900)}{\left(\frac{492}{7.44}\right)^2} = 4601 \text{ kg/cm}^2$$

Para determinar el pandeo global, se debe primero calcular el límite que divide el pandeo elástico del inelástico con la ecuación

$$\lambda_{lim} = 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 123.8$$

En donde se utilizan las siguientes ecuaciones según la esbeltez global del elemento.

$$\begin{cases} F_{cr} = 0.877 F_e, & \lambda > \lambda_{lim} \\ F_{cr} = 0.658 \frac{F_y}{F_e} F_y, & \lambda < \lambda_{lim} \end{cases}$$

Como en este caso , $\lambda = \frac{kl}{r} = 66.1$, $F_{cr} = 0.658^{\frac{2953}{4601}} (2953) = 2257 \text{ kg/cm}^2$

Con estos valores se calcula la compresión como:

$$\phi P_{n-c} = 0.9 F_{cr} A_g = 0.9(2257)(58.5) = 118.9 \text{ Ton}$$

Comparando con las cargas requeridas y calculando la relación demanda/capacidad, se obtiene un valor de 0.80 a compresión y de 0.55 a tensión. Estas secciones unicamente se calculan para esfuerzos axiales debido a que las conexiones no restringen giros.

Para estas secciones no se chequea pandeo local debido a que las provisiones sísmicas AISC 341-16 exigen límites en la esbeltez tanto a pandeo local como global. Los límites para pandeo local son más exigentes que los definidos en la AISC 360-16, por lo que será suficiente verificar que los límites para la norma sísmica se cumplan.

Paralelamente se debe verificar que se cumplan los requisitos de ductilidad dados en la AISC 341-16. Para la esbeltez global, se debe cumplir que:

$$\frac{kl}{r} < 200$$

Como $\frac{kl}{r} = 66.1$, sí cumple.

Para la ductilidad de la sección, se debe cumplir que:

$$\frac{D}{t} < 0.053 \frac{E}{R_y F_y}$$

Como $24.7 < 26.14$, también cumple la sección.

Estos límites permiten obtener elementos dúctiles que efectivamente disipan la energía proveniente del sismo.

2.2.1.3.2. Mecanismo plástico

Debido a que el resto de la estructura está diseñada por capacidad, se deben considerar las fuerzas esperadas que llegan a transmitir los arriostramientos al resto de la estructura. Por ello, se debe cambiar en las ecuaciones de fuerza axial F_y por $R_y F_y$, donde R_y es la relación entre el esfuerzo de fluencia esperado y el mínimo del acero. Para el acero A500 gr. B, el R_y es de 1.4. Se considera también una longitud efectiva reducida por el tamaño de las conexiones.

$$\phi P_{n-T-esp} = 0.9 R_y F_y A_g = 215.08 \text{ Ton}$$

$$\begin{cases} F_{cr-esp} = 0.877 F_e, & \lambda_{esp} > \lambda_{lim} \\ F_{cr-esp} = 0.658 \frac{F_y R_y}{F_e} F_y R_y, & \lambda_{esp} < \lambda_{lim} \end{cases}$$

$$F_{cr-esp} = 3224 \text{ kg/cm}^2$$

Para el mecanismo plástico, se consideran dos condiciones:

- los elementos a tensión resisten sus cargas a tensión esperadas y los elementos a compresión sus cargas a compresión esperadas
- Los elementos a tensión resisten su carga a tensión esperada y los elementos a compresión su carga post pandeo.

Para la condición 1 la manera de calcular la compresión esperada es:

$$P_{c-esp} = 1.14 F_{cr} A_g = 215.1 \text{ Ton}$$

Para la condición 2, se calcula la compresión post pandeo como:

$$P_{cpp-esp} = (0.3) 1.14 F_{cr} A_g = 64.5 \text{ Ton}$$

Finalmente, se realiza una sumatoria de fuerzas en los nodos de cada piso donde se intersecan los arriostramientos. Dado que las dimensiones de los arriostramientos pueden ser distintas, sus capacidades difieren y por ende existirá una fuerza desbalanceada en los nodos. Se incluye en los anexos el cálculo de la resultante vertical de estas fuerzas en cada piso, y se la denomina P_y unbalanced. Para evitar estas cargas, se seleccionaron las mismas secciones arriba y debajo de la viga intersecada.

2.2.2. Diseño de vigas

Hay dos tipos de vigas que deben diseñarse. Por un lado, están las vigas intersecadas por los arriostramientos en el centro. Por otro, están las vigas que tienen los arriostramientos conectados en los extremos. Para cada viga hay que calcular las fuerzas considerando las dos condiciones: con los arriostramientos en compresión generando su compresión esperada o generando su compresión post pandeo. Los cálculos realizados se encuentran en el Anexo 2.

Se debe realizar la sumatoria de la componente de las fuerzas en el eje X provenientes de los 4 arriostramientos. Se considera que la mitad de esta fuerza entra al arriostramiento desde cada extremo, por lo que se divide para 2. Con ello se calcula la fuerza axial a la que es sometida la viga. Las cargas gravitacionales no generan cargas axiales en la viga.

2.2.2.1. Vigas intersecadas

Se considera que la fuerza desbalanceada actúa como una fuerza puntual que genera momento y cortante. Estas deben sumarse a los cortantes y momentos provenientes de las cargas gravitacionales, asumiendo que los arriostramientos no cuentan como apoyo y es una viga con una longitud del tamaño de la luz (6 m.). Una vez que se tienen todas las fuerzas requeridas, se procede a la selección de perfiles.

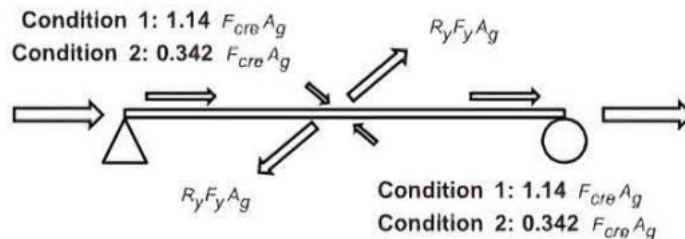


Figura 28. Diagrama de cuerpo libre de viga intersecada

Fuente: IBC SEAOC Structural/Seismic Design Manual, 2018

2.2.2.2. Vigas no intersecadas

Las vigas no intersecadas son similares, con la diferencia de que la sumatoria de fuerzas para determinar la carga axial debe realizarse en los extremos. Dado que no existe una carga desbalanceada entre los apoyos de la viga, no se generan más momentos o cortantes.

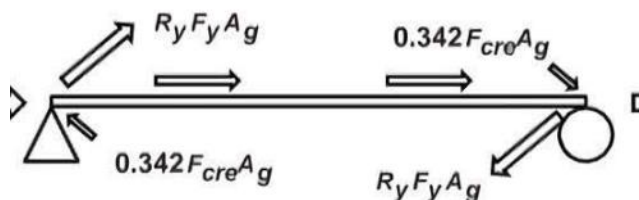


Figura 29. Diagrama de cuerpo libre de viga no intersecada

Fuente: IBC SEAOC Structural/Seismic Design Manual, 2018

2.2.2.3. Cálculo de resistencia en vigas

En vigas se considera que la losa genera un arriostamiento continuo, por lo que se consideran dos modos de falla únicamente: pandeo por flexión en el eje mayor, y pandeo flexural torsional.

Para el segundo modo de falla, se utiliza la ecuación del manual de diseño de la SEAOC:

$$F_e = \left[\frac{\pi^2 E (C_w + I_y (d/2)^2)}{(K_z L_z)^2} + GJ \right] \left[\frac{0.9}{I_x + I_y + \left(\frac{d}{2}\right)^2 A_g} \right]$$

Se toma el valor más pequeño de F_e para el cálculo de la resistencia a la compresión. Para la capacidad a momento se calcula el momento plástico de la sección con la ecuación:

$$\phi M_n = 0.9 F_y Z_x$$

En este caso el esfuerzo de fluencia $F_y = 3515 \text{ kg/cm}^2$ para el acero A992, y Z_x es el módulo de sección plástica que se puede obtener directamente del catálogo de secciones de la AISC.

Posteriormente se utiliza la ecuación de interacción para considerar los efectos de flexo-compresión, y se verifica que la sección cumpla:

$$\begin{cases} \left(\frac{P_u}{\phi P_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{ux}}{\phi M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi M_{ny}} \right) \right) \leq 1.0, & \frac{P_u}{\phi P_n} \geq 0.20 \\ \left(\frac{P_u}{2\phi P_n} + \left(\frac{M_{ux}}{\phi M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi M_{ny}} \right) \right) \leq 1.0, & \frac{P_u}{\phi P_n} < 0.20 \end{cases}$$

2.2.2.4. Verificación de ductilidad

Al igual que con diagonales, se debe verificar que las vigas del PAC cumplan con los requisitos de ductilidad moderada que dicta la AISC 341-16. Esto debe realizarse paralelamente con el cálculo de capacidad, para verificar que la sección elegida cumpla. Los requisitos para secciones W son:

$$\text{Para aletas: } \frac{b_f}{2t_f} \leq 0.40 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}}$$

$$\text{Para alma: } \frac{h}{t_w} \leq 1.57 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}}$$

2.2.3. Diseño de columnas

2.2.3.1. Cargas requeridas

Para el diseño en columnas gobierna la condición en que las diagonales a compresión están con su resistencia a la compresión esperada. Sin embargo, en el PAC, la una columna estará a tensión y la otra a compresión. Por ello, se deben considerar los dos estados de carga. Se debe hacer la sumatoria de las cargas que transmiten las diagonales sobre la columna de cada piso, así como las cargas verticales desbalanceadas. Los cálculos para columnas se incluyen en el Anexo 3.

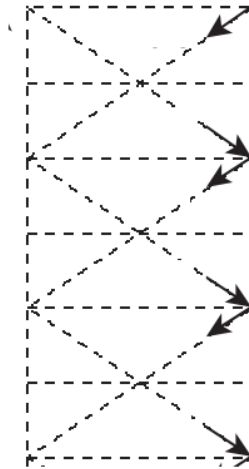


Figura 30. Diagrama de cargas a compresión que generan las diagonales en la columna

Fuente: Ductile Design of Steel Structures, 2011

Estas cargas provenientes de las diagonales deben sumarse a los efectos de las cargas gravitacionales, considerando las combinaciones de carga pertinentes. Los efectos de las cargas gravitacionales se extrajeron del modelo de SAP2000.

2.2.3.2. Selección de perfiles

Se selecciona un perfil que cumpla con los requisitos de carga. La segunda edición del manual de diseño de la AISC, y el manual de diseño de la SEAOC únicamente contemplan el diseño por compresión de las columnas, más no por flexo compresión. Si bien las columnas no están empotradas y los efectos por flexión no son considerables, pueden generar una condición más crítica. Por ello, en este modelo se optó por diseñar a flexo compresión, siguiendo los lineamientos de la norma AISC 360-16. En esencia el procedimiento es similar que en vigas, excepto que la columna puede fallar también por pandeo lateral torsional. Una vez que se diseñó por capacidad, se utilizó la ecuación de interacción a manera de verificación.

2.2.3.3. Verificación de ductilidad

Los criterios de ductilidad son muy similares a los de vigas, excepto que la AISC 341-16 exige ductilidad alta para columnas y ductilidad moderada para vigas. Por ende, los criterios son:

$$\text{Para aletas: } \frac{b_f}{2t_f} \leq 0.32 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}}$$

$$\text{Para alma: } \frac{h}{t_w} \leq 1.57 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}}$$

2.3. Modelado final

El modelo final tiene incorporadas las secciones de arriostramientos, vigas y columnas diseñadas en Excel. Para arriostramientos, se seleccionaron los perfiles HSS8.625X0.375, HSS7.500X0.312 y HSS6.625X0.280. Para vigas, se seleccionó el perfil W10X30, y para columnas el perfil W30X235.

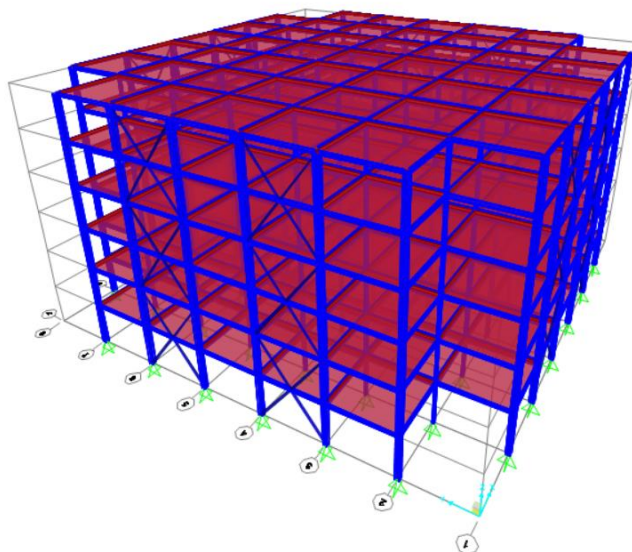


Figura 31. Imagen tridimensional de la estructura en SAP2000

Nota: El modelo no contiene elementos Shell. Fueron colocados unicamente para una mejor visualización de la estructura.

2.4. Verificación de requerimientos según NEC-15

La norma ecuatoriana de la construcción NEC-15 exige tres verificaciones que debe cumplir el modelo.

2.4.1. Chequeo de cortante basal estático vs. dinámico

Primeramente, hay que corregir la aceleración colocada en los patrones de carga de las fuerzas horizontales equivalentes. Hay que poner la aceleración correspondiente al periodo estructural obtenido del análisis modal. En este caso, el S_a para un $T=1.498$ es de 0.51.

Se debe comprobar que el cortante del análisis modal debe ser mayor o igual al 80% del cortante por FHE. Se calcula el 80% de FHE_x y FHE_y (3269 Ton), que en este caso será 2615 Ton prácticamente para los dos. Debido a que el cortante modal para E_x y E_y supera las 2780 Ton, como se puede ver en la tabla, sí cumple este chequeo.

OutputCase	CaseType Text	StepType Text	GlobalFX Tonf	GlobalFY Tonf	GlobalFZ Tonf	GlobalMX Tonf-m	GlobalMY Tonf-m
FHEx	LinStatic		-3269.1996	7.931E-13	-1.57E-11	1.2977	-59079.392
FHEy	LinStatic		-9.084E-13	-3269.1996	8.498E-12	59086.11746	-0.04751
Ex	LinRespSpec	Max	2793.9773	0.2575	0.0005508	0.7225	46469.95571
Ey	LinRespSpec	Max	0.2575	2782.6438	0.0508	46264.90713	0.68182

Figura 32. Ventana de SAP con los cortantes basales usados por el programa

2.4.2. Chequeo de participación de masa modal acumulada

La participación de la masa modal acumulada debe ser mayor al 90% con el número de modos de vibración analizados. En este modelo se alcanza el 90% de participación con el quinto modo de vibración, por lo que igual cumple.

OutputCase	StepType Text	StepNum Unitless	Period Sec	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless	SumUX Unitless	SumUY Unitless
Modal	Mode	1	1.498492	8.015E-08	0.777937	9.012E-11	8.015E-08	0.777937
Modal	Mode	2	1.495065	0.78089	7.934E-08	4.725E-17	0.78089	0.777937
Modal	Mode	3	0.858989	2.444E-07	3.5E-05	1.275E-10	0.78089	0.777971
Modal	Mode	4	0.470651	4.8E-09	0.159616	2.716E-10	0.78089	0.937588
Modal	Mode	5	0.456758	0.158357	5.298E-09	8.061E-17	0.939247	0.937588
Modal	Mode	6	0.270523	2.583E-06	6.8E-07	4.619E-10	0.93925	0.937588

Figura 33. Ventana de SAP con la participación de la masa modal acumulada

2.4.3. Chequeo de derivas de piso

La norma dicta que la deriva máxima de piso debe ser menor al 2%. Por ende, se extraen los desplazamientos, se divide para la altura de entrepiso, y se coloca como porcentaje la deriva. Este modelo igualmente cumple con el chequeo. En la siguiente tabla se presentan las derivas calculadas en las dos direcciones para cada combinación de carga sísmica.

GenDispl	DisplType	OutputCase	CaseType	StepType	Translation	Derivas
-	-	-	-	-	m	%
D1x	Translation	Ex	LinRespSpec	Max	0.054973	1.41%
D1x	Translation	Ey	LinRespSpec	Max	0.000619	0.02%
D1x	Translation	Ex+0.3Ey	Combination	Max	0.055159	1.41%
D1x	Translation	Ex+0.3Ey	Combination	Min	-0.055159	-1.41%
D1x	Translation	Ey+0.3Ex	Combination	Max	0.017111	0.44%
D1x	Translation	Ey+0.3Ex	Combination	Min	-0.017111	-0.44%
D1y	Translation	Ex	LinRespSpec	Max	0.00008	0.00%
D1y	Translation	Ey	LinRespSpec	Max	0.054098	1.39%
D1y	Translation	Ex+0.3Ey	Combination	Max	0.016309	0.42%
D1y	Translation	Ex+0.3Ey	Combination	Min	-0.016309	-0.42%
D1y	Translation	Ey+0.3Ex	Combination	Max	0.054122	1.39%
D1y	Translation	Ey+0.3Ex	Combination	Min	-0.054122	-1.39%

Figura 34. Derivas del primer piso para las cargas sísmicas analizadas

La tabla completa de derivas para el resto de pisos se incluye en el Anexo 4.

3. CONCLUSIONES

Después de todo el procedimiento desarrollado se puede llegar a distintas conclusiones.

Primeramente, se puede concluir que se cumplieron con los objetivos planteados en un inicio. Se logró diseñar los elementos que conforman un pórtico arriostrado concéntricamente. Para ello se estudiaron y siguieron los requerimientos de la norma de diseño en acero AISC 360-16, las provisiones sísmicas de la AISC 341-16, y los chequeos de la NEC-15. También se realizaron correctamente los modelos de viguetas y de la estructura en SAP2000, con lo que se obtuvo un diseño preliminar de los elementos y las cargas requeridas para el diseño de diagonales. Se logró iterar el modelo de la estructura para pasar de un diseño preliminar a uno final del PAC.

Adicionalmente, se logró programar un documento de Excel siguiendo y contrastando los procedimientos desarrollados en el manual de diseño sísmico de la AISC y de la SEAOC, con lo que se consiguió diseñar los arriostramientos, vigas y columnas con la filosofía de diseño por capacidad.

Se consiguió un modelo que cumple con las verificaciones estipuladas en la Norma Ecuatoriana de la Construcción respecto a las derivas, participación de masa modal y cortante basal. Se consiguieron derivas máximas de 1.96%, una participación de la masa modal acumulada del 94% con los primeros 5 modos de vibración, y un cortante basal del análisis modal espectral del 85% del cortante basal por el método de Fuerzas horizontales Equivalentes.

En conjunto, se espera que el diseño permita un comportamiento dúctil de la estructura que evite su colapso. Dado que se consideraron las condiciones sísmicas para la ciudad de Manta, Ecuador, la solución que representa el sistema de pórticos arriostrados concéntricamente permite tener una estructura con comportamiento seguro ante los sismos esperados de la región.

4. REFERENCIAS

- Aguiar, R., García, L., Menéndez, E., Zevallos, M., & Palacios, J. (2016). Análisis y reforzamiento de una estructura afectada por el terremoto del 16 de abril de 2016. *Revista de Investigaciones en Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT* ISSN: 2588-0721, 1(1), 1-16.
- American Institute of Steel Construction. (2012). *Seismic Design Manual*. Chicago: AISC.
- American Institute of Steel Construction. (2016). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. ANSI/AISC 341-16. Chicago: AISC.
- American Institute of Steel Construction. (2016). *Specification for Structural Steel Buildings*. ANSI/AISC 360-16. Chicago: AISC.
- Bruneau, M., Uang, C. M., & Sabelli, R. (2011). *Ductile design of steel structures*. McGraw-Hill Education.
- Christopoulos, C., & Packer, J. AISC Education. "Seismic Design of Ductile Special Concentrically Braced Frames - YouTube." www.youtube.com, 29 Jan. 2016, www.youtube.com/watch?v=NU-GmACmynY.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2014). *Norma Ecuatoriana de la Construcción: Cargas no sísmicas*. Quito: MIDUVI.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2014). *Norma Ecuatoriana de la Construcción: Peligro Sísmico (Diseño Sismorresistente)*. Quito: MIDUVI.

Quinde Martínez, P., & Reinoso Angulo, E. (2016). Estudio de peligro sísmico de Ecuador y propuesta de espectros de diseño para la Ciudad de Cuenca. *Ingeniería sísmica*, (94), 1-26.

Structural Engineer Association of California. (2019). 2018 IBC SEAOC Structural/Seismic Design Manual. Volume 4 Examples for Steel Framed Buildings. Sacramento: International Code Council.

ANEXO 1: Tablas de cálculos de arriostramientos realizado en Excel

Piso	Perfil	Ag (cm ²)	Compresión				Tensión			
			Fe (kg/cm ²)	Fcr (kg/cm ²)	$\phi P_n C$ (Ton)	Pu/ ϕP_n	Verificación	$\phi P_n T$ (Ton)	Pu/ ϕP_n	Verificación
6	HSS6.625X0.280	33.5	2720	1874	56.52	0.549	Cumple	89.03	0.378	Cumple
5	HSS6.625X0.280	33.5	2720	1874	56.52	0.850	Cumple	89.03	0.480	Cumple
4	HSS7.500X0.312	42.5	3490	2072	79.27	0.668	Cumple	112.95	0.416	Cumple
3	HSS7.500X0.312	42.5	3490	2072	79.27	0.800	Cumple	112.95	0.444	Cumple
2	HSS8.625X0.375	58.5	4601	2257	118.85	0.626	Cumple	155.48	0.407	Cumple
1	HSS8.625X0.375	58.5	4601	2257	118.85	0.796	Cumple	155.48	0.548	Cumple

Tabla 5. Selección y cálculo de capacidad de arriostramientos

Piso	r (cm)	kl/r	Esbeltez global	D/t	Ductilidad
6	5.72	86.0	Cumple	25.5	Cumple
5	5.72	86.0	Cumple	25.5	Cumple
4	6.48	75.9	Cumple	25.8	Cumple
3	6.48	75.9	Cumple	25.8	Cumple
2	7.44	66.1	Cumple	24.7	Cumple
1	7.44	66.1	Cumple	24.7	Cumple

Tabla 6. Verificación de límites de esbeltez y ductilidad de arriostramientos

Piso	Perfil	Tensión esp. (Ton)	kl/r esp.	Fe esp. (kg/cm ²)	Fcr esp. (kg/cm ²)	Condicion 1		Condicion 2	
						Compresión esp. (Ton)	Py unb. (Ton)	Comp. post pandeo (Ton)	Py unb. (Ton)
6	HSS6.625X0.280	138.50	69.9	4115	2715	103.71		31.11	
5	HSS6.625X0.280	138.50	69.9	4115	2715	103.71	0.00	31.11	0.00
4	HSS7.500X0.312	175.70	61.7	5281	2979	144.37		43.31	
3	HSS7.500X0.312	175.70	61.7	5281	2979	144.37	0.00	43.31	0.00
2	HSS8.625X0.375	241.85	53.8	6962	3224	215.08		64.52	
1	HSS8.625X0.375	241.85	53.8	6962	3224	215.08	0.00	64.52	0.00

Tabla 7. Análisis de mecanismo plástico

ANEXO 2: Tablas de cálculos de vigas realizado en Excel

CONDICIÓN 1								
Piso	Tensión (Ton)	Comp. (Ton)	Py unb. (Ton)	Px (Ton)	Pu (Ton)	Meh	1.2MD+ML (Ton)	Mu
6	138.50	103.71	0.00	73.84	-8.36	0.00	10.33	10.33
5	138.50	103.71	0.00	0.00	0.00	0.00	10.33	10.33
4	175.70	144.37	0.00	23.74	19.08	0.00	10.33	10.33
3	175.70	144.37	0.00	0.00	0.00	0.00	10.33	10.33
2	241.85	215.08	0.00	41.72	10.51	0.00	10.33	10.33
1	241.85	215.08	0.00	0.00	0.00	0.00	10.33	10.33
CONDICIÓN 2								
Piso	Tensión (Ton)	Comp. (Ton)	Py unb. (Ton)	Px (Ton)	Pu (Ton)	Meh	1.2MD+ML (Ton)	Mu
6	138.50	31.11	0.00	51.71	27.05	0.00	10.33	10.33
5	138.50	31.11	0.00	0.00	0.00	0.00	10.33	10.33
4	175.70	43.31	0.00	15.06	90.51	0.00	10.33	10.33
3	175.70	43.31	0.00	0.00	0.00	0.00	10.33	10.33
2	241.85	64.52	0.00	26.63	114.76	0.00	10.33	10.33
1	241.85	64.52	0.00	0.00	0.00	0.00	10.33	10.33

Tabla 8. Cargas requeridas para vigas

Piso	Perfil	CONDICIÓN 1						CONDICIÓN 2					
		ϕP_n (Ton)	$P_u/\phi P_n$	Verificación	ϕM_p	Flexo-compresión		ϕP_n (Ton)	$P_u/\phi P_n$	Verificación	ϕM_p	Flexo compresión	
6	W10X30	120.62	0.07	OK	18.98	0.85	OK	120.62	0.22	OK	18.98	0.91	OK
5	W10X30	120.62	0.00	OK	18.98	0.54	OK	120.62	0.00	OK	18.98	0.54	OK
4	W10X30	120.62	0.16	OK	18.98	0.64	OK	120.62	0.75	OK	18.98	0.61	OK
3	W10X30	120.62	0.00	OK	18.98	0.54	OK	120.62	0.00	OK	18.98	0.54	OK
2	W10X30	120.62	0.09	OK	18.98	0.72	OK	120.62	0.95	OK	18.98	0.70	OK
1	W10X30	120.62	0.00	OK	18.98	0.54	OK	120.62	0.00	OK	18.98	0.54	OK

Tabla 9. Selección de perfiles y cálculo de capacidad de vigas

Piso	Elemento	bf/2tf	Ductilidad aleta	h/tw	Ductilidad d alma	Esbeltez alma
6	W10X30	5.7	Cumple	29.5	Cumple	No esbelto
5	W10X30	5.7	Cumple	29.5	Cumple	No esbelto
4	W10X30	5.7	Cumple	29.5	Cumple	No esbelto
3	W10X30	5.7	Cumple	29.5	Cumple	No esbelto
2	W10X30	5.7	Cumple	29.5	Cumple	No esbelto
1	W10X30	5.7	Cumple	29.5	Cumple	No esbelto

Tabla 10. Verificación de ductilidad y esbeltez de vigas

ANEXO 3: Tablas de cálculos de columnas realizado en Excel

Piso	Columna tensión										Columna compresión						
	Tensión (Ton)	Comp. (Ton)	Py unb. (Ton)	Te (Ton)	Te acum. (Ton)	PL (Ton)	PD (Ton)	Pu tensión	Mux tensión	Muy tensión	Pe (Ton)	Pe acum. (Ton)	PL (Ton)	PD (Ton)	Pu comp.	Mux comp.	Muy comp.
6	138.50	103.71	0.00	103.71	-82.20	4.78	19.11	-68.82	15.05	1.72	138.50	109.78	4.78	19.11	137.49	15.05	1.72
5	138.50	103.71	0	138.50	-82.20	8.91	35.94	-57.04	31.16	2.79	103.71	109.78	8.91	35.94	161.81	31.16	2.79
4	175.70	144.37	0	144.37	-191.98	13.87	56.57	-152.38	35.75	3.01	175.70	191.98	13.87	56.57	273.73	35.75	3.01
3	175.70	144.37	0	175.70	-306.41	17.99	73.61	-254.88	38.61	3.23	144.37	331.24	17.99	73.61	437.57	38.61	3.23
2	241.85	215.08	0	215.08	-445.68	22.94	94.06	-379.83	34.08	2.91	241.85	445.68	22.94	94.06	581.49	34.08	2.91
1	241.85	215.08	0	241.85	-616.15	27.07	111.46	-538.13	21.92	1.80	215.08	637.37	27.07	111.46	798.19	21.92	1.80

Tabla 11. Cargas requeridas para diseño de columnas

Piso	Perfil	Ag (cm2)	ry (cm)	kl/r	Ductilidad			Esbeltz local	Tensión			Compresión					
					bf/2tf	Ductilidad aleta	h/tw		Ductilidad alma	Esbeltz alma	ϕP_n Tensión (Ton)	Pu/ ϕP_n	Verificación	Fe (kg/cm2)	Fcr (kg/cm2)	ϕP_n Comp. (Ton)	Pu/ ϕP_n
6	W30X235	447	8.92	43.72	5.02	Cumple	32.2	Cumple	No esbelto	1414.08	0.05	Cumple	10527	3057	1229.64	0.11	Cumple
5	W30X235	447	8.92	43.72	5.02	Cumple	32.2	Cumple	No esbelto	1414.08	0.04	Cumple	10527	3057	1229.64	0.13	Cumple
4	W30X235	447	8.92	43.72	5.02	Cumple	32.2	Cumple	No esbelto	1414.08	0.11	Cumple	10527	3057	1229.64	0.22	Cumple
3	W30X235	447	8.92	43.72	5.02	Cumple	32.2	Cumple	No esbelto	1414.08	0.18	Cumple	10527	3057	1229.64	0.36	Cumple
2	W30X235	447	8.92	43.72	5.02	Cumple	32.2	Cumple	No esbelto	1414.08	0.27	Cumple	10527	3057	1229.64	0.47	Cumple
1	W30X235	447	8.92	43.72	5.02	Cumple	32.2	Cumple	No esbelto	1414.08	0.38	Cumple	10527	3057	1229.64	0.65	Cumple

Tabla 12. Cálculos de diseño a compresión de columnas

ϕM_{nx} (Ton m)	ϕM_{ny} (Ton m)	Tensión							Compresión						
		Mux/ ϕM_{nx}	Verif.	Muy/ ϕM_{ny}	Verif.	Flexo-comp.	Verif. Flexo-comp.	Mux/ ϕM_{nx}	Verif.	Muy/ ϕM_{ny}	Verif.	Flexo-comp.	Verif. Flexo-comp.		
437.43	90.79	0.03	Cumple	0.02	Cumple	0.08	Cumple	0.03	Cumple	0.02	Cumple	0.11	Cumple		
437.43	90.79	0.07	Cumple	0.03	Cumple	0.12	Cumple	0.07	Cumple	0.03	Cumple	0.17	Cumple		
437.43	90.79	0.08	Cumple	0.03	Cumple	0.17	Cumple	0.08	Cumple	0.03	Cumple	0.32	Cumple		
437.43	90.79	0.09	Cumple	0.04	Cumple	0.21	Cumple	0.09	Cumple	0.04	Cumple	0.47	Cumple		
437.43	90.79	0.08	Cumple	0.03	Cumple	0.37	Cumple	0.08	Cumple	0.03	Cumple	0.57	Cumple		
437.43	90.79	0.05	Cumple	0.02	Cumple	0.44	Cumple	0.05	Cumple	0.02	Cumple	0.71	Cumple		

Tabla 13. Cálculo de diseño a flexo-compresión de columnas

ANEXO 4: Tabla de derivas de piso completa

Desplazamiento de los nodos						
GenDispl	DisplType	OutputCase	CaseType	StepType	Translation	Derivas
-	-	-	-	-	m	%
D1x	Translation	Ex	LinRespSpec	Max	0.054973	1.41%
D1x	Translation	Ey	LinRespSpec	Max	0.000619	0.02%
D1x	Translation	Ex+0.3Ey	Combinator	Max	0.055159	1.41%
D1x	Translation	Ex+0.3Ey	Combinator	Min	-0.055159	-1.41%
D1x	Translation	Ey+0.3Ex	Combinator	Max	0.017111	0.44%
D1x	Translation	Ey+0.3Ex	Combinator	Min	-0.017111	-0.44%
D1y	Translation	Ex	LinRespSpec	Max	0.00008	0.00%
D1y	Translation	Ey	LinRespSpec	Max	0.054098	1.39%
D1y	Translation	Ex+0.3Ey	Combinator	Max	0.016309	0.42%
D1y	Translation	Ex+0.3Ey	Combinator	Min	-0.016309	-0.42%
D1y	Translation	Ey+0.3Ex	Combinator	Max	0.054122	1.39%
D1y	Translation	Ey+0.3Ex	Combinator	Min	-0.054122	-1.39%
D2x	Translation	Ex	LinRespSpec	Max	0.064459	1.65%
D2x	Translation	Ey	LinRespSpec	Max	0.000598	0.02%
D2x	Translation	Ex+0.3Ey	Combinator	Max	0.064638	1.66%
D2x	Translation	Ex+0.3Ey	Combinator	Min	-0.064638	-1.66%
D2x	Translation	Ey+0.3Ex	Combinator	Max	0.019935	0.51%
D2x	Translation	Ey+0.3Ex	Combinator	Min	-0.019935	-0.51%
D2y	Translation	Ex	LinRespSpec	Max	0.000045	0.00%
D2y	Translation	Ey	LinRespSpec	Max	0.065034	1.67%
D2y	Translation	Ex+0.3Ey	Combinator	Max	0.019555	0.50%
D2y	Translation	Ex+0.3Ey	Combinator	Min	-0.019555	-0.50%
D2y	Translation	Ey+0.3Ex	Combinator	Max	0.065048	1.67%
D2y	Translation	Ey+0.3Ex	Combinator	Min	-0.065048	-1.67%
D3x	Translation	Ex	LinRespSpec	Max	0.072483	1.86%
D3x	Translation	Ey	LinRespSpec	Max	0.000625	0.02%
D3x	Translation	Ex+0.3Ey	Combinator	Max	0.072671	1.86%
D3x	Translation	Ex+0.3Ey	Combinator	Min	-0.072671	-1.86%
D3x	Translation	Ey+0.3Ex	Combinator	Max	0.02237	0.57%
D3x	Translation	Ey+0.3Ex	Combinator	Min	-0.02237	-0.57%
D3y	Translation	Ex	LinRespSpec	Max	0.000072	0.00%
D3y	Translation	Ey	LinRespSpec	Max	0.073948	1.90%
D3y	Translation	Ex+0.3Ey	Combinator	Max	0.022256	0.57%
D3y	Translation	Ex+0.3Ey	Combinator	Min	-0.022256	-0.57%
D3y	Translation	Ey+0.3Ex	Combinator	Max	0.07397	1.90%
D3y	Translation	Ey+0.3Ex	Combinator	Min	-0.07397	-1.90%
D4x	Translation	Ex	LinRespSpec	Max	0.07478	1.92%
D4x	Translation	Ey	LinRespSpec	Max	0.000649	0.02%
D4x	Translation	Ex+0.3Ey	Combinator	Max	0.074975	1.92%
D4x	Translation	Ex+0.3Ey	Combinator	Min	-0.074975	-1.92%
D4x	Translation	Ey+0.3Ex	Combinator	Max	0.023083	0.59%
D4x	Translation	Ey+0.3Ex	Combinator	Min	-0.023083	-0.59%
D4y	Translation	Ex	LinRespSpec	Max	0.000078	0.00%
D4y	Translation	Ey	LinRespSpec	Max	0.076268	1.96%
D4y	Translation	Ex+0.3Ey	Combinator	Max	0.022959	0.59%
D4y	Translation	Ex+0.3Ey	Combinator	Min	-0.022959	-0.59%
D4y	Translation	Ey+0.3Ex	Combinator	Max	0.076292	1.96%
D4y	Translation	Ey+0.3Ex	Combinator	Min	-0.076292	-1.96%
D5x	Translation	Ex	LinRespSpec	Max	0.072226	1.85%
D5x	Translation	Ey	LinRespSpec	Max	0.000647	0.02%
D5x	Translation	Ex+0.3Ey	Combinator	Max	0.07242	1.86%
D5x	Translation	Ex+0.3Ey	Combinator	Min	-0.07242	-1.86%
D5x	Translation	Ey+0.3Ex	Combinator	Max	0.022314	0.57%
D5x	Translation	Ey+0.3Ex	Combinator	Min	-0.022314	-0.57%
D5y	Translation	Ex	LinRespSpec	Max	0.000088	0.00%
D5y	Translation	Ey	LinRespSpec	Max	0.073316	1.88%
D5y	Translation	Ex+0.3Ey	Combinator	Max	0.022083	0.57%
D5y	Translation	Ex+0.3Ey	Combinator	Min	-0.022083	-0.57%
D5y	Translation	Ey+0.3Ex	Combinator	Max	0.073343	1.88%
D5y	Translation	Ey+0.3Ex	Combinator	Min	-0.073343	-1.88%
D6x	Translation	Ex	LinRespSpec	Max	0.065701	1.68%
D6x	Translation	Ey	LinRespSpec	Max	0.000714	0.02%
D6x	Translation	Ex+0.3Ey	Combinator	Max	0.065915	1.69%
D6x	Translation	Ex+0.3Ey	Combinator	Min	-0.065915	-1.69%
D6x	Translation	Ey+0.3Ex	Combinator	Max	0.020424	0.52%
D6x	Translation	Ey+0.3Ex	Combinator	Min	-0.020424	-0.52%
D6y	Translation	Ex	LinRespSpec	Max	0.000096	0.00%
D6y	Translation	Ey	LinRespSpec	Max	0.06517	1.67%
D6y	Translation	Ex+0.3Ey	Combinator	Max	0.019647	0.50%
D6y	Translation	Ex+0.3Ey	Combinator	Min	-0.019647	-0.50%
D6y	Translation	Ey+0.3Ex	Combinator	Max	0.065199	1.67%
D6y	Translation	Ey+0.3Ex	Combinator	Min	-0.065199	-1.67%
					Max	1.96%

Tabla 14. Cálculo de derivas para cada piso y para las combinaciones de carga sísmica analizadas