

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Posgrados

**ANÁLISIS Y DISEÑO DE EDIFICACIONES CON USO DE AISLADORES
SISMICOS.
COMPARACIÓN CON SISTEMAS TRADICIONALES.**

Proyecto de Investigación y Desarrollo

Gustavo Roberto Espinel Jaramillo

**Pablo Torres – Doctor of Philosophy
Director de Trabajo de Titulación**

Trabajo de titulación de posgrado presentado como requisito
para la obtención del título de Magíster en Ingeniería Civil, Mención Diseño y Construcción de
Estructuras Sismo Resistentes

Quito D.M., 22 de marzo de 2021

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO -USFQ
COLEGIO DE POSGRADOS

HOJA DE APROBACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

ANALISIS Y DISEÑO DE EDIFICACIONES CON USO DE AISLADORES SISMICOS.
COMPARACION CON SISTEMAS TRADICIONALES.

GUSTAVO ROBERTO ESPINEL JARAMILLO

Nombre del Director del Programa: Fernando Romo
Título académico: Master of Science
Director del programa de: Maestría en Ingeniería Civil

Nombre del Decano del colegio Académico: Eduardo Alba
Título académico: Doctor of Philosophy
Decano del Colegio: Colegio de Ciencias e Ingenierías

Nombre del Decano del Colegio de Posgrados: Hugo Burgos
Título académico: Doctor of Philosophy

© 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.

Nombre del estudiante: **GUSTAVO ROBERTO ESPINEL JARAMILLO**

Código de estudiante: **00215822**

C.I.: **1713178463**

Lugar y fecha: **Quito D.M., 22 de marzo de 2021**

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UNPUBLISHED DOCUMENT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 graduation 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

Este trabajo lo dedico a mi familia, a mi Esposa Karina mis Hijos Martin, Sofia y a mis padres y hermanos por ser el motor que me impulsa todos los dias.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis profesores y a mis amigos, por la paciencia que tuvieron para tenerme como alumno y compañero respectivamente, sobre todo a mis amigos que en los momentos difíciles me dieron la fuerza necesaria para seguir adelante en la maestría.

Un agradecimiento especial a mi amigo NMB que más que un compañero fue un profesor sin su ayuda y paciencia este logro solo sería un sueño.

A mi director de Tesis el Doctor Pablo Torres por su tiempo y su dedicación a este trabajo.

RESUMEN

En el presente estudio, se pretende analizar y diseñar una estructura de hormigón armado con aislación sísmica de base; para después comprobar las ventajas y desventajas que se tienen y compararla con una estructura diseñada mediante métodos convencionales.

Para el análisis comparativo se busca diseñar una estructura de un hospital de hormigón armado de 6 pisos ubicada en el Distrito Metropolitano de Quito. La edificación se asume asentada en un suelo tipo C para el cálculo del peligro sísmico normativo especificado en la normativa NEC-2015.

Para la estructura aislada se pretende utilizar una combinación de aisladores elastoméricos de neopreno reforzado con anillos de acero y aisladores de neopreno con núcleo de plomo. El diseño de los aisladores se lo realizó en función de medidas comerciales y disponibilidad local. Para el dimensionamiento del sistema de aislación en la interfase se busca encontrar un balance entre el amortiguamiento del sistema, la flexibilidad, y la fuerza de activación. Para la validación del sistema se realizó el análisis y diseño utilizando la normativa ASCE 7-16.

Finalmente, se busca contrastar el diseño tradicional con el diseño de la estructura aislada con el fin de determinar los potenciales beneficios del sistema aislado.

Abstract

Key words: Insulator- Aeismology- Rigidity- Elastomedical rubber- Design system

This study is intended to analyze and design a reinforced concrete structure with a antiseismic isolation base, in order to verify the advantages and disadvantages that are proven, and compare it with the traditional design system. The first part of this paper presents the history of seismology in Ecuador. Then it will be designed based on the current codes of a hospital located in the Metropolitan District of Quito, a 6-floor hospital on a type C ground, with which we will calculate the response spectrum based on the Ecuadorian current code NEC-2015.

For the insulated structure it is intended to use a combination of elastomeric neoprene insulators reinforced with steel rings and neoprene insulators with lead core. The design of the isolators was carried out according to commercial measures and local availability. For the dimensioning of the isolation system at the interface, it is sought to find a balance between the damping of the system, the flexibility and the activation force. For the validation of the system, the analysis and design was carried out using the ASCE 7-16 standard.

Finally, it is intended to contrast the traditional design with the design of the isolated structure in order to determine the potential benefits of the isolated system.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	17
1.1. DISEÑO TRADICIONAL	17
1.2. METODO DE LAS FUERZAS	19
1.3. SISTEMAS DE AMORTIGUAMIENTO DE BASE	19
1.4. AISLADORES SÍSMICOS	20
2. PELIGRO SISMICO.....	22
2.1. CURVAS DE PELIGRO SÍSMICO	23
2.2. GEOLOGÍA LOCAL	24
2.3. COEFICIENTES DE PERFIL DE SUELO FA, FD, FS	24
2.4. ESPECTRO ELÁSTICO DE DISEÑO	26
2.5. CORTANTE BASAL	27
2.5.1. <i>Coefficientes de configuración en planta y en elevación.</i>	27
2.5.2. <i>Coefficiente de importancia de la estructura.</i>	28
2.5.3. <i>Factor de reducción de resistencia sísmica.</i>	29
3. DESARROLLO.....	30
3.1. CURVA DE PELIGRO SÍSMICO PARA LA CIUDAD DE QUITO	30
3.2. PARÁMETROS DEL SUELO	32
3.3. PERIODO DE ESQUINA O PERIODO LARGO T_L	33
3.4. PARÁMETROS DE ACELERACIÓN ESPECTRAL A PERIODO CORTO	34
3.5. PARÁMETROS DE ACELERACIÓN ESPECTRAL A 1 [S]	34
3.6. ESPECTROS PARA MCE	35
3.7. ESPECTROS PARA SISMO DE DISEÑO	37
4. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA.....	39

	10
4.1. AGREITAMIENTO SELECCIONADO.....	40
4.2. PESO SISMICO DE LA ESTRUCTURA.....	40
4.2.1. Resultados del analisis modal de la Estructura.	41
4.2.2. Factores de Reducción de Fuerza Sísmica Sin Aislación.....	43
4.2.3. Coeficientes de Configuración en Planta y Elevación.	43
4.2.4. Cálculo del Periodo Fundamental Aproximado.....	43
4.2.5. Factor de Importancia Sin Aislación.....	43
4.2.6. Cálculo del Cortante Basal y Coeficiente Sísmico.	44
4.3. PLANO DE NUDOS.....	45
4.4. DISEÑO TRADICIONAL.....	46
4.4.1. Refuerzo a flexo compresion en vigas	46
4.4.2. Refuerzo a cortante en vigas	46
4.4.3. Diseño a flexo-compresión	47
4.4.4. Refuerzo en columnas.....	54
4.5. CALCULO DE DERIVAS INELASTICAS ESTUCTURA CONVENCIONAL.	59
5. DISEÑO DE LOS AISLADORES – MARCO TEÓRICO	61
5.1. COMBINACIONES DE CARGA PARA ESTABILIDAD VERTICAL – ASCE 7-16	61
5.2. PROPIEDADES DEL SISTEMA DE AISLACIÓN A MÁXIMO DESPLAZAMIENTO.....	62
5.3. DESPLAZAMIENTO MÁXIMO.....	62
5.4. PERIODO EFECTIVO A MÁXIMO DESPLAZAMIENTO	64
5.5. DESPLAZAMIENTO TOTAL MAXIMO	64
5.6. FUERZAS MÍNIMAS REQUERIDAS PARA ELEMENTOS ESTRUCTURALES DEBAJO DEL NIVEL DE BASE.....	65
5.7. FUERZAS MÍNIMAS EN ELEMENTOS SOBRE LA BASE	66
5.8. LÍMITES DE V_s	66

	11
5.9. DISTRIBUCIÓN VERTICAL DE LA FUERZA	67
5.10. LIMITES DE DERIVA.....	68
5.11. MASA SISMICA DE LA ESTRUCTURA	68
5.11.1. <i>Fuerza de activación.</i>	68
6. ANALISIS DE FUERZA DE ACTIVACION- DESPLAZAMIENTO OBJETIVO-AMORTIGUAMIENTO	68
7. DISEÑO DE AISLADORES.....	72
7.1. PROCEDIMIENTO GENERAL.....	72
7.2. PRIMERA ITERACIÓN	74
7.2.1. <i>Definición del Periodo Objetivo del Sistema.</i>	74
7.2.2. <i>Definición preliminar del amortiguamiento objetivo del sistema.</i>	75
7.2.3. <i>Estimación del Factor de Reducción de Demanda.</i>	75
7.2.4. <i>Rigidez Requerida para el Amortiguamiento Objetivo.</i>	76
7.2.5. <i>Desplazamiento Requerido por el Sistema.</i>	76
7.2.6. <i>Desplazamiento Total Máximo</i>	77
7.2.7. <i>Modelo Preliminar.</i>	78
7.2.8. <i>Carga Axial en Columnas.</i>	82
7.2.9. <i>Esquema de Ubicación de Aisladores.</i>	83
7.2.10. <i>Resultados del Analisis Modal Primera iteracion.</i>	84
7.2.11. <i>Diseño de los Aisladores para las Cargas Obtenidas.</i>	85
7.2.12. <i>Verificación del centro de masas y rigidez.</i>	87
7.3. RESULTADO DE ANALISIS MODAL SEGUNDA ITERACION	88
8. ESQUEMA DE AISLADORES.....	89
8.1.1. <i>Aislador T2</i>	89

	12
8.1.2. Aislador T1	90
8.1.3. Aislador T3	91
8.1.4. Verificación Centro de Masas y de Rigidez.....	92
8.1.5. Cargas en Columnas Corregidas.	93
8.1.6. Modelo Matemático.....	94
8.1.7. Resumen del Sistema.	97
8.2. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA AISLADA.....	100
8.2.1. Refuerzo de vigas.....	100
8.3. REFUERZO DE COLUMNAS.....	106
8.3.1. Diagramas de interccion	106
9 CONCLUSIONES Y RESUMEN DE RESULTADOS.....	110
10 INVESTIGACION FUTURA.....	112
12 BIBLIOGRAFÍA.....	113

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Sistema estructural seleccionado	19
Ilustración 2: Apoyo elástometrico.....	21
Ilustración 3: Mapa de peligro sismico del Ecuador.	22
Ilustración 4:Curvas de peligro sismico para Quito.	23
Ilustración 5: Espectro de diseño.	26
Ilustración 6:Curvas de Peligro sismico de Quito.....	31
Ilustración 7:Curvas de Peligro sismico de Quito.....	31

Ilustración 8:Espectro de Respuesta.	35
Ilustración 9:Espectro de desplazamiento.....	36
Ilustración 10:Espectro ADS.	36
Ilustración 11:Espectro Elastico NEC.	37
Ilustración 12:Espectro de Desplazamiento de Diseño.....	37
Ilustración 13 Espectro de Diseño ADS.	38
Ilustración 14: Sistema Estructural = Porticos especiales resistentes a momento.	39
Ilustración 15: Modales de estructura tradicional.	42
Ilustración 16: Plano de nudos, estructura tradicional.	45
Ilustración 17: Carga axial	48
Ilustración 18: Refuerzo en vigas, eje A.	49
Ilustración 19: Refuerzo en vigas, eje B.	50
Ilustración 20: Refuerzo en vigas, eje C.	51
Ilustración 21: Refuerzo en vigas, eje D.	52
Ilustración 22: Refuerzo en vigas, eje E.	53
Ilustración 23: Refuerzo en vigas, eje F.....	54
Ilustración 24:Refuerzo en columnas.....	55
Ilustración 25: Refuerzo en columnas.....	55
Ilustración 26: Refuerzo en columnas, eje A6.	56
Ilustración 27 Diagrama de interacción de una columna eje A6. Piso 1	57
Ilustración 28 Diagrama de Interacción de una columna eje A6. Piso 2	57
Ilustración 29 Diagrama de interacción de una columna eje A6. Piso 3	58
Ilustración 30 Diagrama de interacción de una columna eje A6. Piso 4	58
Ilustración 31 Diagrama de interacción de una columna eje A6. Piso 5	59

Ilustración 32 Diagrama de interacción de una columna eje A6. Piso 6	59
Ilustración 33 Derivas inelásticas Estructura convencional A.....	60
Ilustración 34 Derivas inelásticas Estructura convencional B	60
Ilustración 35 Curva de peligro sísmico para Quito- PGA	69
Ilustración 36 Curva de peligro sísmico para Quito	69
Ilustración 37 Fuerza de Activación- Desplazamiento de Objetivo -Amortiguamiento.....	70
Ilustración 38 Fuerza de Activación- Desplazamiento de Objetivo -Amortiguamiento.....	71
Ilustración 39 Desplazamiento Requerido por el Sistema- S_d (cm) x Periodo.....	76
Ilustración 40 Espectro de Aceleraciones Modificado- S_a ($\times g$) x Periodo	77
Ilustración 41 Modelo Preliminar -Cargas axiales mínimas y máximas	78
Ilustración 42 Modelo Preliminar-rigidez vertical del aislador	80
Ilustración 43 Carga Axial en Columnas	82
Ilustración 44: Esquema de Ubicación de Aisladores - Tipo de Aislador	83
Ilustración 45: Verificación del centro de masas y rigidez.....	87
Ilustración 46: Esquema Aisladores – Aislador T2	89
Ilustración 47: Esquema Aisladores- Aislador T1	90
Ilustración 48: Esquema Aisladores- Aislador T3	91
Ilustración 49: Verificación Centro de Masas y de Rigidez	92
Ilustración 50: Cargas en Columnas Corregidas.....	93
Ilustración 51: Modelo Matemático I	94
Ilustración 52: Modelo Matemático II	95
Ilustración 53: Modelo Matemático III.....	96
Ilustración 54: Isometría- Estructura 3D.....	97
Ilustración 55: Perfil de desplazamientos máximos en la estructura	98

Ilustración 56: Perfil de derivas	99
Ilustración 57: Diseño de la estructura aislada- Refuerzo de vigas Eje A	100
Ilustración 58: Diseño de la estructura aislada- Refuerzo de vigas Eje B	101
Ilustración 59: Diseño de la estructura aislada- Refuerzo de vigas Eje C	102
Ilustración 60: Diseño de la estructura aislada- Refuerzo de vigas Eje D	103
Ilustración 61: Diseño de la estructura aislada- Refuerzo de vigas Eje E	104
Ilustración 62: Diseño de la estructura aislada- Refuerzo de vigas Eje F	105
Ilustración 63: Refuerzo de columnas.....	106
Ilustración 64: Diagrama de intercción- Piso 1.....	107
Ilustración 65: Diagrama de intercción- Piso 2.....	107
Ilustración 66: Diagrama de intercción- Piso 3.....	108
Ilustración 67: Diagrama de intercción- Piso 4.....	108
Ilustración 68: Diagrama de Intercción- Piso 5	109
Ilustración 69: Diagrama de intercción- Piso 6.....	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores del factor z dependiendo de la zona sismica.	22
Tabla 2: Coeficiente de sitio Fa.	25
Tabla 3: Coeficiente de sitio Fd.	25
Tabla 4: Coeficiente de sitio Fs.	25
Tabla 5: Coeficientes segun el tipo de estructura.	27
Tabla 6: Factores Fa, Fd, y Fs.....	33
Tabla 7: Peso sismico de la estructura.	40

Tabla 8:Modales de Estructura sin aislacion.	41
Tabla 9 Factor de amortiguamiento -Desplazamiento Máximo, Bm.....	63
Tabla 10 Tasa anual de excedencia.....	70
Tabla 11 Factor de amortiguamiento- Estimacion del Factor de Reduccino de Demanda.....	75
Tabla 12 Resultados del Analisis Modal Primera iteracion.....	84
Tabla 13:Diseño de los Aisladores para las Cargas Obtenidas.....	86
Tabla 14: Resultado de analisis de modal Segunda Iteracion.....	88

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Diseño Tradicional

Los códigos de diseño sísmo-resistentes actuales compilan los requerimientos mínimos recomendados necesarios para el diseño y la construcción de las nuevas construcciones con el fin de resistir movimientos sísmicos. El objetivo de las provisiones normativas buscan proveer una certeza razonable de un desempeño sísmico que:

- Evitar lesiones graves y pérdidas de vidas producto de:
 - Colapso estructural
 - Falla de elementos no estructurales
 - Liberación de materiales peligrosos
- Mantener libre los medios de egresos
- Evitar la pérdida de funciones esenciales en edificaciones críticas
- Reducir el nivel de costos de reparación (cuando sea aplicable) de componentes estructurales y no estructurales

En la Norma Ecuatoriana de la Construcción en el capítulo de peligro sísmico nos especifica claramente el objetivo del diseño sísmo resistente:

- Prevenir daños en elementos no estructurales y estructurales, ante terremotos pequeños y frecuentes, que pueden ocurrir durante la vida útil de la estructura.
- Prevenir daños estructurales graves y controlar daños no estructurales, ante terremotos moderados y poco frecuentes, que pueden ocurrir durante la vida útil de la estructura.
- Evitar el colapso ante terremotos severos que pueden ocurrir rara vez durante la vida útil de la estructura, procurando salvaguardar la vida de sus ocupantes.

(Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

Dentro del marco normativo actual, el grado mediante el cual estos objetivos pueden ser alcanzados depende de varios factores, entre ellos: el tipo de sistema resistente lateral, la configuración estructural, el detallamiento de elementos estructurales y no estructurales, el grado de redundancia, y la calidad de los procedimientos constructivos.

El diseño sismorresistente de estructuras posee un nivel de complejidad superior al que caracteriza el diseño para cargas estáticas de gravedad, debido a los factores que se deben tener en cuenta en él.

Dentro de estos factores se encuentran:

- a. La naturaleza azarosa de las características del sismo.
- b. La incertidumbre sobre la respuesta de la estructura, debida a la heterogeneidad de la calidad de los materiales, la interacción con los elementos no estructurales, la variación de las cargas de servicio, las variaciones presentadas en la construcción, etc.
- c. Los mecanismos de falla y disipación de energía que impliquen el menor riesgo para la vida humana y sus propiedades.
- d. El costo social asociado a la falla de edificios, especialmente en el caso en que sean esenciales para la atención de un desastre, como el caso de los hospitales.

El grado de incertidumbre epistemico en la cuantificación del peligro sísmico y el alto grado de simplificaciones necesarias para poder reducir al análisis en un análisis lineal, hacen que en la actualidad no se logre conseguir un nivel de riesgo uniforme en las nuevas edificaciones.

En el caso de funcionalidad para estructuras esenciales o críticas (definidas en la normativa como estructuras de alta importancia) la normativa busca que la edificación tenga una alta probabilidad de mantener ocupación continua durante el evento sísmico tanto en componentes estructurales como no estructurales. Esto presenta un desafío ya, que como se conoce el desplazamiento de la estructura es inversamente proporcional a las aceleraciones de piso; y dentro de la concepción estructural la mayoría de componentes estructurales son sensibles al desplazamiento y la mayoría de componentes no estructurales son sensibles a la aceleración. Existiendo de esta manera una dicotomía en las estrategias para garantizar un buen desempeño en los componentes estructurales y no estructurales.

1.2. Metodo de las Fuerzas

El diseño tradicional esta predicado en el principio de igual desplazamiento e igual energia, donde, al suponer que la esturctura va a incursionar en el rango inelastico se permite conceptualizar el diseño estructural como un diseño elastico.

Para esto se utiliza un factor de reduccion de fuerzas (R) y un factor de amplificación de desplazamientos (Cd) los cuales son asignados dentro del contexto normativo en función del sistema estructural seleccionado.

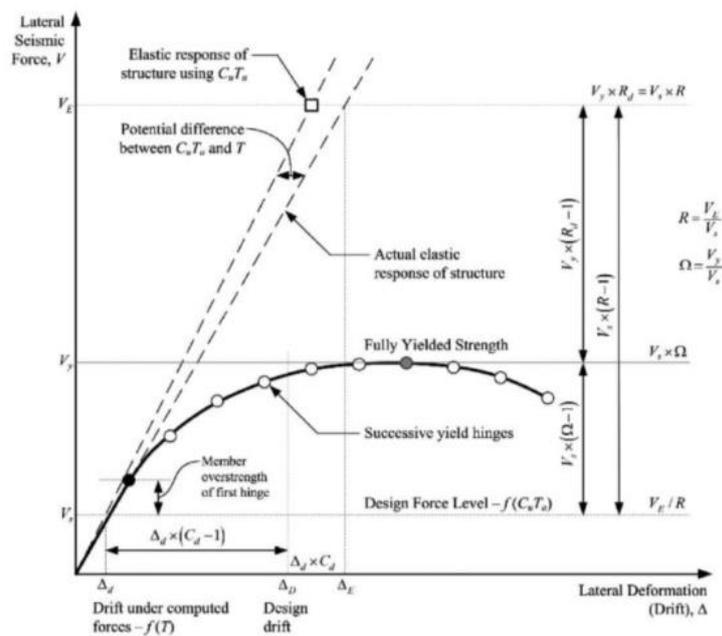


Ilustración 1: Sistema estructural seleccionado

Fuente: Fema 2020

1.3. Sistemas de amortiguamiento de base

Los sistemas que aíslan la estructura del suelo consisten en mecanismos flexibles en la interfase que permiten que la estructura y el suelo se desplacen de manera distinta. Se construyen regularmente con placas neopreno cuya resistencia a compresión es alta pero su rigidez a desplazamientos horizontales es baja. (Rojas, 2012)

Estos dispositivos absorben mediante deformaciones la energía que un terremoto transmite a una estructura. Los aisladores pueden ser de diferentes tipos y formas, los más conocidos son los basados en goma de alto amortiguamiento, goma con núcleo de plomo, neoprénicos o friccionales.

Al utilizar estos elementos, la estructura sufre un cambio en la forma como se mueve durante un sismo, y se produce una reducción importante en la fuerza que actúa sobre ella. La incorporación de tecnologías de disipación energética mejoran el desempeño de una edificación mediante la incorporación de amortiguamiento y alargamiento del periodo. De esta manera reduciendo las fuerzas horizontales inducidas en la estructura, y de esta manera alcanzando una respuesta elástica. En muchos casos la disipación de energía se ha constituido en una alternativa para los esquemas convencionales de rigidización y reforzamiento que se esperaban que alcancen un nivel de desempeño comparable. En general, estos dispositivos pueden ser una buena opción a considerar en los casos en los cuales se espera un buen nivel de desempeño en cuanto a la protección de la vida de las personas o, quizás, respecto de la ocupación inmediata, pero con aplicabilidad limitada en proyectos con un nivel de desempeño de prevención de colapso.

1.4. Aisladores Sísmicos

El aislamiento sísmico es una estrategia de diseño basada en la premisa de que es posible separar una estructura de los movimientos del suelo mediante la introducción de elementos flexibles entre la estructura y su fundación. Los aisladores reducen notablemente la rigidez del sistema estructural, haciendo que el período fundamental de la estructura aislada sea mucho mayor que el de la misma estructura con base fija. Existen dos tipos de sistemas de aislamiento: los apoyos elastoméricos y los apoyos deslizantes. Los apoyos elastoméricos emplean un elastómero de caucho natural o neopreno reforzado con finas láminas de acero. La notable

flexibilidad lateral en el elastómero permite el desplazamiento lateral de los extremos del aislador, mientras que las láminas de refuerzo evitan el abultamiento del elastómero y le proporcionan una gran rigidez vertical. Existen tres tipos de apoyos elastoméricos ampliamente usados: apoyos de caucho natural (NRB), apoyos de caucho con núcleo de plomo (LRB), y apoyos de caucho de alta disipación de energía (HDR). Los apoyos deslizantes poseen una superficie de deslizamiento que permite la disipación de energía por medio de las fuerzas de rozamiento. Uno de los dispositivos más innovadores es el sistema pendular friccionante que combina la acción del deslizamiento con la generación de una fuerza restitutiva debido a la geometría del deslizador.



Ilustración 2: Apoyo elástometrico.

Fuente: (Retamales, 2020)

2. PELIGRO SISMICO

En la NEC – 15, en el mapa de peligro sísmico, se ha dividido en 6 zonas al Ecuador, cada zona con un valor diferente del factor z el cual representa la aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño y los valores son expresados en fracción de la gravedad.

Para la elaboración de éste mapa de peligro sísmico, se realizó un estudio de peligro sísmico para un 10% de excedencia en 50 años (periodo de retorno 475 años). (Norma Ecuatoriana De La Construcción, 2015)

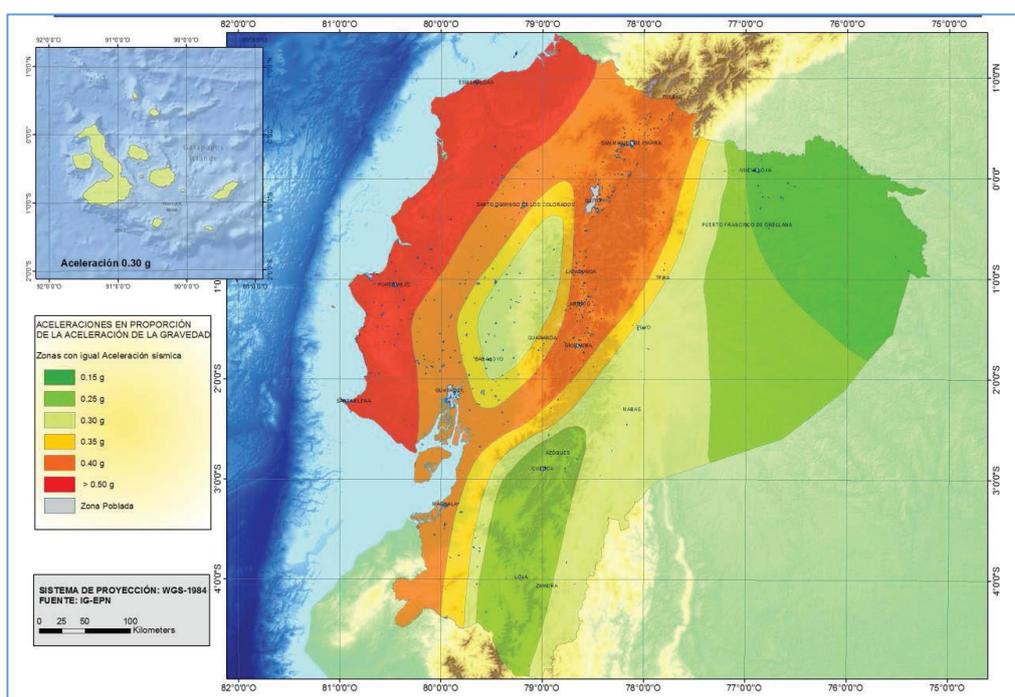


Ilustración 3: Mapa de peligro sísmico del Ecuador.

Fuente: (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

Tabla 1: Valores del factor z dependiendo de la zona sísmica.

Fuente: (Norma Ecuatoriana De La Construcción, 2015)

2.1. Curvas de peligro sísmico

La NEC – 15 nos indica que se debe utilizar diferentes niveles de peligro sísmico para estructuras de ocupación especial, esenciales, puentes, obras portuarias y otras estructuras diferentes a las edificaciones, con el fin de verificar el cumplimiento de diferentes niveles de desempeño.

Se proporcionan curvas de peligro sísmico probabilista para cada capital de provincia para poder definir los diferentes niveles de aceleración sísmica esperada en roca. En las curvas de peligro sísmico se relaciona el valor de la aceleración en el terreno (PGA) con un nivel de probabilidad anual de excedencia y en cada figura se incluyen curvas para períodos estructurales de 0.1, 0.2, 0.5 y 1.0 segundos. (Norma Ecuatoriana De La Construcción, 2015)

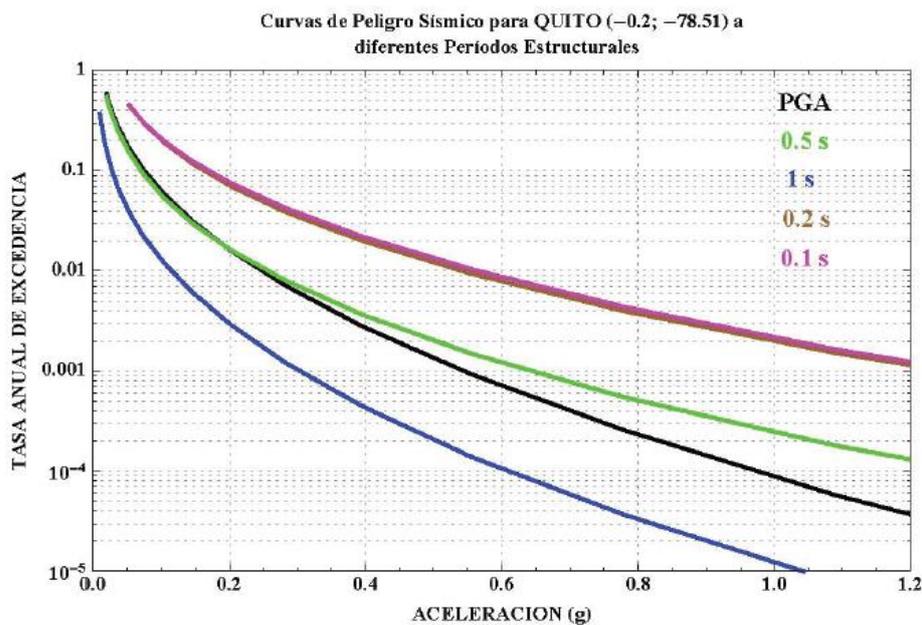


Ilustración 4: Curvas de peligro sísmico para Quito.

Fuente: (Norma Ecuatoriana De La Construcción, 2015)

2.2. Geología local

La respuesta sísmica de la estructura dependerá en gran parte del tipo o perfil de suelo en el cual está construida independientemente del tipo de cimentación que se utilice, ya que hay diferentes tipos de suelo y cada uno con diferentes propiedades. En la NEC – 15 los suelos se dividen en 6 tipos, A, B, C, D, E y F y para poder identificar qué tipo de suelo es el que tenemos es necesario conocer algunos factores como:

- velocidad de la onda cortante **V_s**
- número medio de golpes del ensayo de penetración estándar en cualquier perfil de suelo **N**.
- número medio de golpes del ensayo de penetración estándar (ensayo SPT) para el 60% de la energía teórica, a lo largo de todo el perfil del suelo **N₆₀**.
- Número medio de golpes del ensayo de penetración estándar (para estratos de suelos no cohesivos) **N_{ch}**.
- Resistencia al corte no drenado **S_u**.
- Índice de plasticidad **IP**.
- Contenido de agua en porcentaje **w**.

2.3. Coeficientes de perfil de suelo Fa, Fd, Fs

Estos 3 coeficientes son indispensables para la generación del espectro de respuesta. Fa amplifica las ordenadas del espectro de respuesta elástico de aceleraciones para diseño en roca, Fd amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos en roca y Fs considera el comportamiento no lineal de los suelos. Para obtener los valores de estos coeficientes es necesario relacionar la zona sísmica (factor z) y el tipo de suelo donde se va a sentar la estructura.

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					

Tabla 2: Coeficiente de sitio Fa.

Fuente: (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

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					

Tabla 3: Coeficiente de sitio Fd.

Fuente: (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

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					

Tabla 4: Coeficiente de sitio Fs.

Fuente: (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

2.4. Espectro elástico de diseño

El espectro de diseño es la herramienta que permite diseñar las construcciones teniendo en cuenta las condiciones sismo-tectónicas regionales y las condiciones locales de la respuesta del subsuelo de fundación. (Rochel, 2012)

Un espectro de diseño es la envolvente de varios registros de aceleraciones que se han tomado en una misma zona donde se produjo un sismo.

Para la generación del espectro de diseño además de utilizar los coeficientes que se han descrito anteriormente como la zona sísmica (factor z), perfil del suelo y coeficientes de sitio,

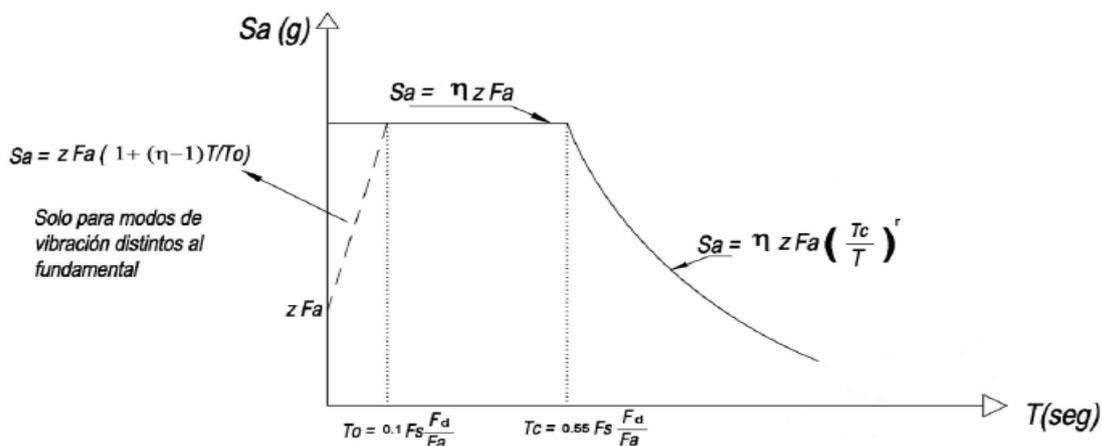


Ilustración 5: Espectro de diseño.

Fuente: (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

debemos también conocer la razón entre la aceleración espectral y el PGA (η) y el período fundamental de vibración de la estructura (T).

El período fundamental de vibración de la estructura depende de la altura de la edificación de n pisos (h_n) y de un coeficiente que depende del tipo de estructura (C_t).

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

Ecuación 1

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

Tabla 5: Coeficientes según el tipo de estructura.

Fuente: (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

2.5. Cortante Basal

Además de la generación del espectro de diseño, la NEC – 15 también nos permite encontrar el cortante basal que es indispensable para el diseño de estructuras. El cortante basal es una fuerza lateral que se produce en la base de las estructuras, resultado de la acción de un sismo. (Norma Ecuatoriana De La Construcción, 2015)

Para encontrar esta fuerza lateral necesitamos de varios coeficientes o factores como:

- Coeficientes de configuración en planta y en elevación.
- Coeficiente de importancia de la estructura.
- Factor de reducción de resistencia sísmica.
- Período de vibración.
- Peso total de la estructura (carga muerta).

2.5.1. Coeficientes de configuración en planta y en elevación.

Con el paso de los años todo se va modernizando y eso significa que van apareciendo nuevos gustos en la gente y se va dejando de lado lo tradicional, se busca darle un aspecto único a cada obra y ahí es donde aparecen un sin número de formas y estilos diferentes en las estructuras. Todo esto es posible porque la ingeniería civil nos permite construir prácticamente cualquier estructura.

Para lograr que una obra sea única, se busca hacer algo nuevo y diferente y eso implica muchas veces irregularidades tanto en planta como en elevación y es por esta razón que debemos tomar en cuenta los coeficientes de regularidad estructural ya que previenen al diseño

de las posibles irregularidades las cuales son las responsables de un comportamiento diferente al ideal en el caso de producirse un sismo.

Estos coeficientes lo que hacen es incrementar el valor del cortante basal con el objetivo de brindar mayor resistencia a la estructura, hay que tener en cuenta que esto no quiere decir que se garantice un buen comportamiento de la estructura ante eventos sísmicos y para esto la NEC nos presenta los siguientes casos de irregularidades:

2.5.2. Coeficiente de importancia de la estructura.

La filosofía del diseño sismo resistente principalmente lo que pretende es salvar la vida de las personas que se encuentra dentro de las estructuras, pero debemos tener en cuenta que no todas las estructuras tienen la misma importancia, las estructuras o edificaciones donde exista permanentemente concurrencia masiva como centros comerciales, teatros, cines, museos, ministerios, etc., deben resistir más la fuerza de un sismo que una casa de dos pisos. Esta es una relación directamente proporcional, pues, en aquellos lugares que son creados para albergar a un mayor número de asistentes, el riesgo de pérdidas humanas se incrementa, de ahí, la visión de que estructuras tales como edificios, de vivienda y oficinas, lugares públicos, ofrezcan mayor seguridad frente a un infortunado evento sísmico.

Ante eventos de la naturaleza como son los terremotos, deben existir estructuras que no colapsen para que las personas puedan ser atendida como son las clínicas, hospitales, centros de salud, etc. Además, los servicios de emergencia también deben estar habilitados y las instalaciones tampoco deben colapsar como bomberos, policía e instalaciones militares.

Por esta razón, es que, frente a emergencias, existen responsables a nivel gobierno para tomar decisiones, para mantener provisión de servicios en emergencias, o dependiendo del tipo de evento natural racionar los mismos o suspender el servicio para evitar que se enfrenten a situaciones de mayor riesgo.

El objetivo de este factor de importancia I es aumentar la demanda sísmica de diseño para las estructuras, que debido a sus características o funciones que se desempeñan en ellas deben permanecer operativas y sufrir menos daño que otras. (Norma Ecuatoriana De La Construcción, 2015)

2.5.3. Factor de reducción de resistencia sísmica.

El factor de reducción de resistencia (R) está relacionado directamente con la ductilidad de la estructura.

La ductilidad, que es la capacidad de deformación, en general, representa la aptitud de deformación permanente de un material producida por estirado sin sufrir rotura (Morral, 2004); es decir, la ductilidad es la capacidad que tiene un material para deformarse plásticamente sin llegar a la falla o rotura. Éste factor tiene el objetivo de reducir la fuerza sísmica de diseño tomando en cuenta el grado de ductilidad de la estructura y el diseño adecuado de las conexiones viga columna, en el caso de hormigón se espera la formación de la rótula plástica y en caso de acero se debe verificar la calidad de la soldadura para que en estos dos casos exista una buena distribución de las fuerzas. (Fitzpatrick Engineering Group, 2012)

3. DESARROLLO

3.1. Curva de Peligro sísmico para la ciudad de Quito

Usando la curva de peligro sísmico presentadas en la norma NEC-SD-DS, se obtienen los siguientes parámetros.

El periodo de retorno corresponde a:

$$T_R = 1/p_{(anual_excedencia)}$$

Ecuación 2

La probabilidad de ocurrencia para establecer el periodo de retorno dentro de una ventana de tiempo está determinada por:

$$p_{(ocurrencia)} = e^{-t/T_R}$$

Ecuación 3

$$p_{(excedencia)} = 1 - p_{(ocurrencia)}$$

Ecuación 4

Para los niveles de desempeño buscados, los niveles de peligro sísmico correspondientes son:

- Para **máximo sismo considerado (MCE)**: Periodo de retorno de 2% en 50 años – Periodo de retorno 2475 años – Tasa anual de excedencia de 0.00040.

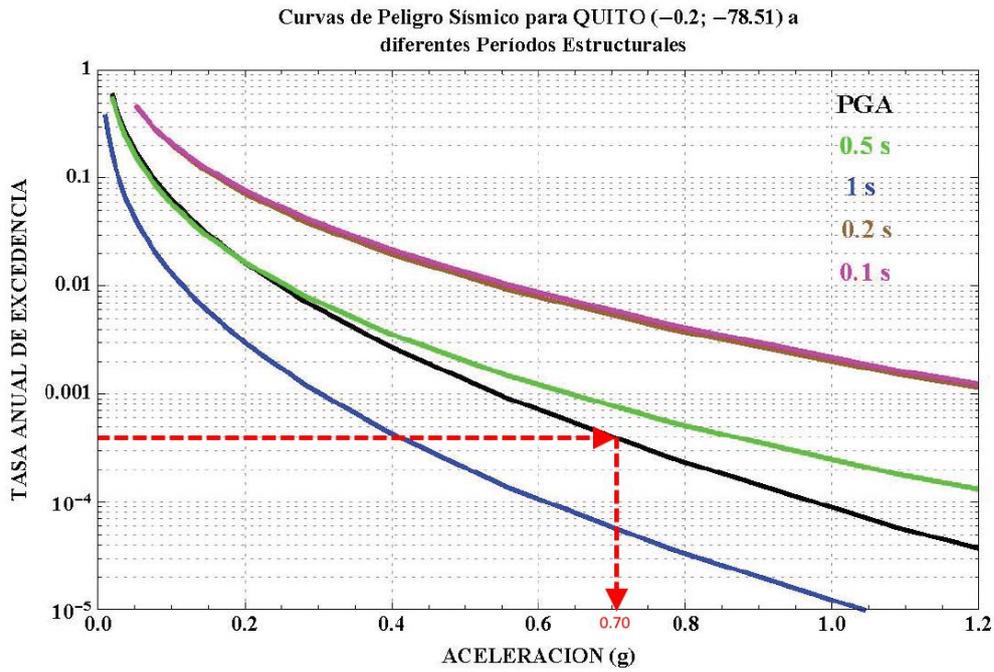


Ilustración 6: Curvas de Peligro sísmico de Quito.

Fuente: (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

- Para **control de daños**: Periodo de retorno de 10% en 50 años – Periodo de retorno 474 años – Tasa anual de excedencia de 0.00211.

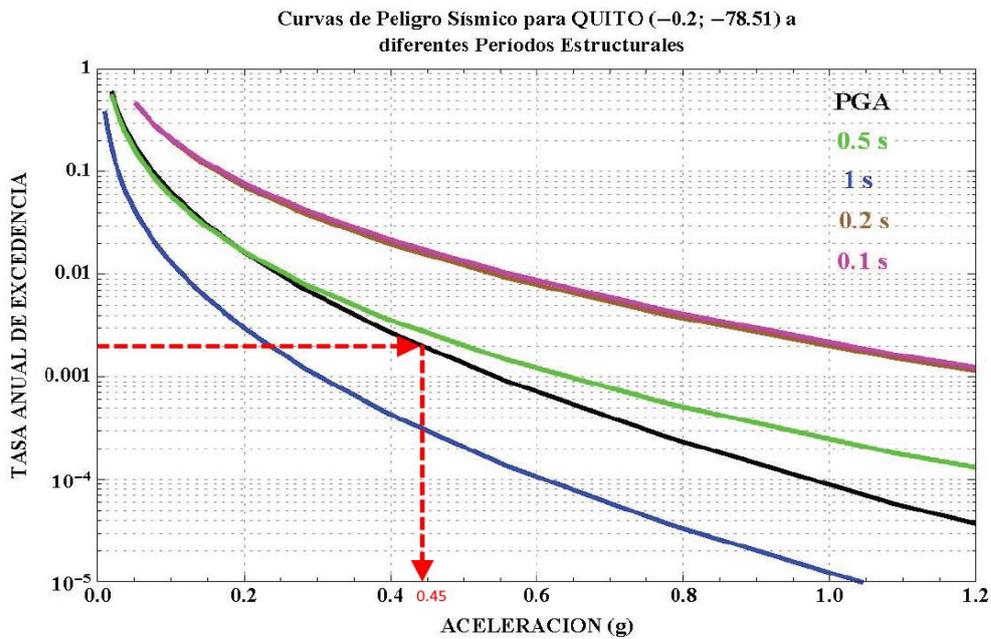


Ilustración 7: Curvas de Peligro sísmico de Quito.

Fuente: (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

Donde,

- Para **MCE**: $PGA = 0.70$ [xg].
- Para **Sismo de Diseño**: $PGA = 0.45$ [xg].

3.2. Parámetros del Suelo

Factores de sitio Fa							
Tipo de Suelo	Zona Sísmica	I	II	III	IV	V	VI
	Z	0.15	0.25	0.3	0.35	0.4	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	0.85
F		Ver Nota					
Factores de sitio Fd							
Tipo de Suelo	Zona Sísmica	I	II	III	IV	V	VI
	Z	0.15	0.25	0.3	0.35	0.4	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		Ver Nota					
Factores de sitio F_s							
Tipo de Suelo	Zona Sísmica	I	II	III	IV	V	VI
	Z	0.15	0.25	0.3	0.35	0.4	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	1.4
E		1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
F		Ver Nota					

Tabla 6: Factores F_a , F_d , y F_s .

Elaborado por: Gustavo Espinel

Donde,

- Para MCE:
 - $F_a = 1.18$
 - $F_d = 1.06$
 - $F_s = 1.23$
- Para Sismo de Diseño:
 - $F_a = 1.19$
 - $F_d = 1.085$
 - $F_s = 1.17$

3.3. Periodo de Esquina o Periodo Largo T_L

Dentro de la norma ecuatoriana, el periodo de esquina se encuentra definido como:

$$T_L = 2.40F_d$$

Ecuación 5

Donde,

- Para **MCE**: $T_L = 2.544$ [s]
- Para **Sismo de Diseño**: $T_L = 2.604$ [s]

3.4. Parámetros de Aceleración Espectral a Periodo Corto

Para el cálculo del componente sísmico vertical de la estructura se debe determinar los parámetros de aceleración espectral a periodo corto usando:

$$S_{MS} = F_a S_s$$

Ecuación 6

$$S_{DS} = F_a S_{DS}$$

Ecuación 7

Donde,

- Para **MCE**: $S_{MS} = 1.18 * 2.05 = 2.42$ [xg]
- Para **Sismo de Diseño**: $S_{DS} = 1.19 * 1.33 = 1.58$ [xg]

Considerando el 20% de la aceleración horizontal, como componente vertical:

- Para **MCE**: $0.20.S_{MS} = 0.484$ [xg]
- Para **Sismo de Diseño**: $0.20.S_{DS} = 0.316$ [xg]

3.5. Parámetros de Aceleración Espectral a 1 [s]

$$S_{M1} = F_a S_1$$

Ecuación 8

$$S_{D1} = F_a S_{D1}$$

Ecuación 9

Donde,

- Para **MCE**: $S_{M1} = 1.18 * 1.245 = 1.469$ [xg]
- Para **Sismo de Diseño**: $S_{D1} = 1.19 * 0.779 = 0.927$ [xg]

3.6. Espectros para MCE

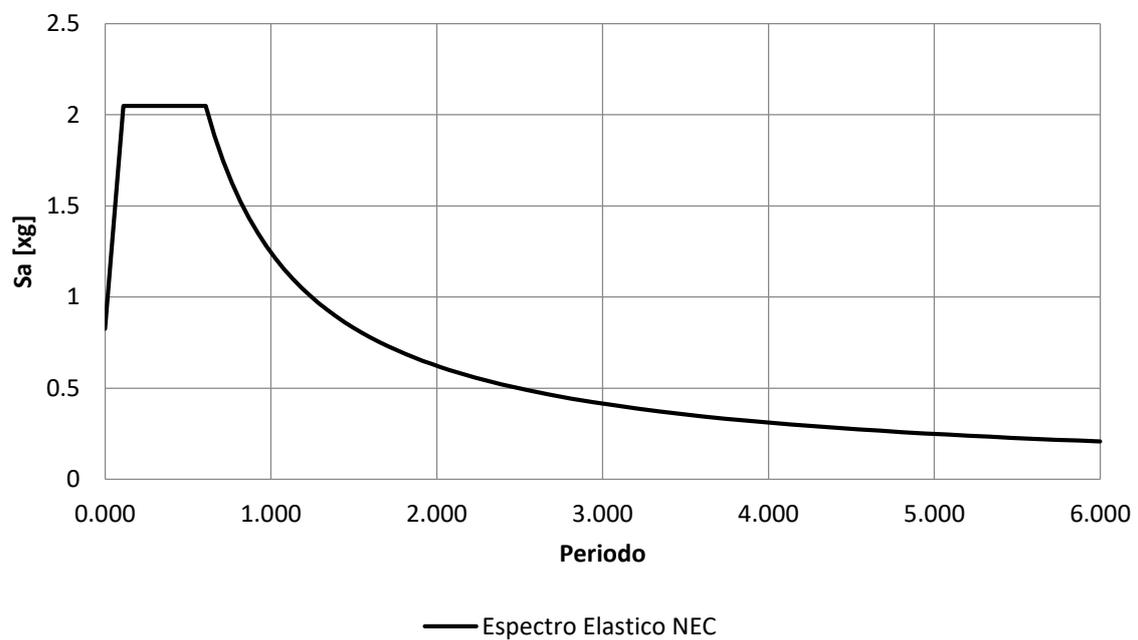


Ilustración 8: Espectro de Respuesta.

Elaborado por: Gustavo Espinel

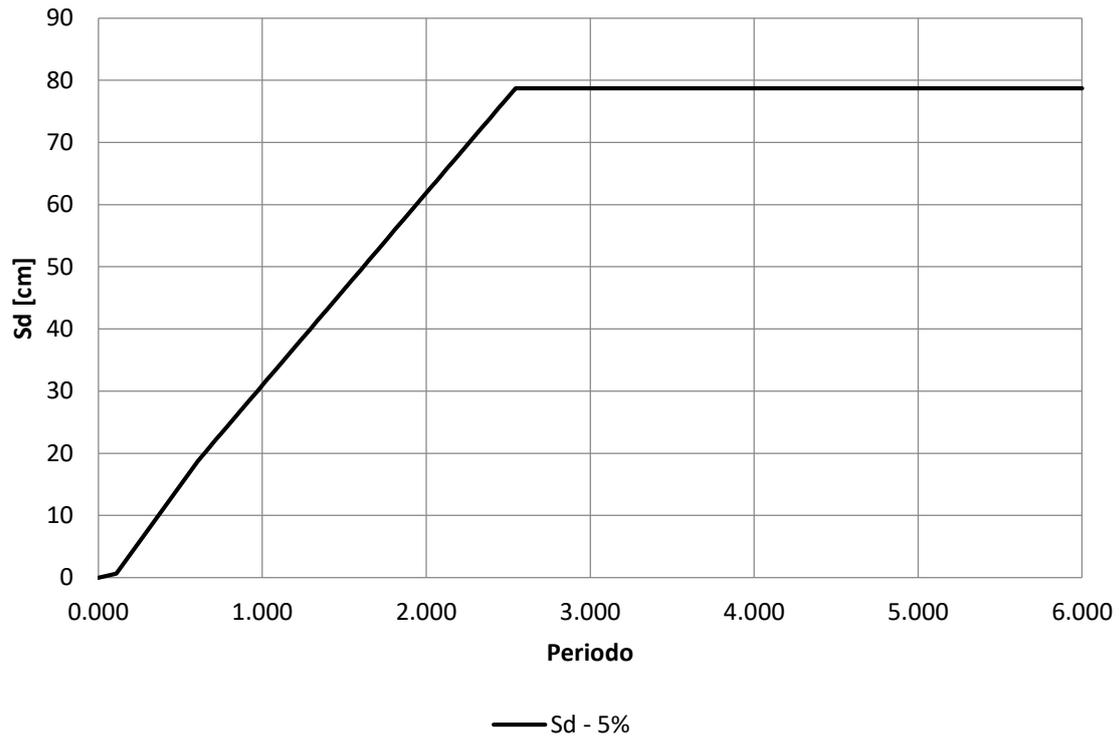


Ilustración 9: Espectro de desplazamiento.

Elaborado por: Gustavo Espinel

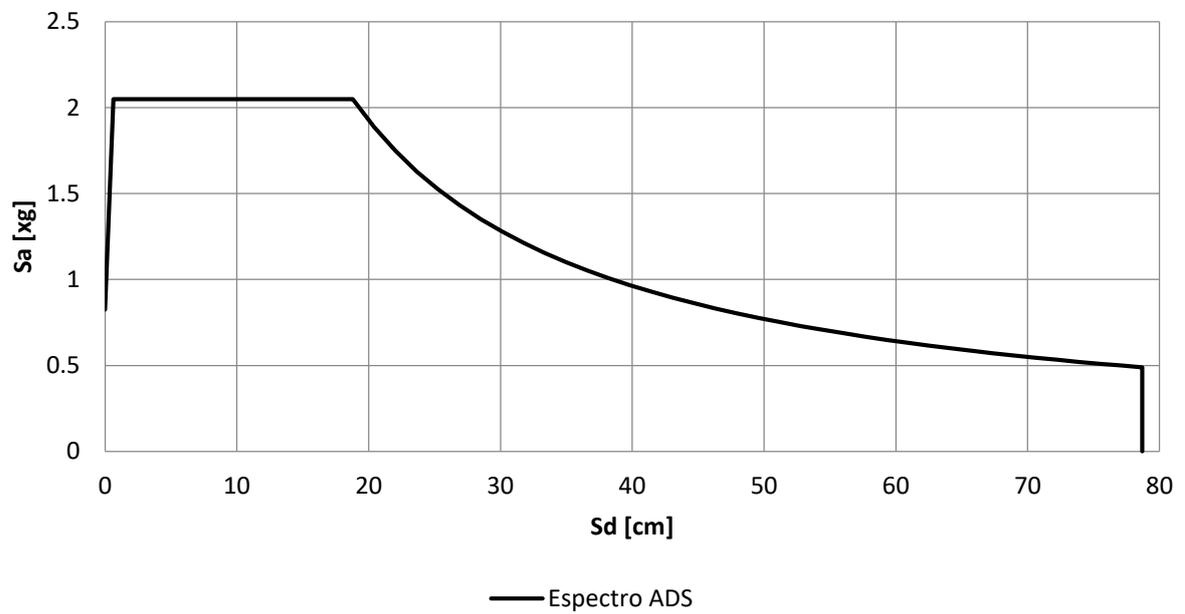


Ilustración 10: Espectro ADS.

Elaborado por: Gustavo Espinel

3.7. Espectros para Sismo de Diseño

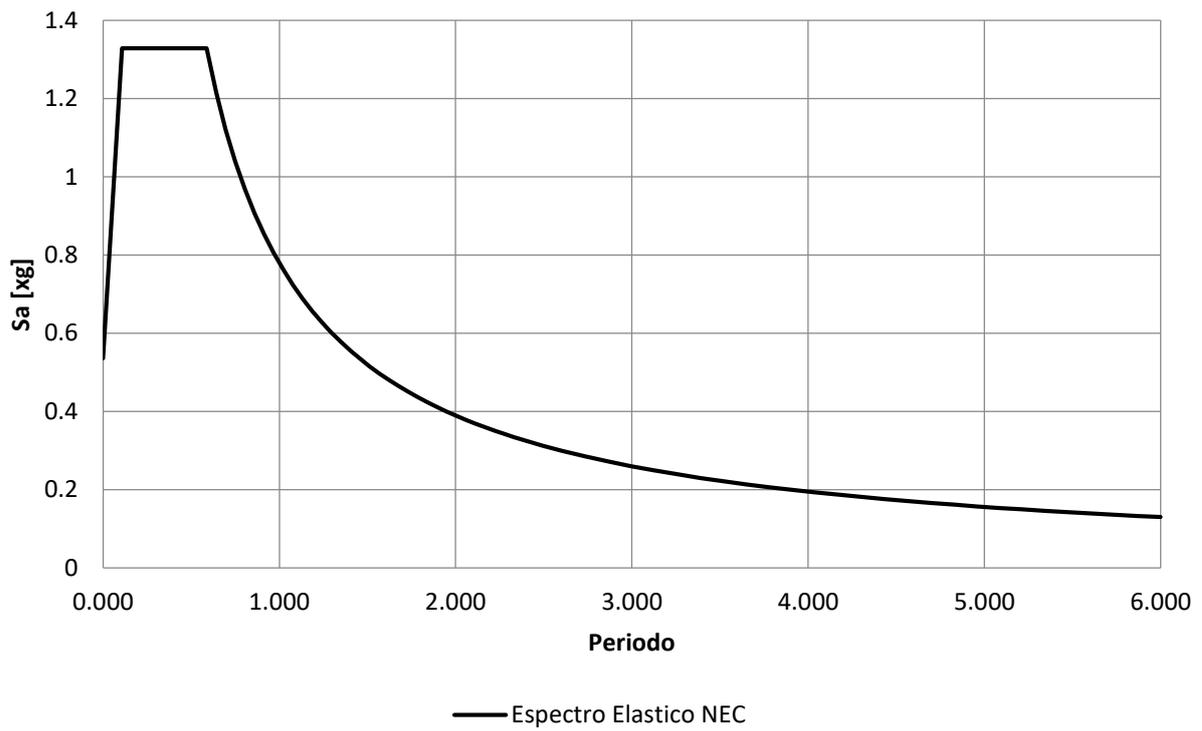


Ilustración 11: Espectro Elastico NEC.

Elaborado por Gustavo Espinel

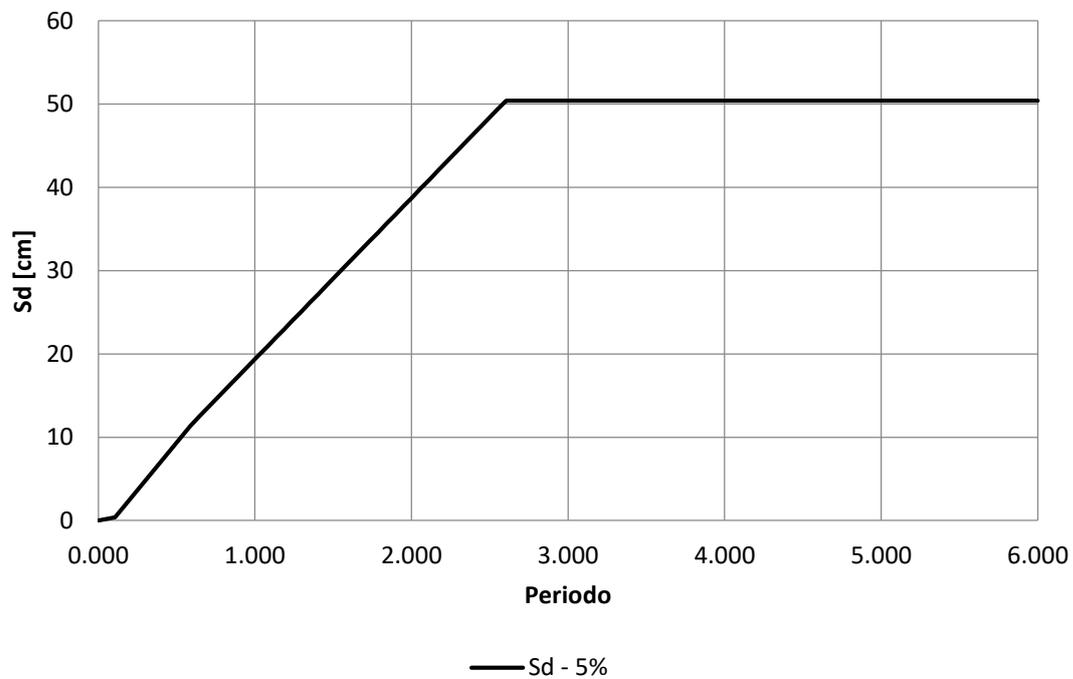


Ilustración 12: Espectro de Desplazamiento de Diseño.

Elaborado por: Gustavo Espinel

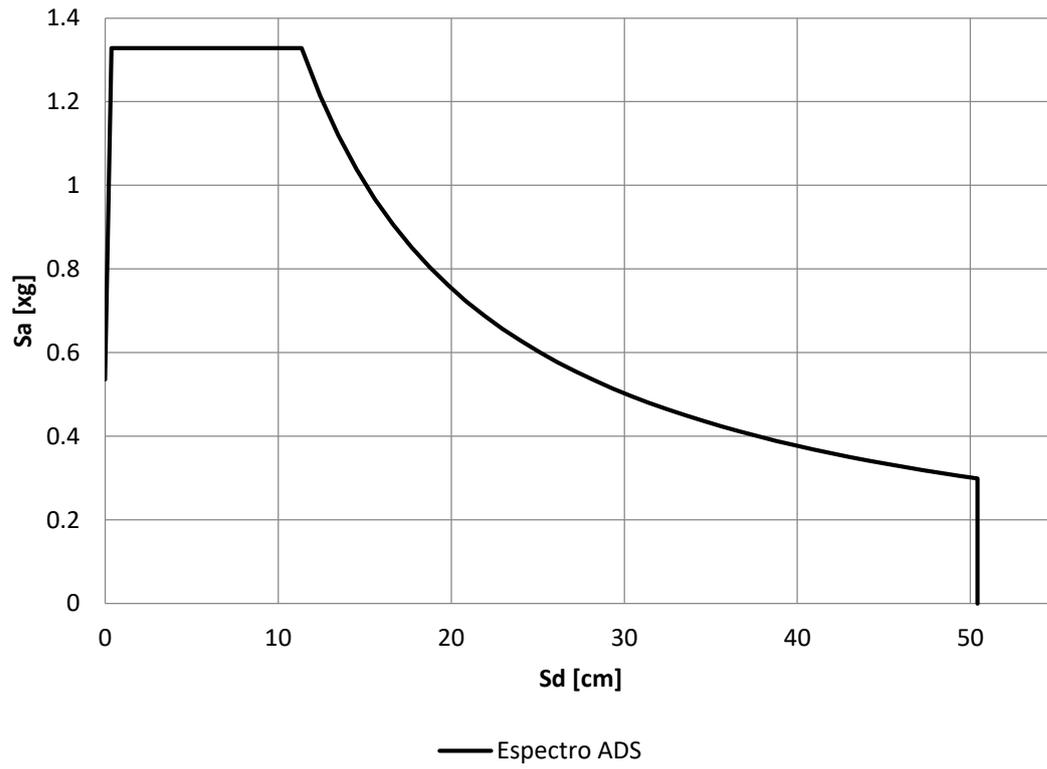


Ilustración 13 Espectro de Diseño ADS.

Elaborado por: Gustavo Espinel

4. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

En el presente trabajo se va a diseñar un hospital de 6 pisos de hormigón armado con 6 vanos en los dos sentidos de 6m de espaciamiento y una altura de entre piso de 3 m, ubicado en la ciudad de Quito, con un suelo tipo c, la estructura confirmada por porticos resistentes a momento en ambas direcciones, se diseñó con un factor de importancia de 1,5 correspondiente a una estructura esencial.

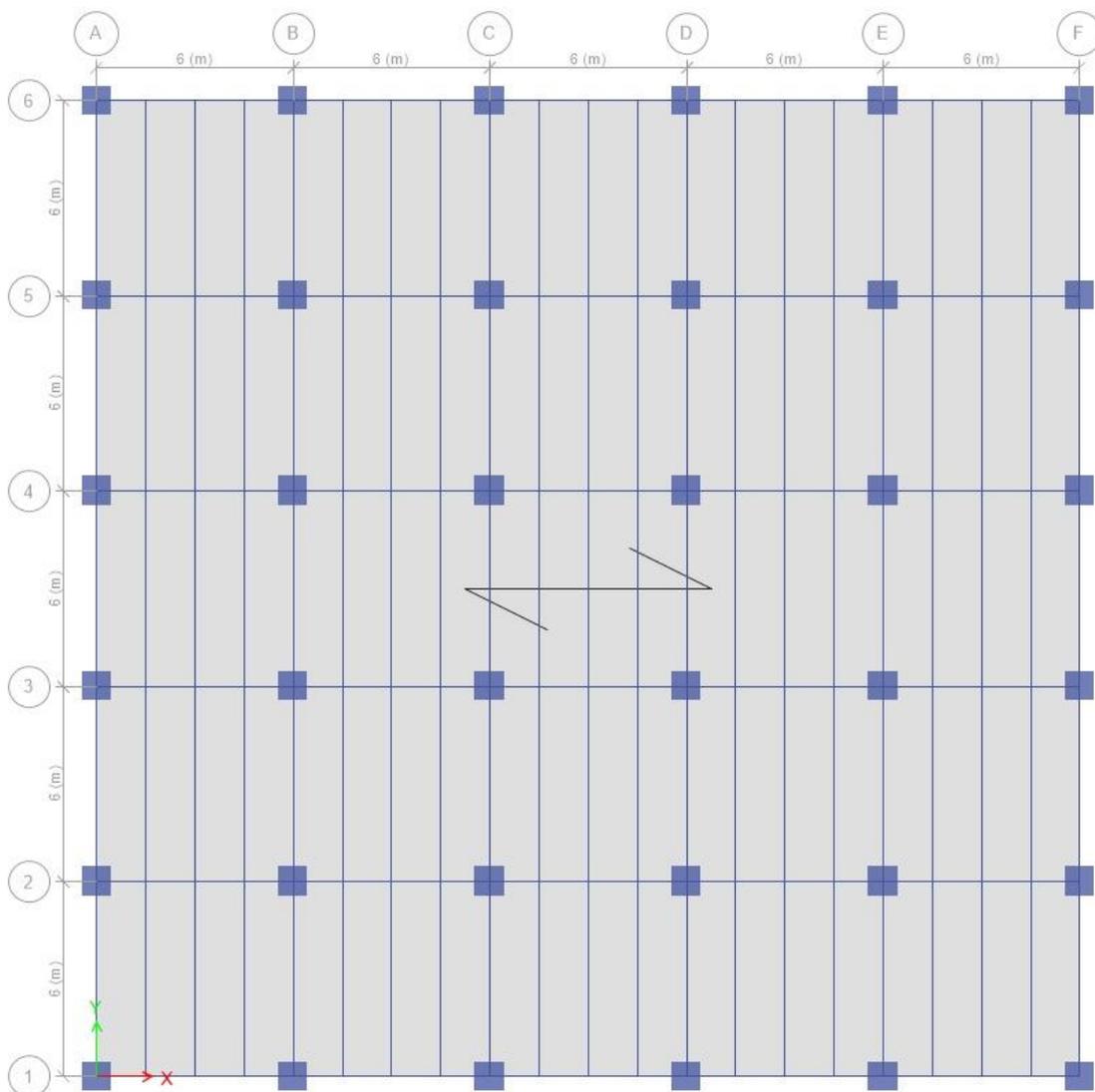


Ilustración 14: Sistema Estructural = Porticos especiales resistentes a momento.

Elaborado por: Gustavo Espinel

PGA=0.40 [xg]

Tipo de Suelo = C

Categoría de Riego = IV

Factor de Importancia = 1.50

Sistema Estructural = Porticos especiales resistentes a momento.

4.1. Agreitamiento Seleccionado

Para estructuras de hormigón armado en este caso, en el cálculo de la rigidez y de las derivadas máximas se deberán utilizar los valores de las inercias agrietadas de los elementos, de la siguiente manera

0,5 I_g para vigas (considerando el aporte de la losa, cuando sea aplicable).

0,8 I_g para columnas.

0,6 I_g para muros estructurales.

4.2. Peso Sísmico de la Estructura

Story	Diaphragm	Mass X	Mass Y	XCM	YCM	Cum Mass X	Cum Mass Y
		kg	kg	m	m	kg	kg
Story6	D1	827945.1	827945.1	15	15	827945.1	827945.1
Story5	D1	932921.1	932921.1	15	15	1760866.21	1760866.21
Story4	D1	932921.1	932921.1	15	15	2693787.31	2693787.31
Story3	D1	932921.1	932921.1	15	15	3626708.41	3626708.41
Story2	D1	932921.1	932921.1	15	15	4559629.51	4559629.51
Story1	D1	932921.1	932921.1	15	15	5492550.62	5492550.62

Tabla 7: Peso sísmico de la estructura.

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

4.2.1. Resultados del analisis modal de la Estructura.

Para el analisis dinamico se eligio el metodo de iteracion sub espacial donde la masa dinamica fue definida como la suma del peso propio y la carga muerta.

Para el analisis se eligieron 12 modos con el fin de alcanzar una participacion modal superior al 90%

Para el analisis no se consideraron desplazamientos verticales.

A continuacion se presentan las graficas asociada al desplazamiento de cada modo.

Case	Mode	Periodo	UX	UY	SumUX	SumUY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
		sec								
Modal	1	0.64	0.77	0.00	0.77	0.00	0	0.00	0.25	0
Modal	2	0.64	0.00	0.77	0.77	0.77	0	0.25	0.25	0
Modal	3	0.56	0	0	0.77	0.77	0.77	0.25	0.25	0.77
Modal	4	0.18	0.12	0	0.89	0.77	0	0.26	0.72	0.77
Modal	5	0.18	0	0.123	0.89	0.89	0	0.73	0.73	0.77
Modal	6	0.16	0	0	0.89	0.89	0.12	0.73	0.73	0.89
Modal	7	0.08	0.05	0.00	0.94	0.89	0	0.73	0.84	0.89
Modal	8	0.08	0.00	0.05	0.94	0.94	0	0.84	0.84	0.89
Modal	9	0.07	0	0	0.94	0.94	0.05	0.84	0.84	0.95
Modal	10	0.05	0	0.02	0.95	0.97	0	0.93	0.84	0.95
Modal	11	0.05	0.02	0	0.97	0.97	0	0.93	0.93	0.95
Modal	12	0.04	0	0	0.97	0.97	0.02	0.93	0.939	0.98

Tabla 8: Modales de Estructura sin aislacion.

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

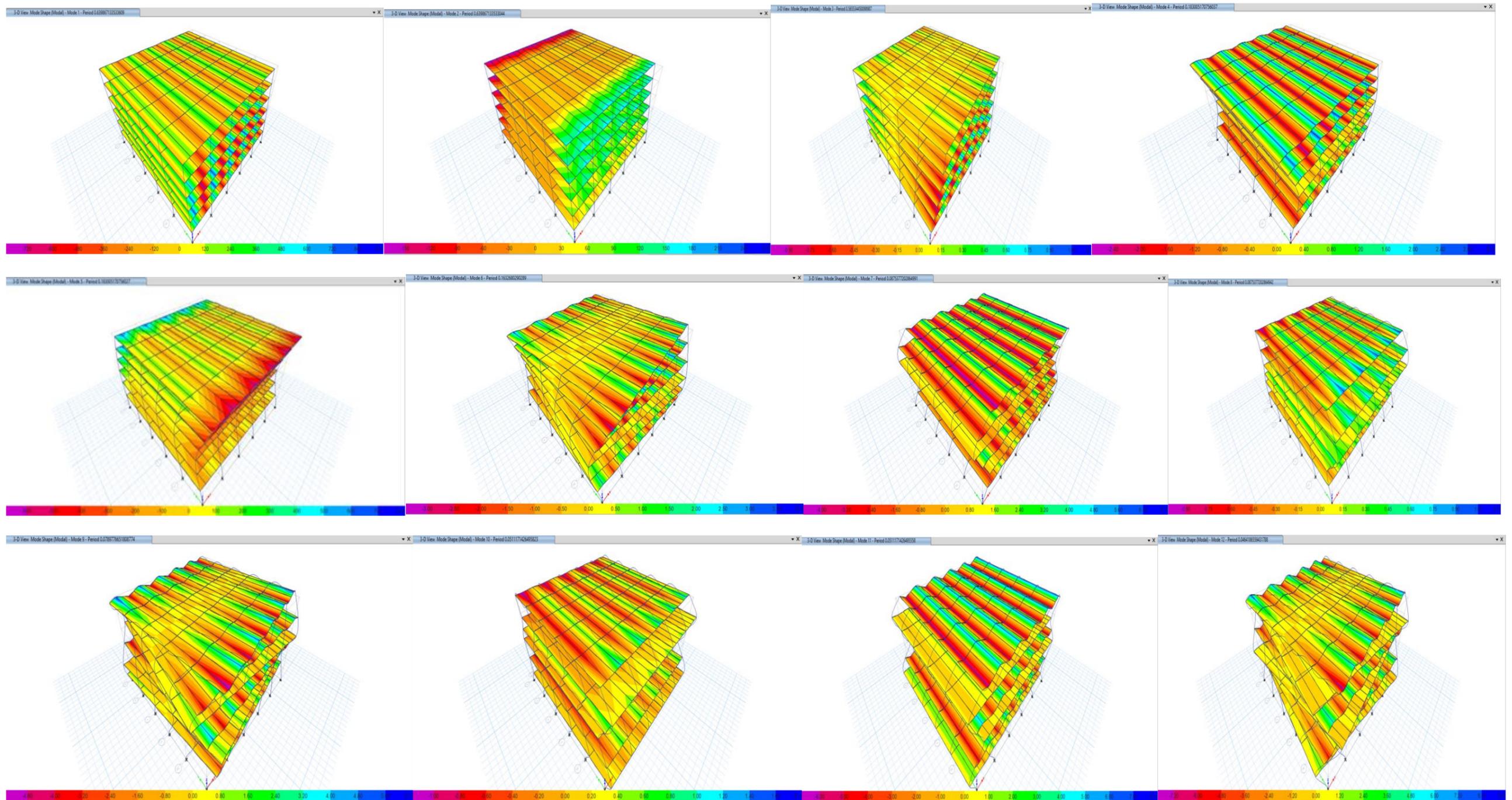


Ilustración 15: Modales de estructura tradicional.

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Elaborado por: Gustavo Espinel.

4.2.2. Factores de Reducción de Fuerza Sísmica Sin Aislación.

Para pórticos especiales resistentes a momento el factor de reducción de fuerzas sísmicas establecido es de:

$$R = 8$$

Ecuación 10

4.2.3. Coeficientes de Configuración en Planta y Elevación.

En función de la configuración estructural del sistema, los coeficientes de configuración en planta y elevación son:

$$\phi_P = 1.00 * 1.00 = 1.00$$

Ecuación 11

$$\phi_E = 1.00$$

Ecuación 12

4.2.4. Cálculo del Periodo Fundamental Aproximado.

Se calcula el periodo fundamental aproximado utilizado para el cálculo del cortante basal de diseño:

$$T_a = C_t h_n^\alpha = 0.055 \times 18^{0.90} = 0.741 [s]$$

Ecuación 13

$$T_{max} = 1.30T_a = 0.963 [s]$$

Ecuación 14

4.2.5. Factor de Importancia Sin Aislación.

La norma establece un factor de importancia en función del uso de la estructura, el factor de importancia para este proyecto es de:

$$I = 1.50$$

Ecuación 15

4.2.6. Cálculo del Cortante Basal y Coeficiente Sísmico.

$$V = \frac{IS_a T_a}{R\phi_P\phi_E} W$$

Ecuación 16

Para el cálculo del cortante basal pseudo-estático de la estructura con base fija, se usó un periodo de:

$$T_a = 0.91 [s]$$

Ecuación 17

$$V_{MCE} = \frac{(1.00) * (1.350)}{(8) * (1.00) * (1.00)} W = \frac{1.35}{8} W$$

Ecuación 18

$$V_{DLE} = \frac{(1.50) * (0.853)}{(8) * (1.00) * (1.00)} W = \frac{1.28}{8} W$$

Ecuación 19

Dentro de la normativa, para el diseño mediante los procedimientos basados en fuerzas, se utiliza únicamente el sismo de diseño, y a este nivel de amenaza se lo amplifica por el factor de importancia 1.50; por lo tanto, para el cálculo de los coeficientes de cortante basal, al máximo sismo considerado no se le aplica el factor de importancia.

4.3. Plano de Nudos

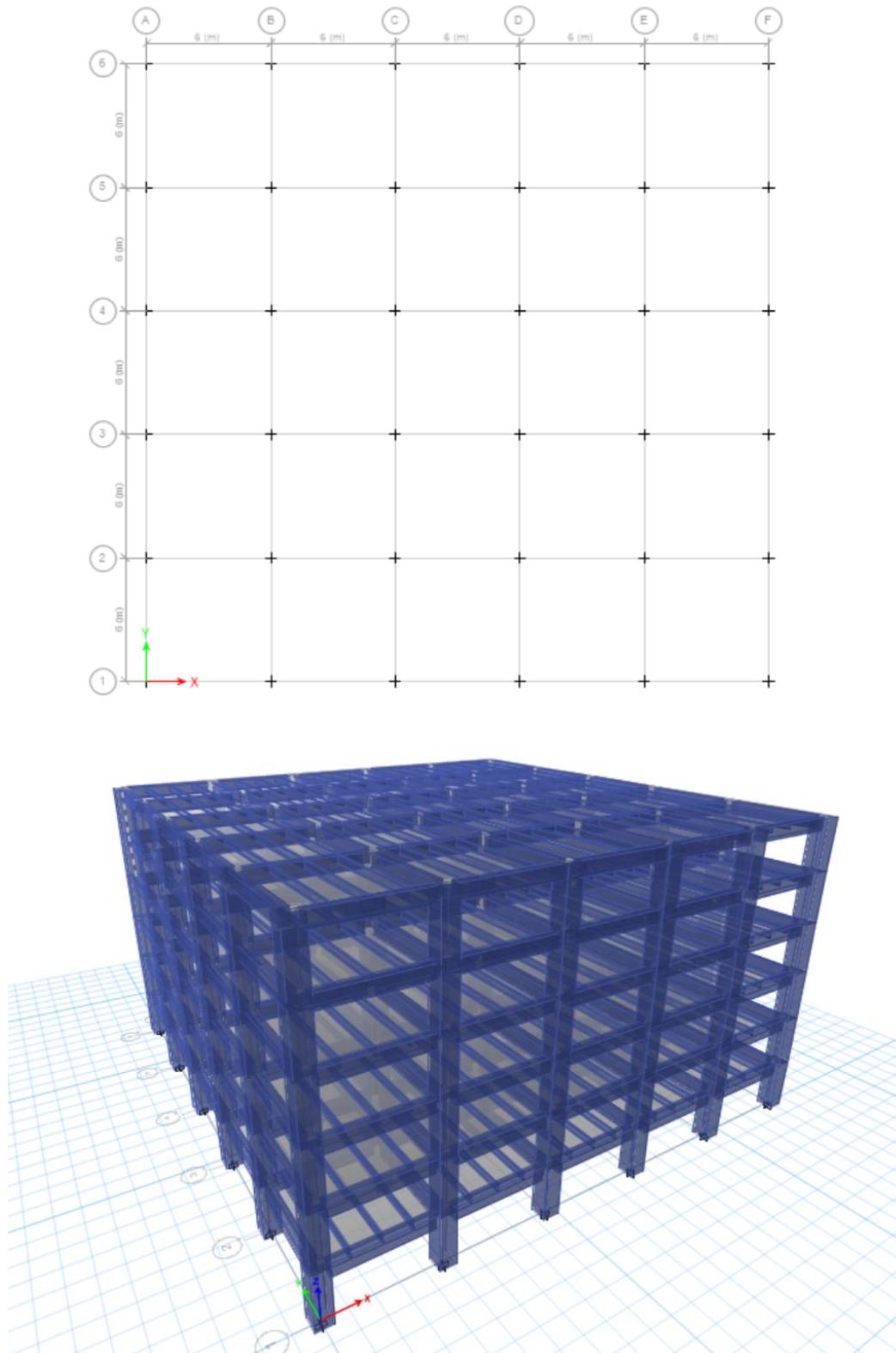


Ilustración 16: Plano de nudos, estructura tradicional.

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Diseñado por: Gustavo Espinel.

4.4. Diseño Tradicional

Se diseñaron los elementos (vigas y columnas) según las disposiciones del código ACI 318-19. Utilizando el programa de cálculo se diseñaron por resistencia los elementos de las columnas a flexocompresión y las vigas a flexión.

4.4.1. Refuerzo a flexo compresion en vigas

A continuación se presentan las gráficas indicando la cantidad de acero mínimo requerido en las vigas para resistir esfuerzos de flexión.

El acero mínimo requerido en las vigas corresponde a:

La capacidad nominal a flexión de la viga está determinada por:

$$M_n = A_s * f_y * \left(d - \frac{A_s * f_y}{1.7 * f'_c * b} \right) \quad Ec. (13)$$

Ecuación 20

4.4.2. Refuerzo a cortante en vigas

CORTANTE:

En vigas que tienen acero de refuerzo, una porción del corte lo resiste el hormigón y otra porción lo resiste el acero interno.

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s) \quad Ec. (8)$$

Ecuación 21

Donde:

V_n= resistencia nominal a corte.

V_c= resistencia nominal a corte por parte del concreto.

V_s= resistencia nominal a corte por parte del acero de refuerzo.

$$\phi = 0.75$$

$$V_c = 0.53 * \sqrt{f'_c} * b * d \quad \text{Ec. (9)}$$

Ecuación 22

Donde:

f'c= resistencia a compresión del hormigón.

b= ancho de viga.

d= distancia desde la fibra extrema en compresión hasta el centroide del refuerzo longitudinal en tensión.

$$V_s = \frac{A_v * f_y * d}{s} \quad \text{Ec. (10)}$$

Ecuación 23

Donde:

A_v= Area de estribo

s= separación entre estribos.

4.4.3. Diseño a flexo-compresión

El diseño de columnas de hormigón armado se lo realiza mediante el diagrama de interacción.

El diagrama de interacción define el área de combinaciones de valores de carga axial y momento flector donde se analiza una sección determinada que puede estar sometida a distintas combinaciones de carga. En pocas palabras es la representación gráfica de la capacidad que resiste una columna.

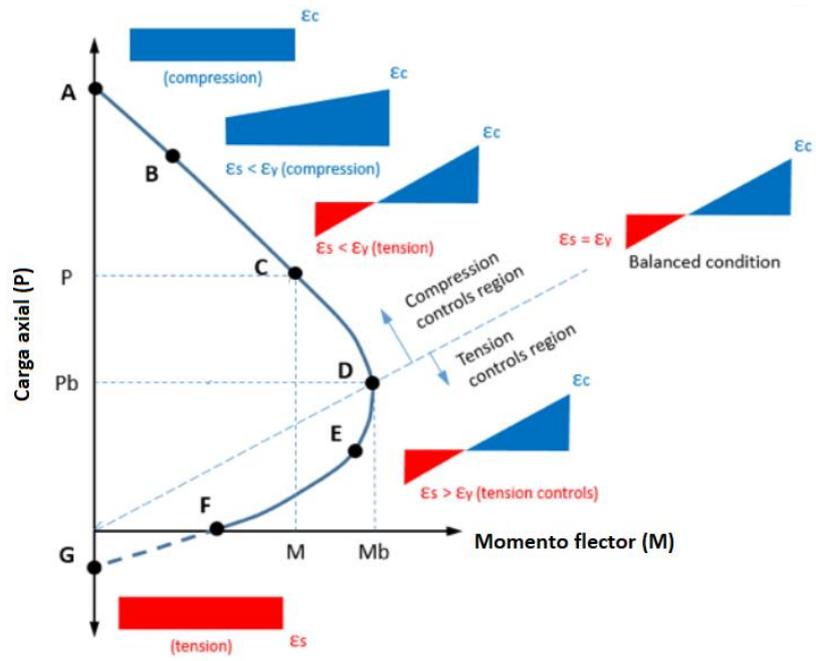


Ilustración 17: Carga axial

Elaborado por: Gustavo Espinel

4.4.3.1. Eje A



Ilustración 18: Refuerzo en vigas, eje A.

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Diseñado por: Gustavo Espinel.

4.4.3.2. Eje B



Ilustración 19: Refuerzo en vigas, eje B.

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Diseñado por: Gustavo Espinel.

4.4.3.3. Eje C



Ilustración 20: Refuerzo en vigas, eje C.

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Diseñado por: Gustavo Espinel.

4.4.3.4. Eje D



Ilustración 21: Refuerzo en vigas, eje D.

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Diseñado por: Gustavo Espinel.

4.4.3.5. Eje E

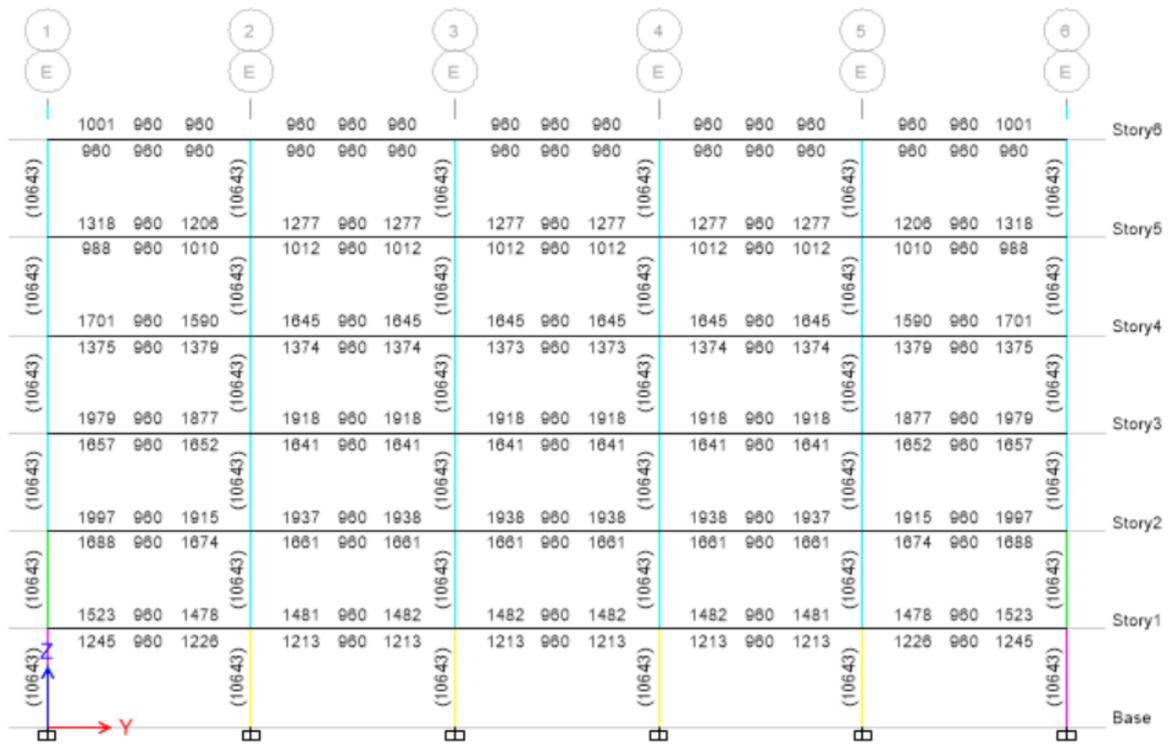


Ilustración 22: Refuerzo en vigas, eje E.

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Diseñado por: Gustavo Espinel.

4.4.3.6. Eje F



Ilustración 23: Refuerzo en vigas, eje F.

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Diseñado por: Gustavo Espinel.

4.4.4. Refuerzo en columnas

A continuación se presentan las graficas del acero provisto en las columnas diseñadas a flexocompresion.

A continuación se presenta el esquema general de armado de las columnas de acuerdo a las disposiciones del ACI 318-19.

Adicionalmente se incluye el esquema general de armadura de las columnas y las cuantías establecidas para el proyecto.

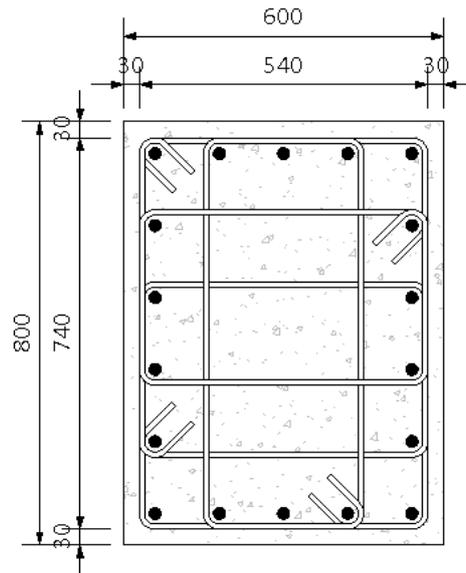


Ilustración 24: Refuerzo en columnas

Diseñado por: Gustavo Espinel.

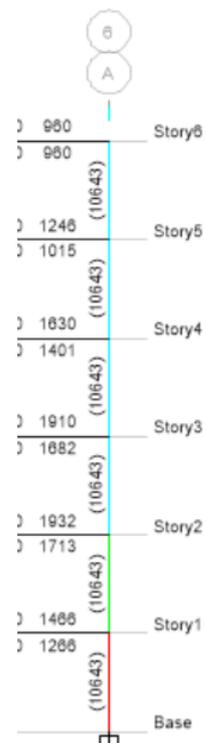
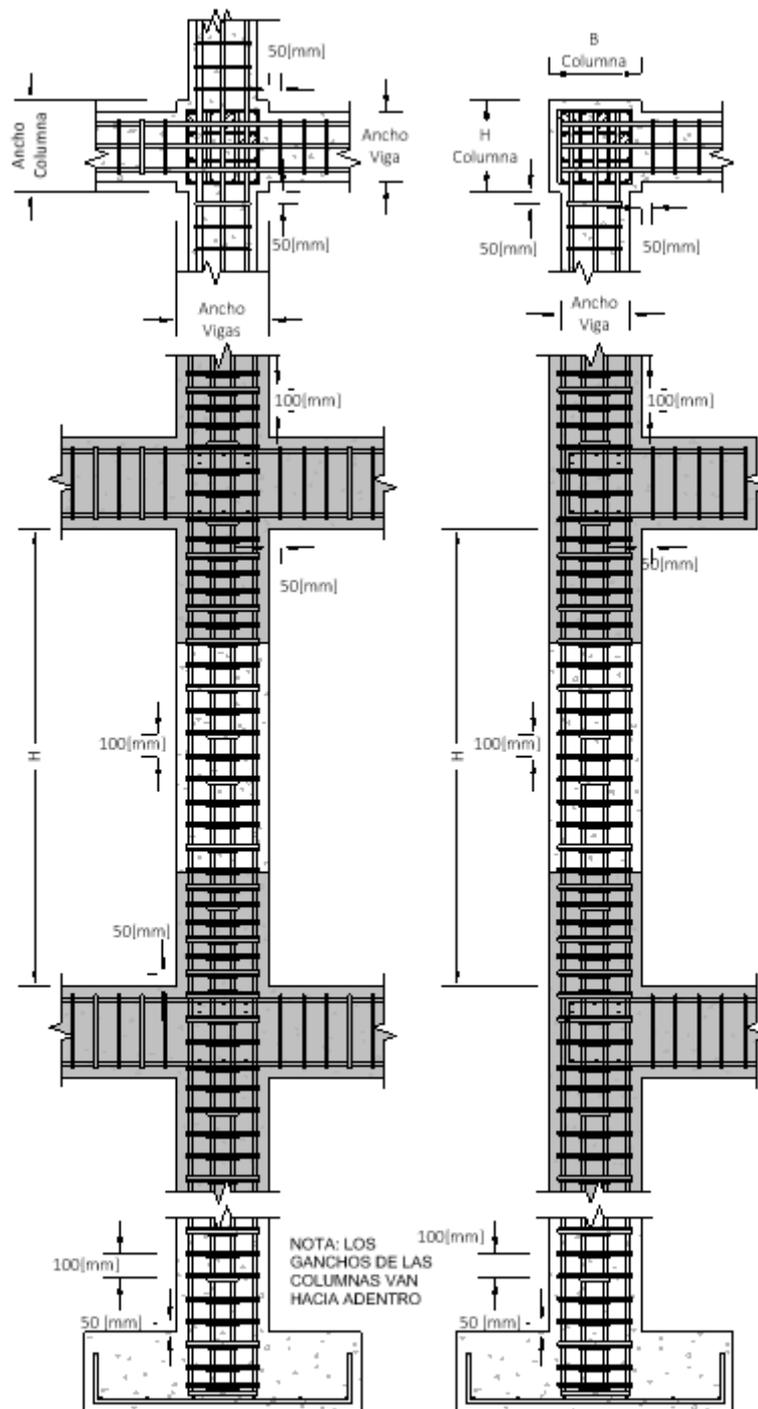


Ilustración 25: Refuerzo en columnas

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Diseñado por: Gustavo Espinel.



Detalle de Armado de Columnas

Escala: 1:75

Ilustración 26: Refuerzo en columnas, eje A6.

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Diseñado por: Gustavo Espinel.

4.4.4.1. Diagramas de interacción de columna eje A 6

En las figuras siguientes se indican los diagramas de interacción del elemento donde adicionalmente se encuentran graficadas las fuerzas actuantes.

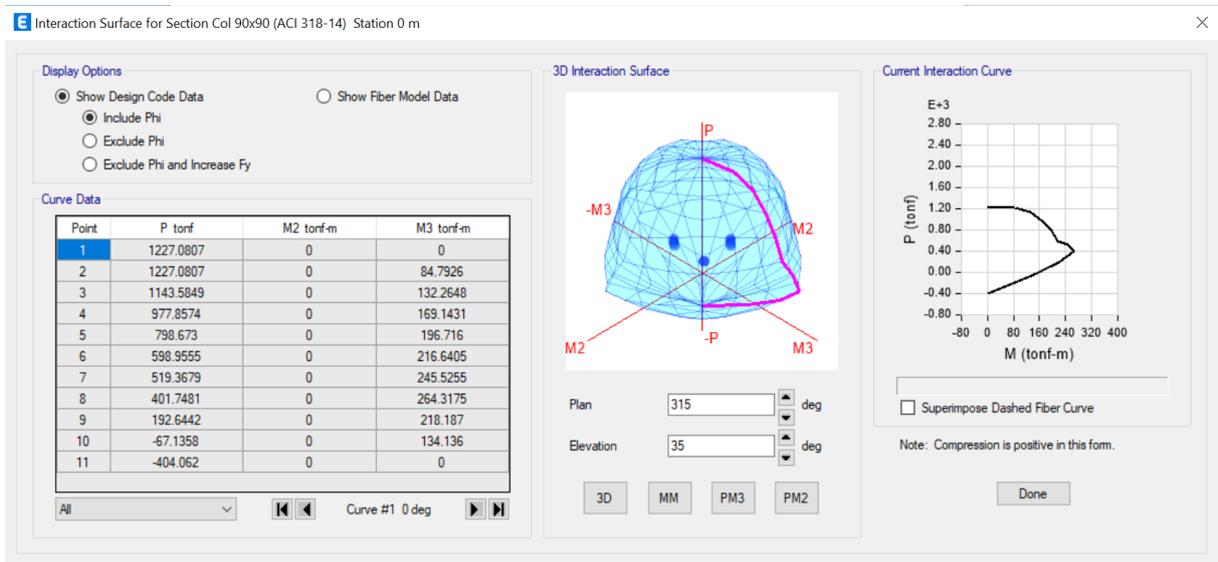


Ilustración 27 Diagrama de interacción de una columna eje A6. Piso 1

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

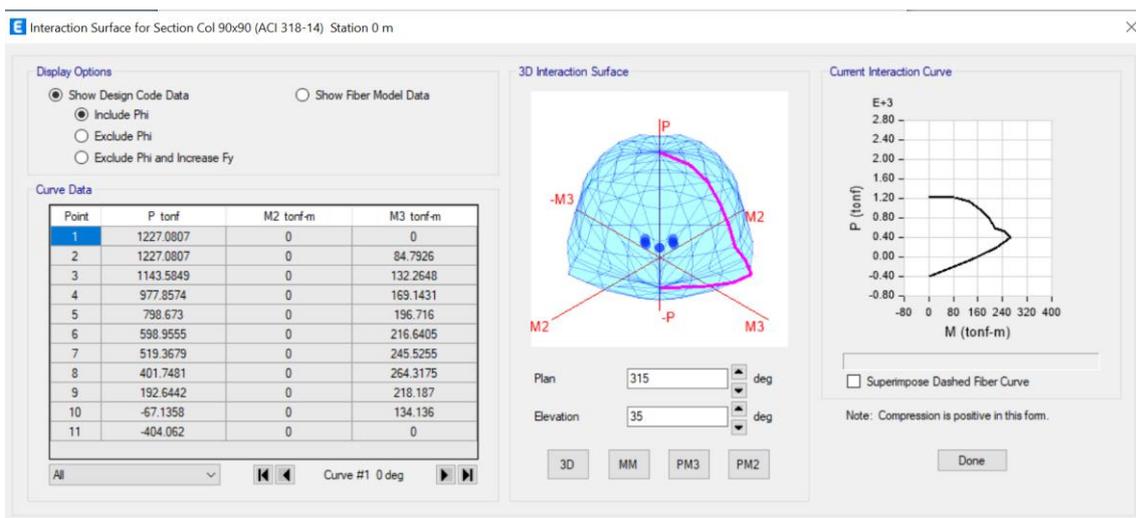


Ilustración 28 Diagrama de Interacción de una columna eje A6. Piso 2

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

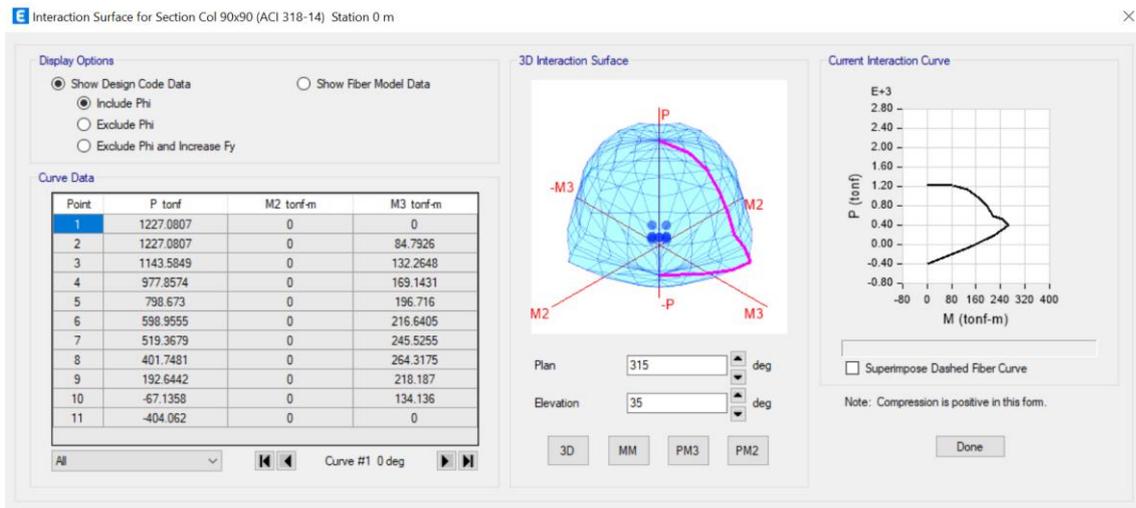


Ilustración 29 Diagrama de interacción de una columna eje A6. Piso 3

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

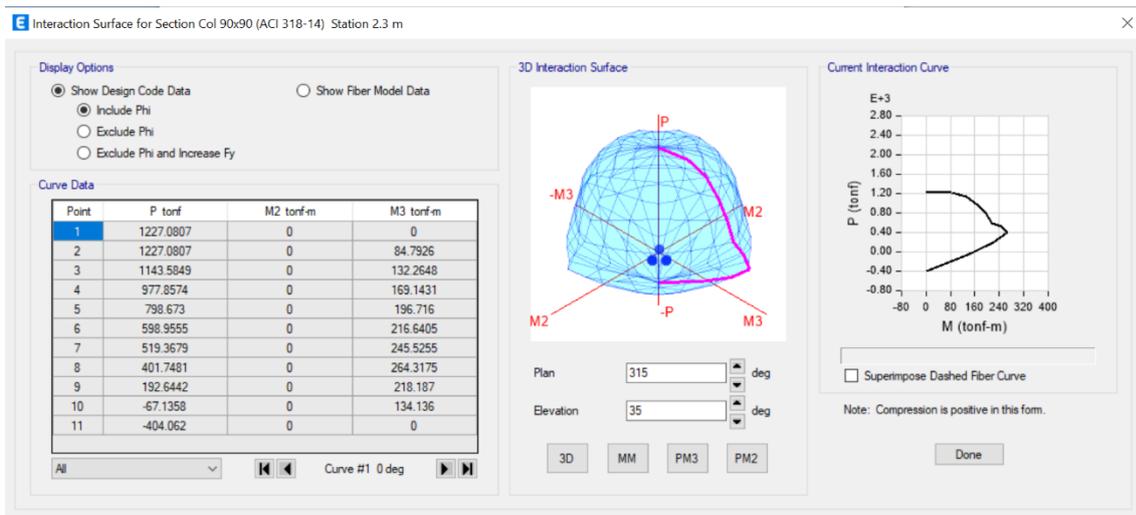


Ilustración 30 Diagrama de interacción de una columna eje A6. Piso 4

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

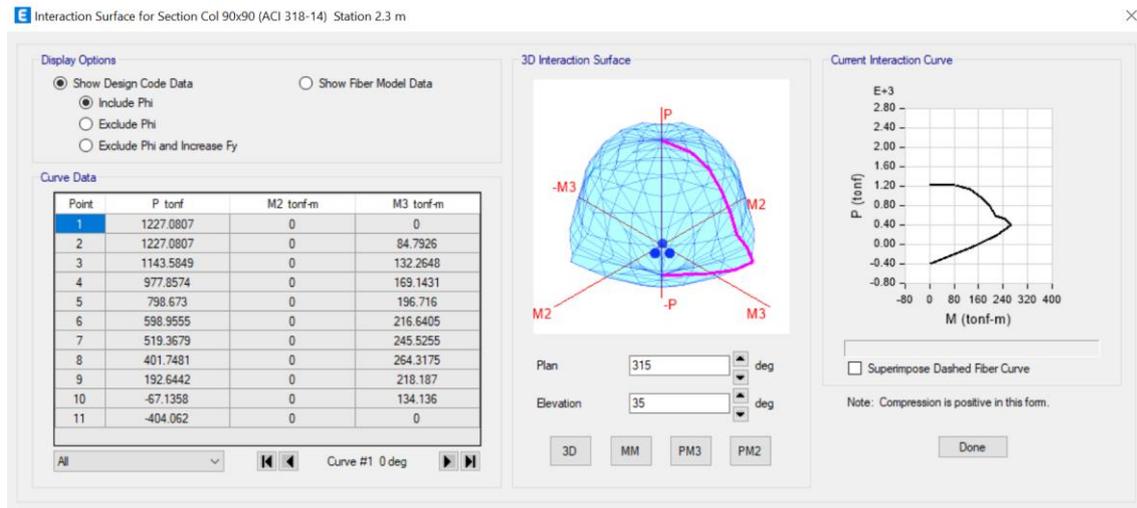


Ilustración 31 Diagrama de interacción de una columna eje A6. Piso 5

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

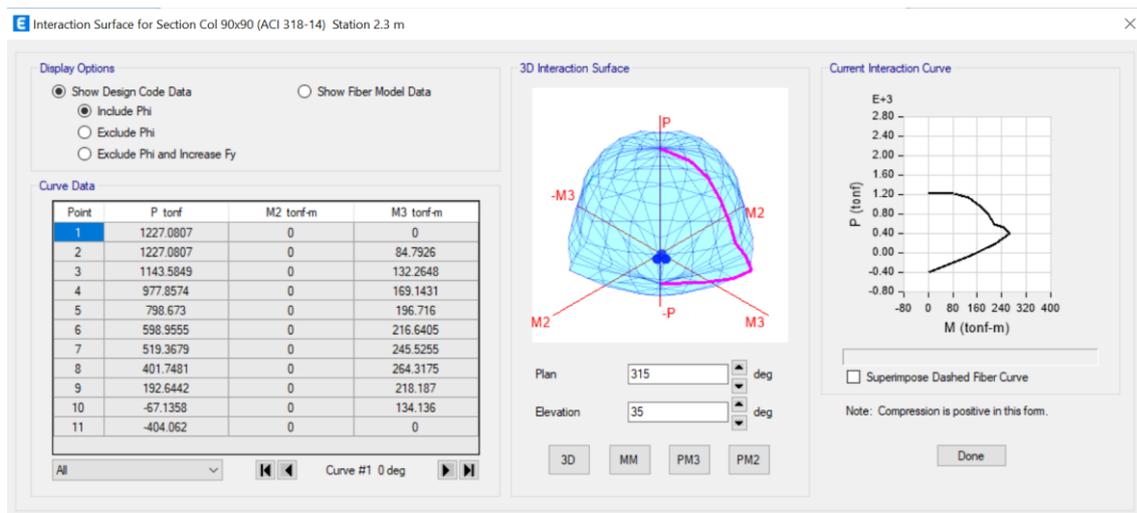


Ilustración 32 Diagrama de interacción de una columna eje A6. Piso 6

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

4.5. Cálculo de derivas inelásticas estructura convencional.

Se presentan los resultados obtenidos del cálculo de derivas tanto para la estructura convencional.

Al ser la estructura simétrica solo se verificó en una sola dirección, adicionalmente las derivas obtenidas ya se encuentran multiplicadas por el factor de amplificación de desplazamientos.

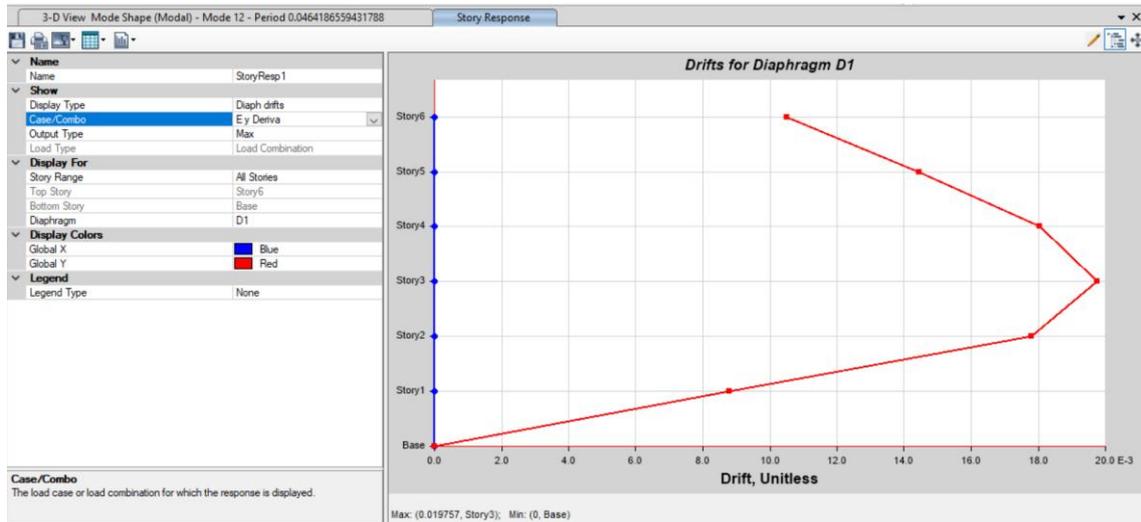


Ilustración 33 Derivas inelásticas Estructura convencional A

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

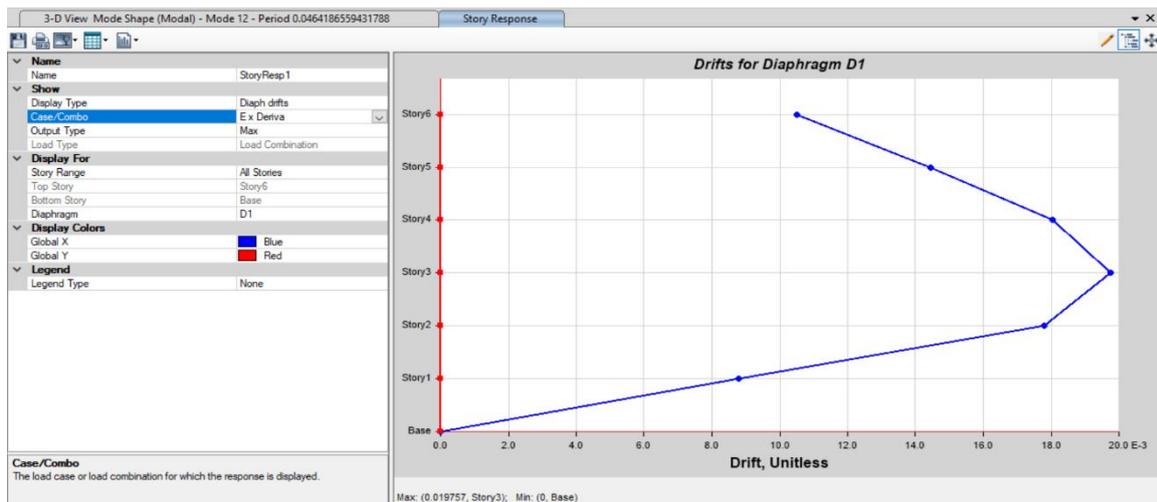


Ilustración 34 Derivas inelásticas Estructura convencional B

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

5. DISEÑO DE LOS AISLADORES – MARCO TEÓRICO

5.1. Combinaciones de Carga para Estabilidad Vertical – ASCE 7-16

Cada elemento del sistema de asilacion debera ser diseñado para permanecer estable bajo la carga de diseño vertical cuando esta esta sometido al maximo desplazamiento horizontal.

La carga vertical de diseño sera calculada utilizando las maximas y minimas combinaciones establecidas por la norma.

La carga vertical promedio, mínima y máxima en tipo de unidad de aislador se calculará a partir de la aplicación de fuerzas sísmicas horizontales, Q_E , causadas por movimientos de tierra MCE y las siguientes combinaciones de carga aplicables. Según lo explica las siguientes formulas.

$$P_{AVG} = 1.00D + 0.50L$$

Ecuación 24

$$P_{MAX} = 1.20D + 0.20S_{MS}D + 1.00L + \rho Q_E$$

Ecuación 25-combinacion 2 ASCE

$$P_{MIN} = 0.90D - 0.20S_{MS}D - \rho Q_E$$

Ecuación 26-combinacion 3 ASCE

5.2. Propiedades del Sistema de Aislación a Máximo Desplazamiento

La rigidez efectiva, k_M , del sistema de aislamiento en el desplazamiento máximo, D_M , se calculará utilizando el comportamiento de fuerza-deflexión del límite superior e inferior de las unidades de aislador individuales, según la siguiente ecuación.

$$k_M = \frac{\sum |F_M^+| + \sum |F_M^-|}{2D_M}$$

Ecuación 27

La amortiguación efectiva, β_M , del sistema de aislamiento en el desplazamiento máximo, D_M , se calculará utilizando el comportamiento de la fuerza-deflexión del límite superior y del límite inferior de las unidades de aisladores individuales de acuerdo con:

$$\beta_M = \frac{\sum E_M}{2\pi k_M D_M^2}$$

Ecuación 28

Donde,

- $\sum E_M$ es la energía total disipada en el Sistema de aislamiento durante un ciclo de respuesta para el desplazamiento D_M .
- $\sum |F_M^+|$ es la suma, para todas las unidades del sistema de aislamiento, de los valores absolutos de la fuerza positiva para un desplazamiento igual al D_M .
- $\sum |F_M^-|$ es la suma, para todas las unidades del sistema de aislamiento, de los valores absolutos de la fuerza negativa para un desplazamiento igual al D_M .

5.3. Desplazamiento Máximo

El sistema de aislamiento se diseñará y construirá para resistir, como mínimo, el desplazamiento máximo, D_M , determinado utilizando las propiedades de límite superior e inferior, en la dirección más crítica de la respuesta horizontal, se lo calculara utilizando:

$$D_M = \frac{gS_{M1}T_M}{4\pi^2 B_M}$$

Ecuación 29

Para el trabajo no se utilizó la fórmula propuesta en la norma ASCE, se determinó el desplazamiento objetivo del sistema directamente del espectro de desplazamientos.

Table 17.5-1 Damping Factor, B_M

Effective Damping, β_M (percentage of critical) ^{a,b}	B_M Factor
≤2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
≥50	2.0

^aThe damping factor shall be based on the effective damping of the isolation system determined in accordance with the requirements of Section 17.2.8.6.

^bThe damping factor shall be based on linear interpolation for effective damping values other than those given.

Tabla 9 Factor de amortiguamiento -Desplazamiento Máximo, B_M .

Fuente: (ASCE 7, 2016)

Donde,

- S_{M1} es la aceleración espectral del MCE al 5% para un segundo.
- T_M es el periodo efectivo de la estructura sísmicamente aislada para el desplazamiento D_M en la dirección considerada.
- B_M es el coeficiente numérico para el amortiguamiento efectivo del sistema de aislación en función de β_M y D_M .

5.4. Período Efectivo a Máximo Desplazamiento

El período efectivo de la estructura aislada, T_M , en el desplazamiento máximo, D_M , se determinará utilizando las características de deformación del límite superior y del límite inferior del sistema de aislamiento:

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_M g}}$$

Ecuación 30

Donde,

- W es el peso efectivo sísmico de la estructura sobre el nivel de aislación.
- k_M es la rigidez efectiva del sistema de aislación a máximo desplazamiento, D_M .

5.5. Desplazamiento Total Maximo

El desplazamiento máximo total, D_{TM} , del sistema de aislamiento incluirá el desplazamiento adicional causado por la torsión real y accidental calculada a partir de la distribución espacial de la rigidez lateral del sistema de aislamiento y la ubicación más desventajosa de la masa excéntrica. El desplazamiento máximo total, D_{TM} , de los elementos de un sistema de aislamiento no se considerará menor a:

$$D_{TM} = D_M \left[1 + \left(\frac{y}{P_T^2} \right) \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \geq 1.15D_M$$

Ecuación 31

Donde,

- D_M es el desplazamiento en el centro de rigidez del sistema de aislación en la dirección bajo consideración.

- y es la distancia entre los centros de rigidez del sistema de aislación y el elemento de interés medido perpendicular a la dirección de la carga sísmica bajo consideración.
- he es la excentricidad real medida en planta entre el centro de masas de la estructura sobre el nivel de la interfase de aislamiento y el centro de rigidez del sistema de aislación, más la excentricidad accidental, tomada como el 5% de la longitud máxima en planta perpendicular a la dirección de la fuerza en consideración.
- b es la menor dimensión en planta de la estructura.
- d es la mayor dimensión en planta de la estructura.
- PT es la ratio del periodo efectivo traslacional del sistema de aislación al periodo efectivo torsional del sistema:

$$P_T = \frac{1}{r_1} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2)}{N}} \geq 1.00$$

Ecuación 32

Donde,

- Xi, Yi, distancias horizontales del centro de masas al aislador ith.
- N es el número de aisladores.
- r1 radio de giro del sistema de aisladores

5.6. Fuerzas mínimas requeridas para elementos estructurales debajo del nivel de base

En el sistema de aislamiento, los cimientos y los elementos estructurales debajo del nivel de la base, deben diseñarse y construirse para resistir una fuerza sísmica lateral mínima, V_b , utilizando todos los requisitos aplicables para estructuras no aisladas que utilizan las propiedades del sistema de aislamiento de límite superior e inferior.

$$V_b = k_m D_M$$

Ecuación 33

5.7. Fuerzas mínimas en elementos sobre la base

La estructura por encima del nivel de la base debe diseñarse y construirse utilizando todos los requisitos aplicables para estructuras no aisladas para una fuerza cortante mínima, V_S , determinada utilizando las propiedades del sistema de aislamiento de límite superior e inferior:

$$V_S = \frac{V_{ST}}{R_1}$$

Ecuación 34

El factor R_1 se basará en el tipo de sistema de resistencia a la fuerza sísmica utilizado para la estructura por encima del nivel de la base en la dirección de interés y será 3/8 del valor de R , con un valor máximo no mayor a 2 y un mínimo valor no inferior a 1.

Donde,

- V_{st} es la fuerza total no reducida lateral sísmica o corte en los elementos sobre la base.

$$V_{st} = V_b \left(\frac{W_s}{W} \right)^{(1-2.5\beta m)}$$

Ecuación 35

Donde,

- W es el peso efectivo de la estructura sobre la interfase de aislación.
- W_s es el peso efectivo de la estructura sobre la interfase de aislación excluyendo el peso sísmico efectivo del nivel base. El peso efectivo de la estructura, W_s , será considerado igual a W ; cuando la distancia desde el tope de un aislador a la parte baja de la base exceda 0.90m

5.8. Límites de V_s

El valor de V_s no se debe tomar a menos que:

1. La fuerza sísmica lateral requerida para una estructura de base fija del mismo peso sísmico efectivo, W_s , y un período igual al período del sistema de aislamiento usando propiedades de límite superior.
2. La fuerza cortante base que corresponde a la carga de viento de diseño factorizada.
3. La fuerza sísmica lateral, V_{st} , con V_b igual a la fuerza requerida para activar completamente

- A. 1,50 veces las propiedades nominales para el nivel de rendimiento de un sistema de ablandamiento,
- B. La capacidad máxima de un sistema resistente al viento de sacrificio,
- C. La fuerza de fricción de ruptura de un sistema deslizante,
- D. La fuerza de desplazamiento cero de un sistema de deslizamiento que sigue un ciclo dinámico completo de movimiento en DM.

5.9. Distribución Vertical de la Fuerza

La fuerza sísmica lateral, V_S , se distribuirá sobre la altura de la estructura por encima del nivel de la base, utilizando las propiedades de límite superior e inferior del sistema de aislación.

$$F_1 = \frac{(V_b - V_{st})}{R_1}$$

Ecuación 36

$$F_x = C_{vx} V_S$$

Ecuación 37

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=2}^n w_i h_i^x}$$

Ecuación 38

$$k = 14\beta_M T_{fb}$$

Ecuación 39

Donde,

- F_1 es la fuerza lateral sísmica inducida en el nivel 1, el nivel de la base.
- F_x es la fuerza lateral sísmica inducida en el nivel x , sobre el nivel de la base.
- C_{vx} es el factor vertical de distribución de carga.
- w_i, w_x , porción de W_s que está localizada en o asignada al nivel i o x .
- h_i, h_x , altura sobre el nivel de aislación del nivel i o x .
- T_{fb} el periodo fundamental, en s, de la estructura sobre la interfase de aislación determinada usando análisis modal racional suponiendo condiciones de base fija.

5.10. Limites de Deriva

La derivamaxima de piso de la estructura sobre el sistema de aislamiento no debe exceder 0.015 hsx. La deriva se calculará con Cd para la estructura aislada igual a R1 .

5.11. Masa sismica de la estructura

La masa sísmica de toda la superestructura es:

$$W = 5390 [tf]$$

Ecuación 40

Para la masa sísmica de la estructura se tomó el peso propio más la carga muerta, como está indicado en la normativa ASCE 7-16.

$$W_s = 4540 [tf]$$

Ecuación 41

5.11.1. Fuerza de activación.

Tomando en cuenta que sistema se debe activar ante sismos frecuentes, es conveniente usar la menor fuerza de activación posible. La fuerza de activación es una función del desplazamiento objetivo y del amortiguamiento, Lo que implica que para el desplazamiento objetivo impuesto una fuerza de activación más baja resulta en una reduccion del amortiguamiento objetivo del Sistema.

6. Analisis de fuerza de activacion- desplazamiento objetivo- amortiguamiento

En el presente capitulo en las gráficas presentadas posteriormente, podemos ver la relación entre el desplazamiento objetivo, el amortiguamiento, y la fuerza de activación del sistema. Se puede apreciar que para un sistema con un desplazamiento de 0.35 a 0.45 [m], con una fuerza de activación que se encuentre cerca de 0.05W, el amortiguamiento objetivo debería estar cerca del 10%.

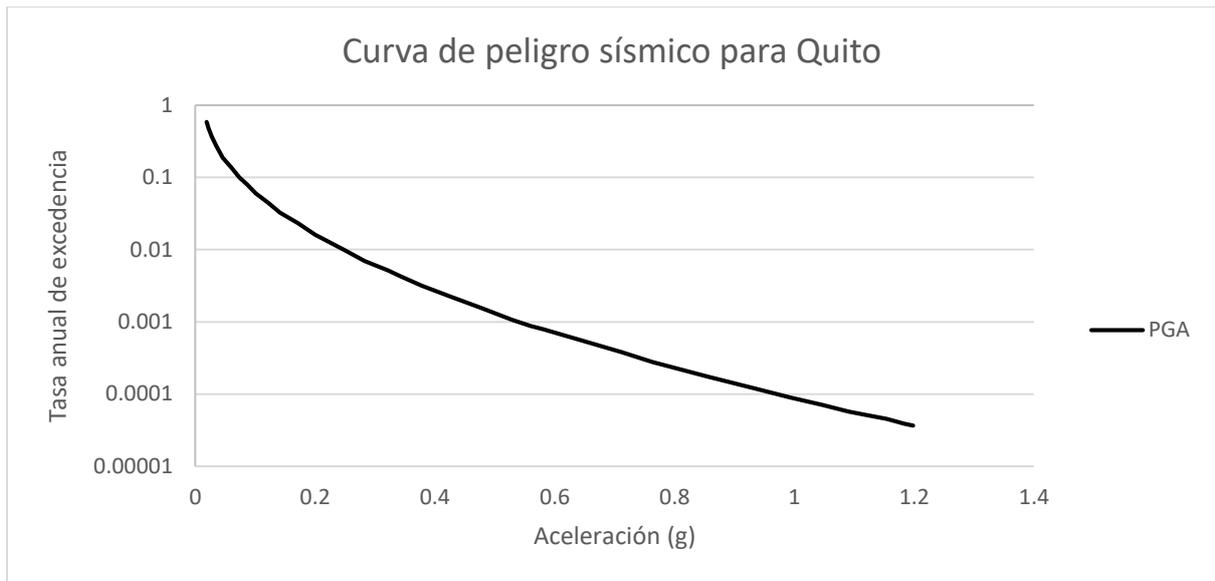


Ilustración 35 Curva de peligro sísmico para Quito- PGA

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

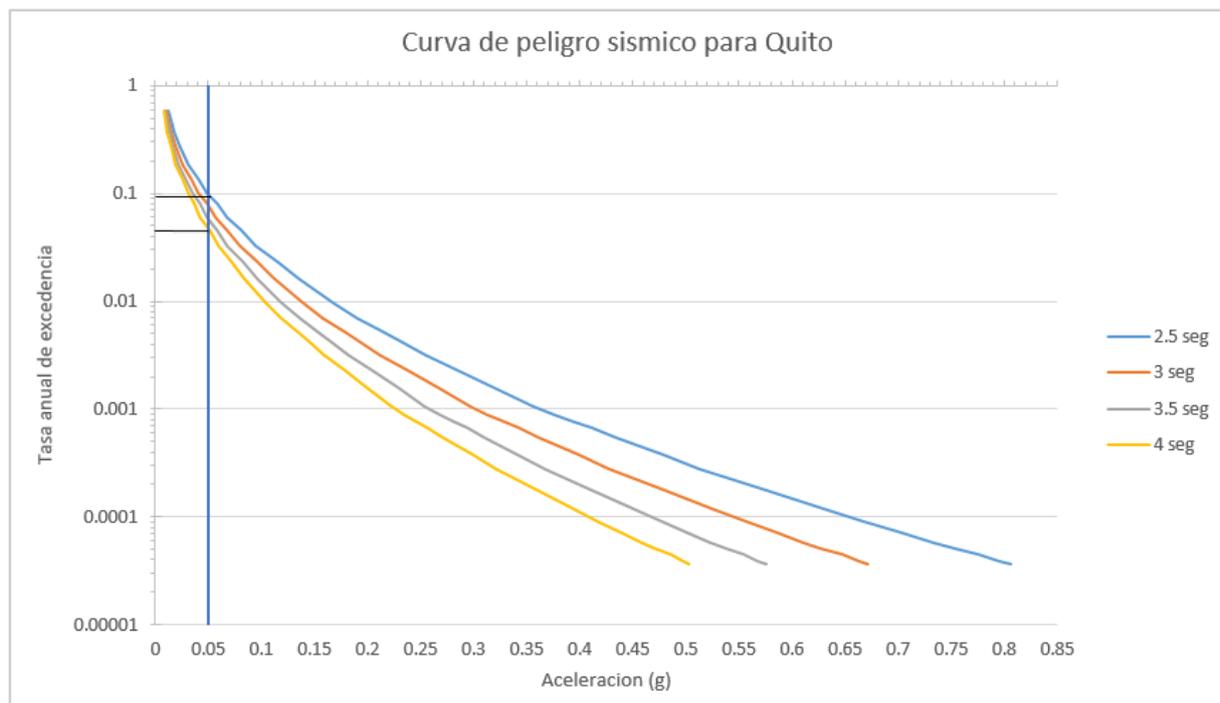


Ilustración 36 Curva de peligro sísmico para Quito

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

Periodo (seg)	Tasa anual de excedencia	TR (años)	P ocurrencia (%)	P excedencia (%)
4	0.045	22	83.5	16.5
2.5	0.097	10	78.5	21.5

Tabla 10 Tasa anual de excedencia

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

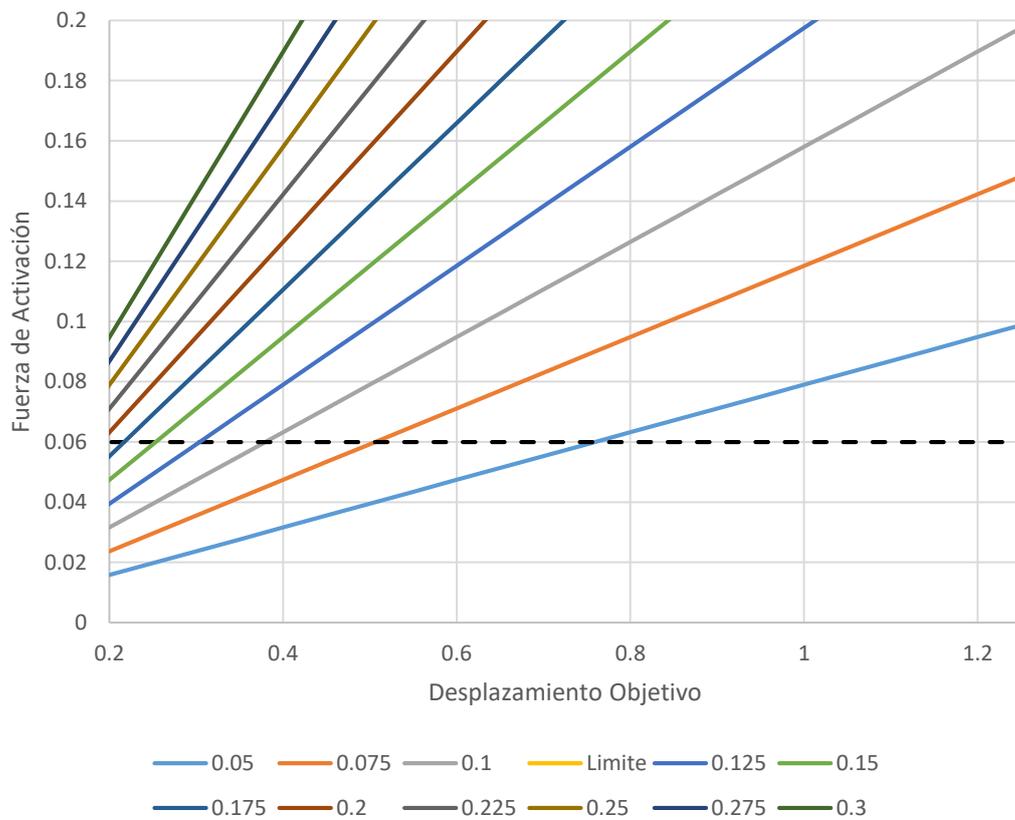


Ilustración 37 Fuerza de Activación- Desplazamiento de Objetivo -Amortiguamiento

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

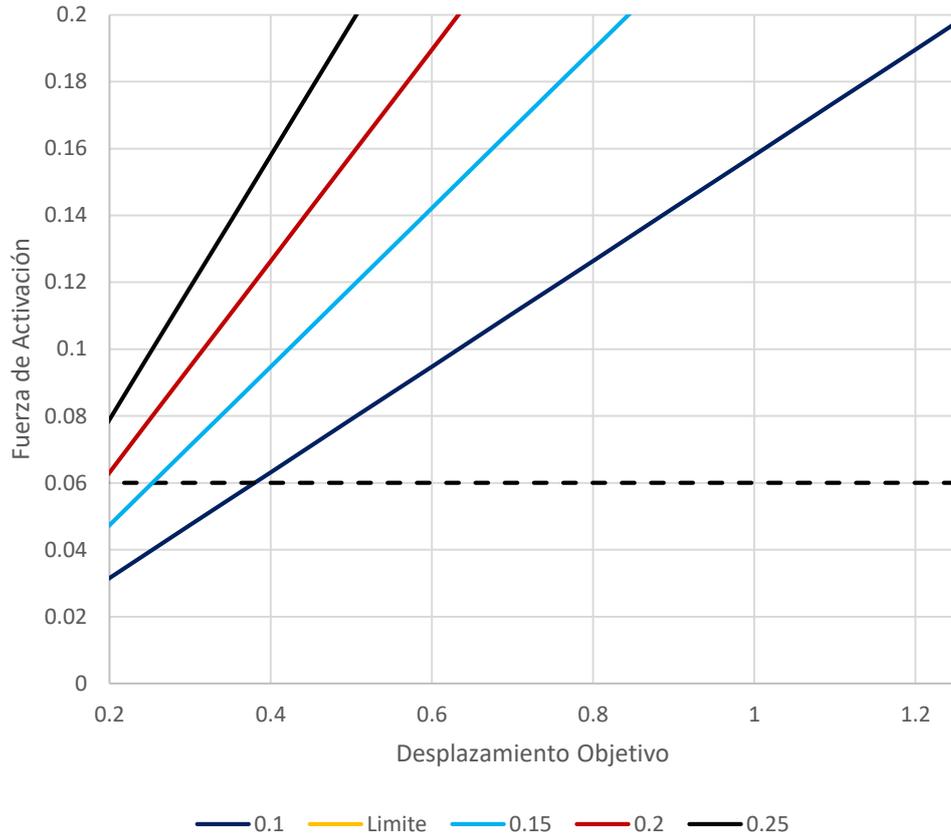


Ilustración 38 Fuerza de Activación- Desplazamiento de Objetivo -Amortiguamiento

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

Se puede ver que para una fuerza de activación de 6% utilizando un amortiguamiento de 10% puede ser alcanzada utilizando un desplazamiento objetivo de aproximadamente 40cm.

7. DISEÑO DE AISLADORES

7.1. Procedimiento General

Con la información de cargas axiales obtenida, procedemos a realizar el diseño de los aisladores para el desplazamiento objetivo y el nivel de amortiguamiento requerido.

El procedimiento general realizado para el diseño de los aisladores es:

- Se determina la carga axial que llevan los aisladores utilizados un modelo matemático que esta caracterizado por las propiedades requeridas por el sistema equivalente de un SDOF para alcanzar el desplazamiento y amortiguamiento objetivos.
- Se determinan los tipos de aisladores que se van a usar en la estructura, para esto se segmenta el tipo de aisladores en función de la carga axial que estos llevan.
- Se selecciona el tipo de aisladores van a ser utilizados con núcleo de plomo, y cuáles van a ser de goma natural. Esta selección se la realiza tomando en cuenta el amortiguamiento objetivo impuesto para el sistema y la fuerza de activación que se busca obtener. La posición de los aisladores se la realiza en función de los criterios de deformación residual del sistema y rigidez torsional; con el fin de disminuir la deformación residual se busca concentrar los aisladores en el centro de masas de la estructura, mientras que para aumentar la rigidez torsional del sistema se busca alejar al máximo los aisladores del centro de masas; por lo tanto, la ubicación debe ser balanceada usando estos dos criterios.
- Posteriormente se diseña el aislador con núcleo de plomo, primero se calcula cual es la energía requerida por todo el sistema para alcanzar el desplazamiento objetivo y el nivel de amortiguamiento deseado, y se estima el área mínima de plomo requerida y la fuerza de activación del sistema. Se verifica que el valor de la fuerza de restitución del sistema se consecuente con lo esperado, si no lo es, se tiene que modificar los valores de

desplazamiento y amortiguamiento objetivos. Dimensionado el núcleo de plomo, se diseña el aislador con las propiedades geométricas necesarias para la fabricación y se calcula cual es el valor de la rigidez que aporta este aislador en el sistema.

- Se decide cuanto asignar de la rigidez faltante del sistema a los aisladores restantes y se calcula el diámetro de los aisladores requerido para alcanzar la rigidez objetiva.
- Una vez determinadas las dimensiones requeridas para cumplir con los requerimientos del sistema objetivo se procede a dimensionar los aisladores para tamaños de molde estándar
- Con las dimensiones reales se determinan las propiedades reales de los aisladores, y con eso se calcula la excentricidad del sistema.
- Se rediseña el sistema para minimizar la excentricidad, para esto se puede aumentar o disminuir los aisladores.
- Con las propiedades del sistema corregido se realiza una corrección al modelo matemático usando las propiedades reales calculadas y se verifica las nuevas cargas axiales en el aislador cumplan.
- En el modelo matemático adicionalmente y verifica que el valor del desplazamiento total máximo sea menor que el asumido en el diseño del aislador, en caso de no cumplirse esto, se debe verificar el diseño del aislador.
- Una vez diseñado el sistema se debe verificar que este cumpla con todos los requisitos para las propiedades upper-bound y lower-bound.
- Se calcula y verifica la fuerza de restitución del sistema.
- Se distribuyen las cargas a la super estructura.

7.2. Primera Iteración

Para poder pre-dimensionar el sistema de aislación se asume que el sistema de la superestructura es rígido y el sistema puede ser caracterizado como un oscilador de un grado de libertad.

Para iniciar el procedimiento de diseño se debe imponer un periodo y amortiguamiento objetivo para el sistema.

7.2.1. Definición del Periodo Objetivo del Sistema.

La selección del periodo objetivo de la estructura está basada en la filosofía de elongación de periodo (“weakening”) y aumento de amortiguamiento (“dampening”), esto puede ser interpretado gráficamente mediante un espectro de aceleraciones y desplazamientos (ADS).

Para esto se tiende a usar un periodo objetivo para el sistema que es de aproximadamente 2 a 3 veces el periodo del sistema sin aislamiento.

Se debe tomar en cuenta que periodos muy grandes requieren de una alta fuerza de activación.

Por lo tanto, se debe buscar un balance donde el sistema de aislación responda a ante fuerzas laterales en rangos donde los eventos sísmicos sean de baja energía, y tenga una fuerza de activación suficientemente baja para que en sismos frecuentes se logre activar.

$$T_M = 2.00 \text{ [s]}$$

Ecuación 42

Para la primera iteración se selección un periodo inicial de 3.5s.

7.2.2. Definición preliminar del amortiguamiento objetivo del sistema.

Para los cálculos preliminares y para pre-dimensionar el aislador se optó por seleccionar un amortiguamiento efectivo del sistema correspondiente a:

$$\beta_{eff} = 0.10$$

Ecuación 43

Se selecciono un valor de 10 %.

7.2.3. Estimación del Factor de Reducción de Demanda.

Para el amortiguamiento objetivo seleccionado del sistema el factor de amortiguamiento es:

$$B_M = 1.20$$

Ecuación 44

Table 17.5-1 Damping Factor, B_M

Effective Damping, β_M (percentage of critical) ^{a,b}	B_M Factor
≤2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
≥50	2.0

^aThe damping factor shall be based on the effective damping of the isolation system determined in accordance with the requirements of Section 17.2.8.6.

^bThe damping factor shall be based on linear interpolation for effective damping values other than those given.

Tabla 11 Factor de amortiguamiento- Estimacion del Factor de Reduccino de Demanda

Fuente: (ASCE 7, 2016)

Editado por: Gustavo Espinel

7.2.4. Rigidez Requerida para el Amortiguamiento Objetivo.

$$k_M = \frac{4\pi^2 W}{T_M^2 g} = \frac{4\pi^2 (5390 \text{ tf})}{(2.00 \text{ s})^2 (9.81 \text{ m/s}^2)} = 5422 \left[\frac{\text{tf}}{\text{m}} \right]$$

Ecuación 45

7.2.5. Desplazamiento Requerido por el Sistema.

Para determinar el desplazamiento del sistema se utiliza el espectro de desplazamientos definido para la estructura, donde:

$$D_M = \frac{D_C}{T_C} T_M = 0.541 \text{ [m]}$$

Ecuación 46

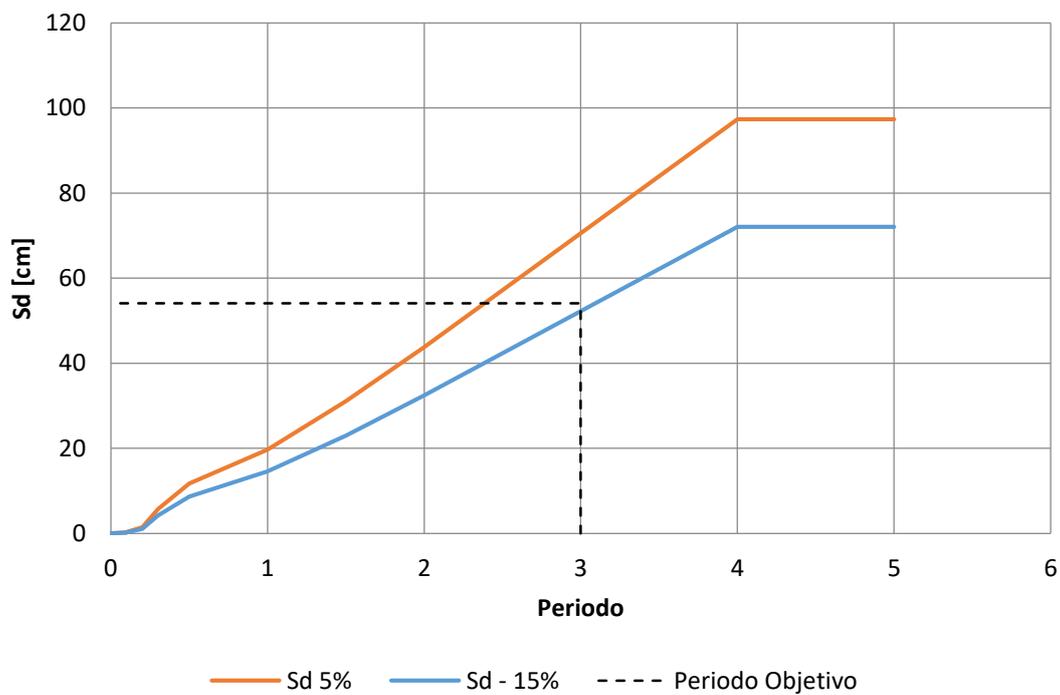


Ilustración 39 Desplazamiento Requerido por el Sistema- S_d (cm) x Periodo

Editado por: Gustavo Espinel

7.2.5.1. Espectro de Aceleraciones Modificado

Para realizar el análisis modal de la estructura se realiza un artificio donde se modifica parcialmente el espectro en periodos altos para el valor del amortiguamiento objetivo del sistema. Para un amortiguamiento de 10% el espectro usado es:

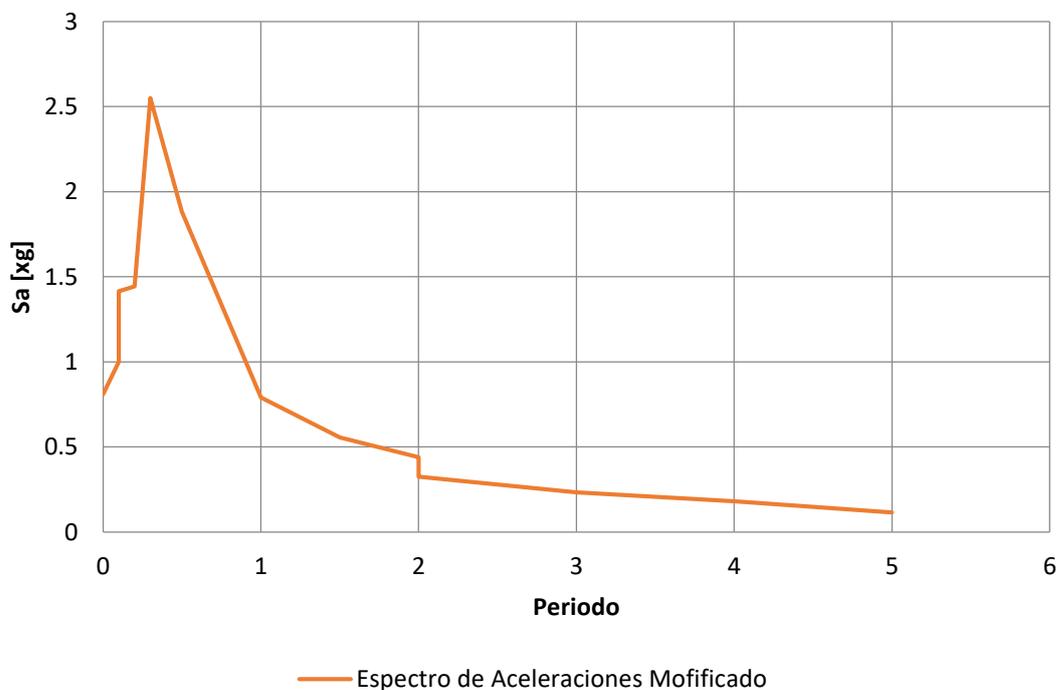


Ilustración 40 Espectro de Aceleraciones Modificado- S_a (xg) x Periodo

Editado por: Gustavo Espinel

Se modificaron las aceleraciones superiores a los 2s para que esto no influya en la respuesta de la superestructura.

7.2.6. Desplazamiento Total Máximo

Para la primera aproximación, ya que aún no se determina el tipo de aisladores ni su ubicación se considera que el desplazamiento total máximo es:

$$D_{TM} = 1.20D_M = 0.650 [m]$$

Ecuación 47

7.2.7. Modelo Preliminar.

Para la estimación inicial de las cargas axiales mínimas y máximas del sistema se utilizó un modelo matemático donde se definieron todos los aisladores con las mismas propiedades.

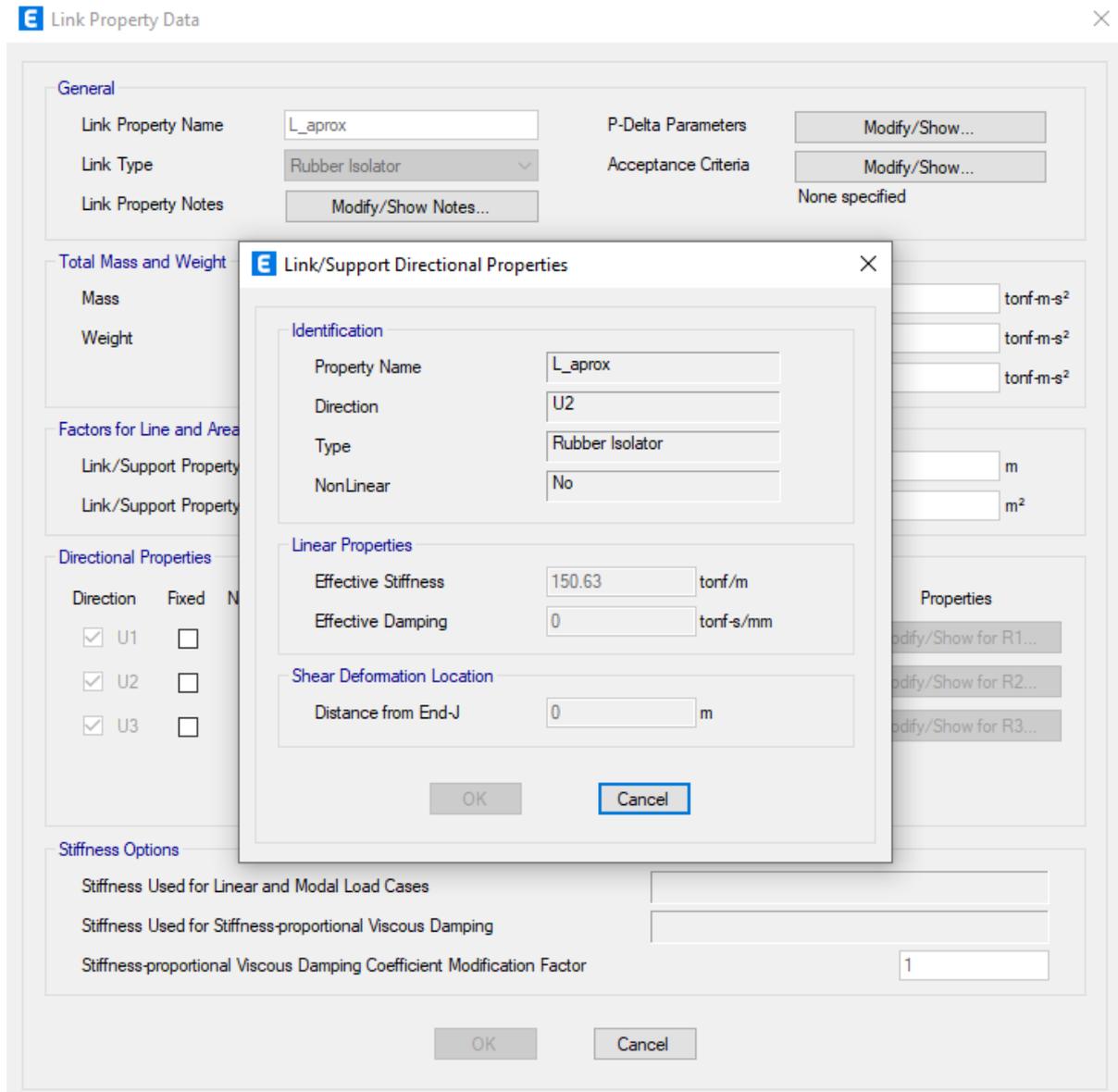


Ilustración 41 Modelo Preliminar -Cargas axiales mínimas y máximas

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

Las propiedades de rigidez lateral corresponden a la rigidez requerida del sistema de aislación para alcanzar los 3.5s:

$$k_{M_AISLADOR} = \frac{k_M}{\#_{AISLADORES}} = \frac{5422}{36} = 150.63 \left[\frac{\text{tonnef}}{m} \right]$$

Ecuación 48

La rigidez vertical del aislador se tomó como una primera estimación como:

$$k_{M_AISLADOR} = 400000 \left[\frac{\text{tonnef}}{m} \right]$$

Ecuación 49

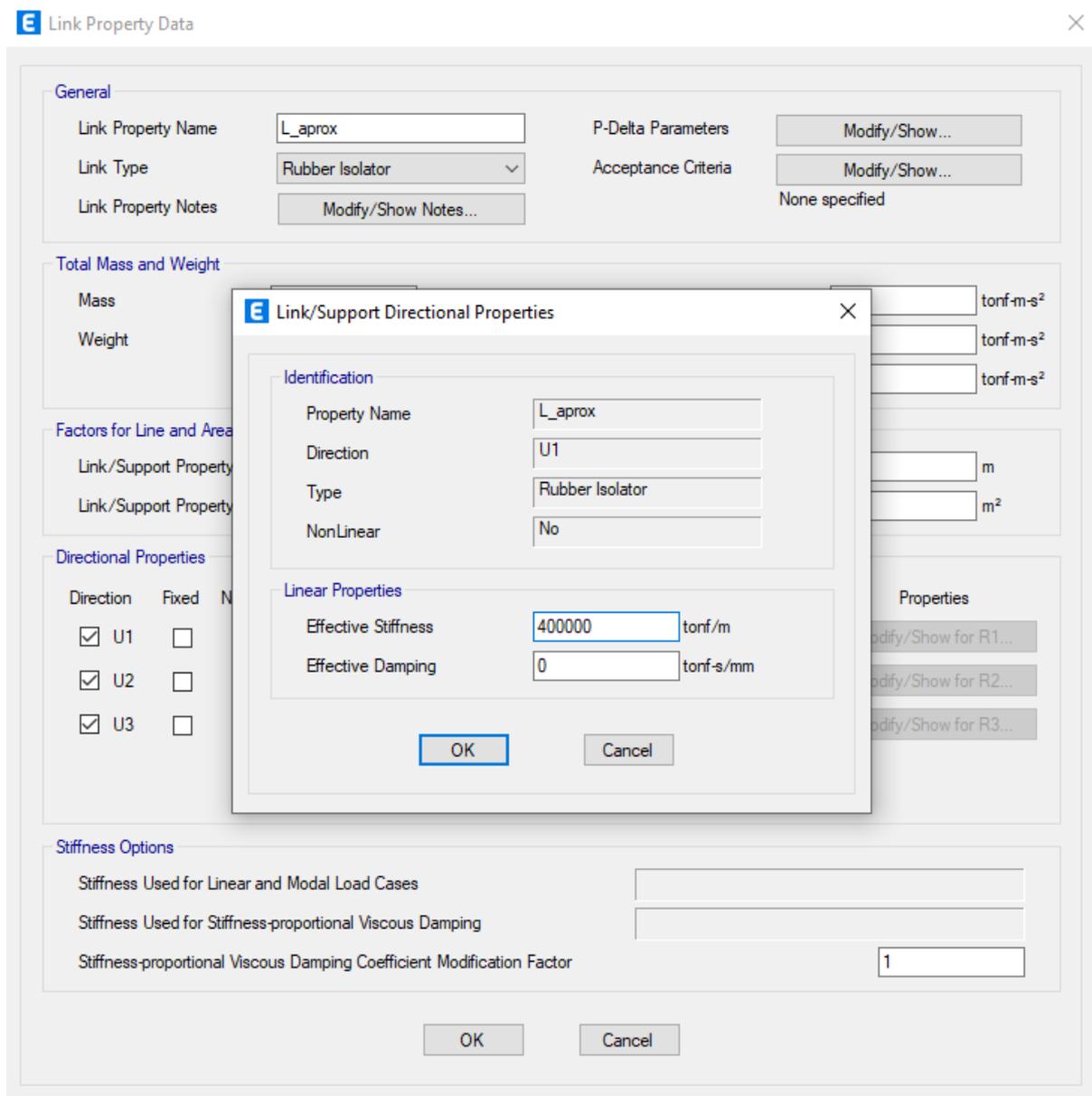


Ilustración 42 Modelo Preliminar-rigidez vertical del aislador

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

Las propiedades de los elementos de la superestructura se consideraron como no agrietadas.

Para el análisis se realizó el procedimiento de análisis modal espectral.

Se utilizaron las siguientes combinaciones de carga:

$$P_{AVG} = 1.00D + 0.50L$$

Ecuación 50

$$P_{MAX} = 1.20D + 0.20S_{MS}D + 1.00L + \rho Q_E$$

Ecuación 51

$$P_{MIN} = 0.90D - 0.20S_{MS}D - \rho Q_E$$

Ecuación 52

Para los efectos de las cargas laterales en las combinaciones se usó el criterio de 100/30, donde se aplicó 100% de la carga en una dirección combinada con 30% de la carga en la otra dirección.

7.2.8. Carga Axial en Columnas.

Para estimar las cargas axiales en las columnas se incorporó dentro del modelo los elementos tipo link con las características de rigidez horizontal y vertical descritas anteriormente. Se realizó un análisis modal espectral con el espectro modificado al valor del amortiguamiento objetivo, y se determinaron las cargas en las columnas.

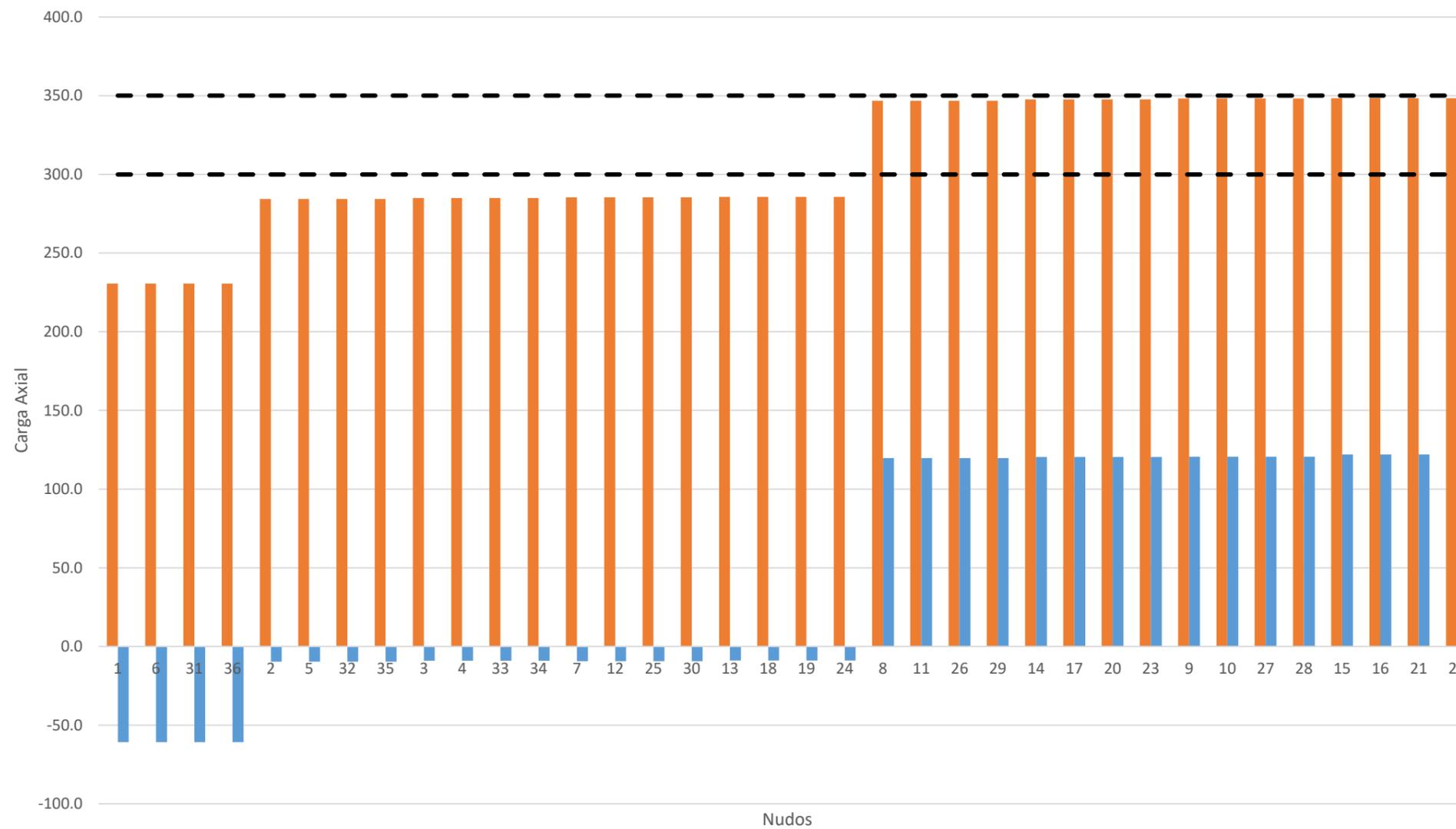


Ilustración 43 Carga Axial en Columnas

Editado por: Gustavo Espinel

Inicialmente se eligieron solamente tres tipos de aisladores, esa decisión se la tomo considerando que un cuarto tipo de aislador puede ser usado para corregir la respuesta torsional del sistema

Para la primera selección de aisladores se eligieron 3 tipos:

$$TIPO\ 1 \geq 260\ [tf]$$

$$TIPO\ 2 < 260\ [tf]$$

7.2.9. Esquema de Ubicación de Aisladores.

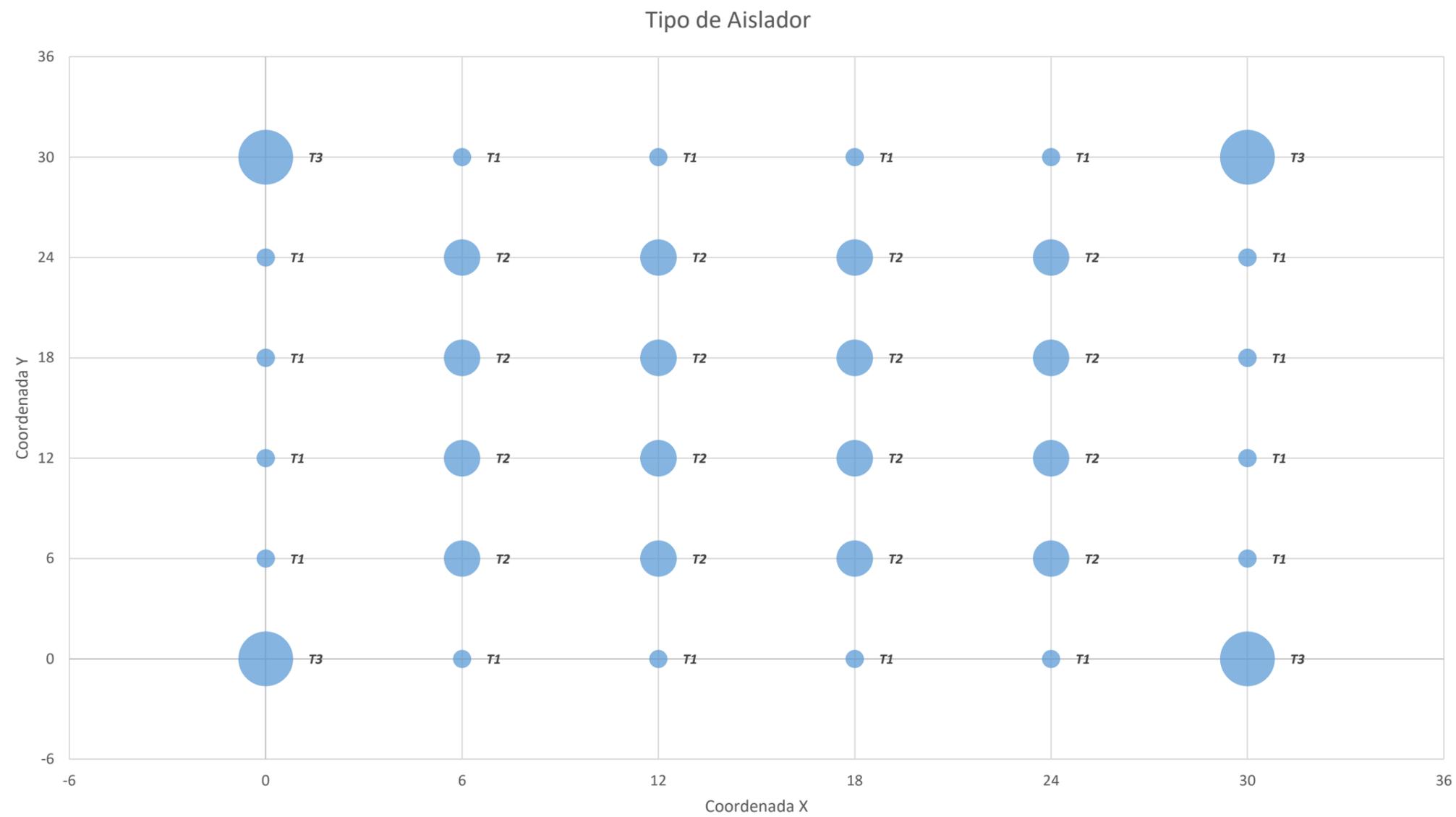


Ilustración 44: Esquema de Ubicación de Aisladores - Tipo de Aislador

Editado por: Gustavo Espinel

7.2.10. Resultados del Analisis Modal Primera iteracion.

Case	Mode	Period sec	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ
Modal	1	2.195	0	0.9886	0	0	0.9886	0	0.0112	0	0
Modal	2	2.195	0.9886	0	0	0.9886	0.9886	0	0	0.0112	0
Modal	3	1.965	0	0	0	0.9886	0.9886	0	0	0	0.9886
Modal	4	0.543	0	0.0111	0	0.9886	0.9996	0	0.9839	0	0
Modal	5	0.543	0.0111	0	0	0.9996	0.9996	0	0	0.9839	0
Modal	6	0.475	0	0	0	0.9996	0.9996	0	0	0	0.0099
Modal	7	0.244	0	0.0004	0	0.9996	1	0	0.0004	0	0
Modal	8	0.244	0.0004	0	0	1	1	0	0	0.0004	0
Modal	9	0.215	0	0	0	1	1	0	0	0	0.0003
Modal	10	0.131	0	1.633E-05	0	1	1	0	0.0045	0	0
Modal	11	0.131	1.625E-05	0	0	1	1	0	0	0.0045	0
Modal	12	0.116	0	0	0	1	1	0	0	0	1.576E-05

Tabla 12 Resultados del Analisis Modal Primera iteracion

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

Donde claramente se puede observar que no existen modos torsionales acoplados producto de la excentricidad entre el centro de masas y el centro de rigidez.

7.2.11. Diseño de los Aisladores para las Cargas Obtenidas.

Parametros del Sistema	
Bm	1.35
Tc	4
Dc	97.31
T	2.10 [s]
Dm	0.360 [m]
W	5390 [tf]
Ws	4540 [tf]
Km	4931.01 [tf/m]
EDCm (sistema)	452.7798676
β (sistema)	11%
%W Activacion	6%
Vb	33%
Vs	29%
Kv	11032077
T	0.04
f	22.55
Keff.Dm	1775.16
R	2.00
Vs [superestructura]	887.58
%Vs	0.16
Volumen	4.29

Tipo	T1	T2	T3
Caracteristica	LRB	RB	RB
#LRB	16	16	4
D_M	0.360 [m]	0.360 [m]	0.360 [m]
P_{max}	260 [tf]	350 [tf]	300 [tf]
Diametro exterior	800 [mm]	800 [mm]	800 [mm]
Diametro de plomo	180 [mm]	0 [mm]	0 [mm]
# capas rubber	20u	20u	20u
tr	9 [mm]	9 [mm]	9 [mm]
ϵ_u	600%	600%	600%
Numero Laminas	19u	19u	19u
Espesor de Lamina	3 [mm]	3 [mm]	3 [mm]
Altura Total	237 [mm]	237 [mm]	237 [mm]
hr	180 [mm]	180 [mm]	180 [mm]
G	40.79 tf/m ²	40.79 tf/m ²	40.79 tf/m ²
Ar	0.477 [m ²]	0.503 [m ²]	0.503 [m ²]
Al	0.025 [m ²]	0.000 [m ²]	0.000 [m ²]
Kd	108.14 [tf/m]	113.91 [tf/m]	113.91 [tf/m]
fluencia plomo	815.77 [tf/m ²]	0.00 [tf/m ²]	0.00 [tf/m ²]
Qd	20.76 [tf]	0.00 [tf]	0.00 [tf]
Δy	0.02 [m]	0.00 [m]	0.00 [m]
keff	165.80 [tf/m]	113.91 [tf/m]	113.91 [tf/m]
Ku	1081.41 [tf/m]	0.00 [tf/m]	0.00 [tf/m]
EDC _M	28.30	0.00	0.00
β	21%	0%	0%
σ_{max}	5.34 [kgf/cm²]	6.83 [kgf/cm²]	5.85 [kgf/cm²]
Dm/hr	2.00	2.00	2.00
De/Dl	4.44	0.00	0.00
Check	OK	OK	OK
De/hr	4.44	4.44	4.44
Check	OK	OK	OK

#.keff	2652.86 [tf/m]	1822.51 [tf/m]	455.63 [tf/m]
#.EDCm	452.78	0.00	0.00
D_{TM}	0.432	0.432	0.432
A_{Red}	0.166 [m ²]	0.175 [m ²]	0.175 [m ²]
S	22.222	22.222	22.222
Pcr	742.0 [tf]	781.6 [tf]	781.6 [tf]
Pcr/Pmax [Sismico]	2.85	2.23	2.61
Check	OK	OK	OK
Limite ϵ	3.4	3.4	3.4
$D_{TM}/hr+Pr/G.Ar.S$	3.00	3.17	3.06
Check	OK	OK	OK
Fuerza Activacion	332.14 [tf]	0	0
K	618967.74 [tf/m ²]	618967.74 [tf/m ²]	618967.74 [tf/m ²]
Kv	297629.38 [tf/m]	313500.34 [tf/m]	313500.34 [tf/m]
Kv [sistema]	4762070.16 [tf/m]	5016005.43 [tf/m]	1254001.36 [tf/m]
Volumen	1.91 [m ³]	1.91 [m ³]	0.48 [m ³]

Tabla 13: Diseño de los Aisladores para las Cargas Obtenidas.

Editado por: Gustavo Espinel

7.2.12. Verificación del centro de masas y rigidez.

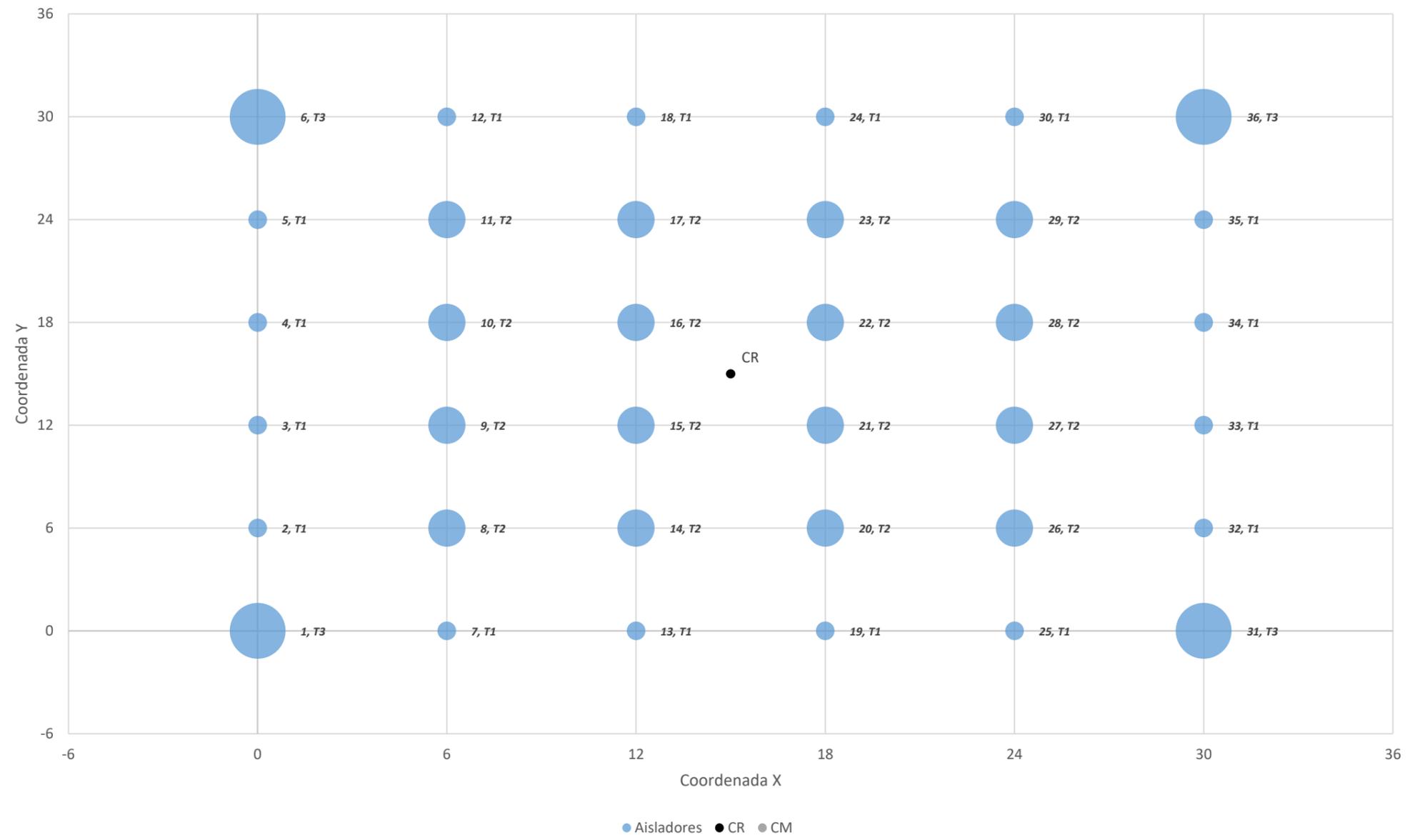


Ilustración 45: Verificación del centro de masas y rigidez.

Editado por: Gustavo Espinel

7.3. Resultado de analisis modal Segunda iteracion

Case	Mode	Period	UX	UY	SumUX	SumUY	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
		sec										
Modal	1	2.34	0	0.96	0	0.96	0.00	0	0.02	0.00	0	0.02
Modal	2	2.33	0.99	0	0.99	0.96	0	0.00	0	0.00	0.00	0.02
Modal	3	2.06	0	0.02	0.99	0.99	0.00	0	0.96	0.00	0.00	0.99
Modal	4	0.54	0	0.00	0.99	0.99	0.98	0	0	0.99	0.00	0.99
Modal	5	0.54	0.00	0	0.99	0.99	0	0.98	0	0.99	0.99	0.99
Modal	6	0.47	0	0	0.99	0.99	0.00	0	0.00	0.99	0.99	1
Modal	7	0.24	0	0	0.99	1	0.00	0	0	0.99	0.99	1
Modal	8	0.24	0.00	0	1	1	0	0	0	0.99	0.99	1
Modal	9	0.21	0	0	1	1	0	0	0.00	0.99	0.99	1
Modal	10	0.13	0	0	1	1	0.00	0	0	0.99	0.99	1
Modal	11	0.13	0	0	1	1	0	0.00	0	0.99	1	1
Modal	12	0.11	0	0	1	1	0	0	0	0.99	1	1

Tabla 14: Resultado de analisis de modal Segunda Iteracion

Editado por: Gustavo Espinel

8. ESQUEMA DE AISLADORES

A continuación se presenta la geometría calculada para los aisladores. Se indican los esquemas en planta y elevación con sus respectivas placas.

8.1.1. Aislador T2

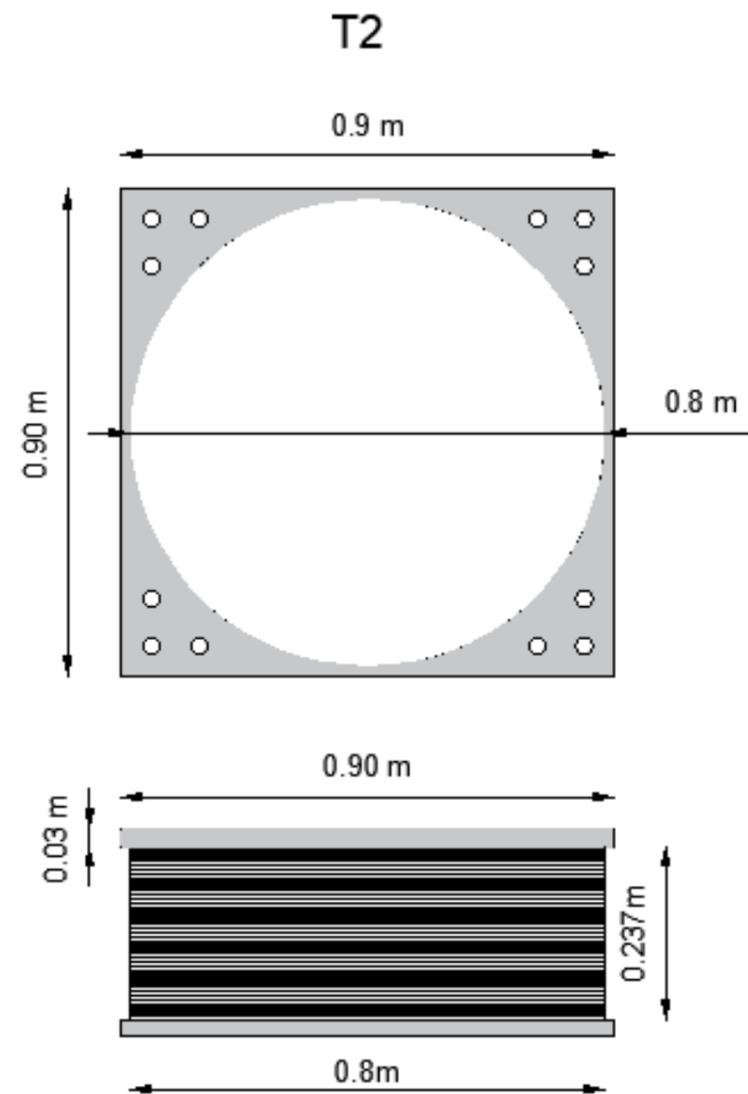


Ilustración 46: Esquema Aisladores – Aislador T2

Editado por: Gustavo Espinel

8.1.2. Aislador T1

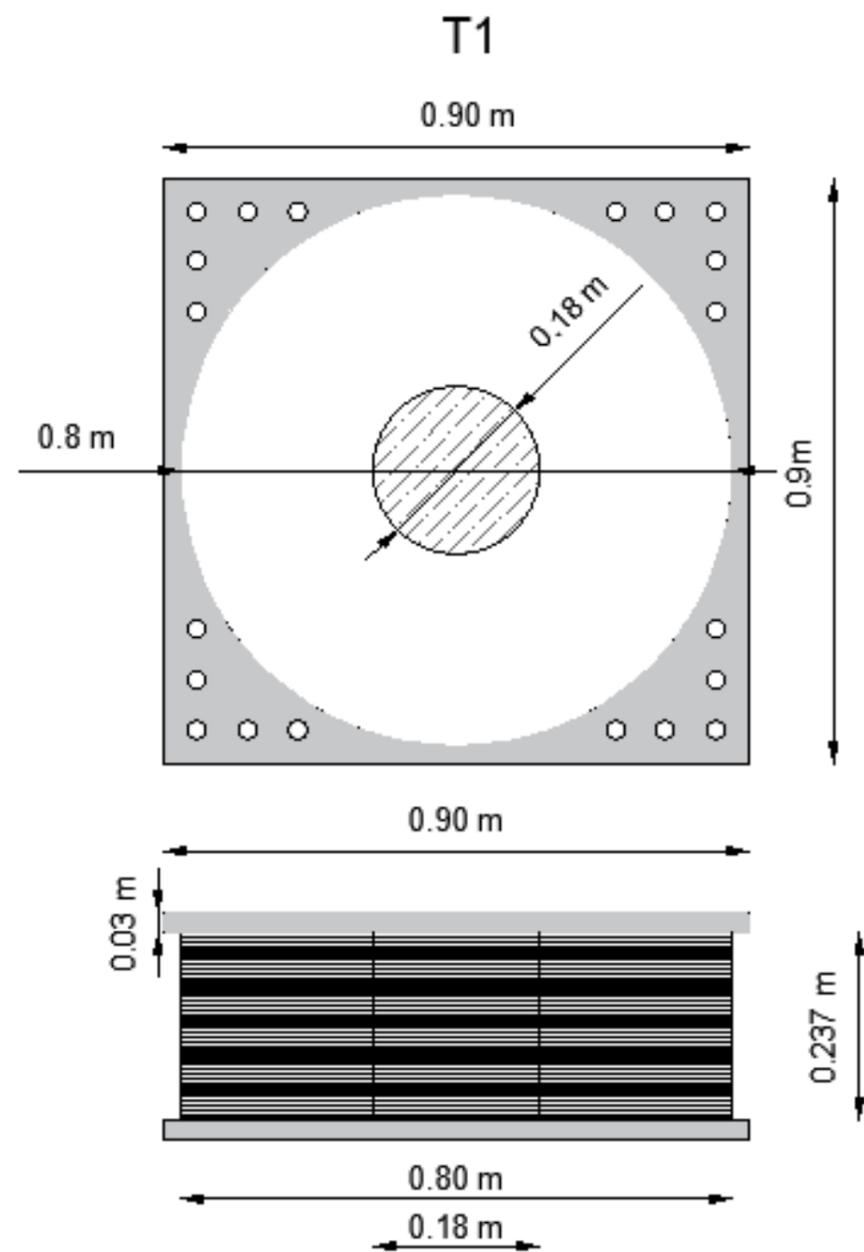


Ilustración 47: Esquema Aisladores- Aislador T1

Editado por: Gustavo Espinel

8.1.3. Aislador T3

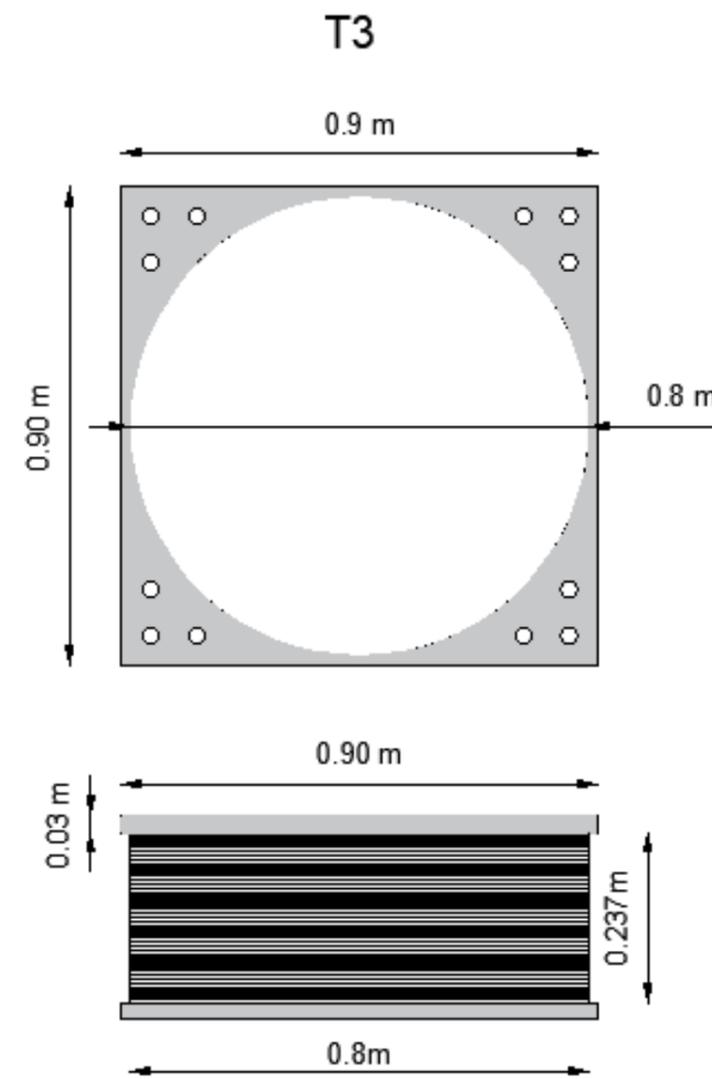


Ilustración 48: Esquema Aisladores- Aislador T3

Editado por: Gustavo Espinel

8.1.4. Verificación Centro de Masas y de Rigidez.

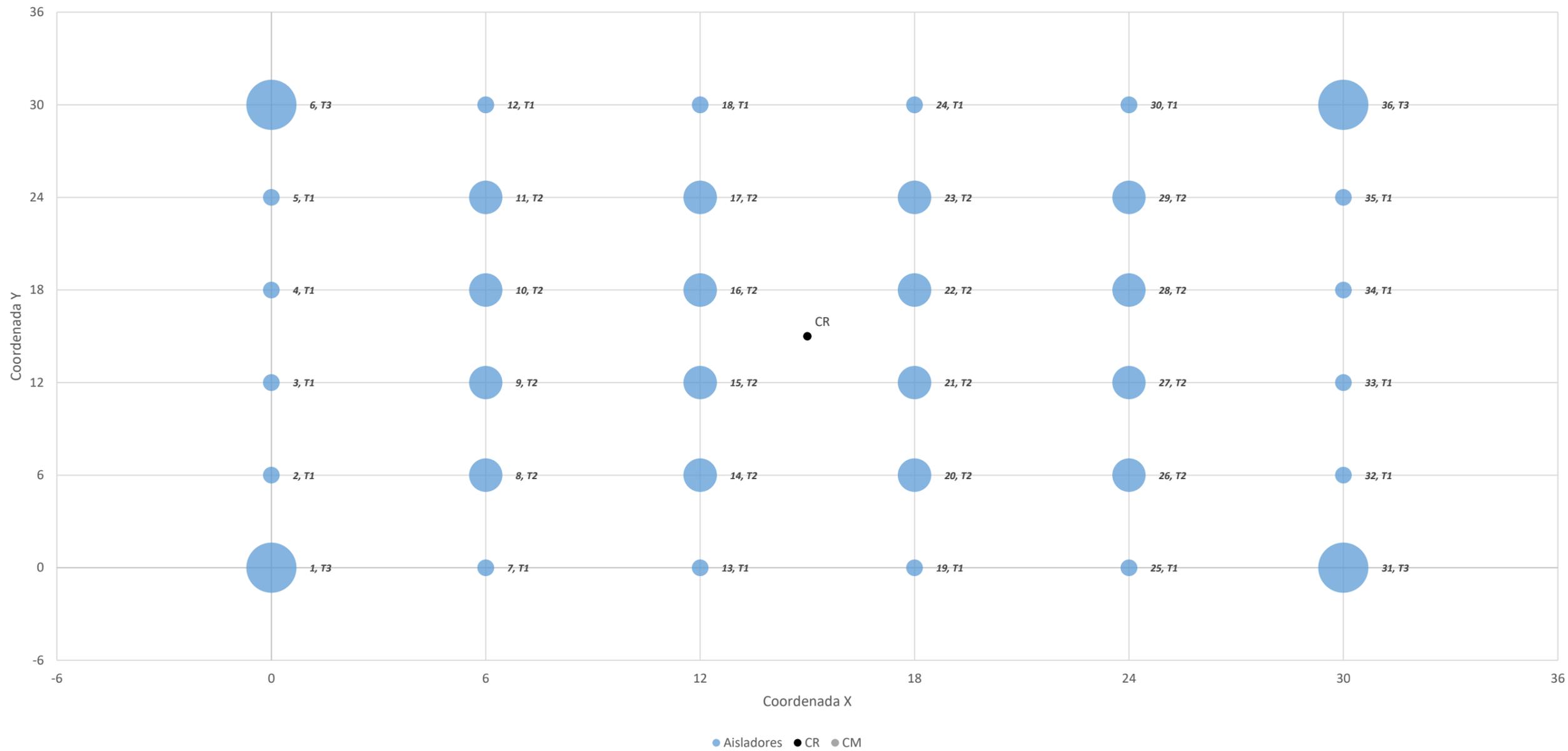


Ilustración 49: Verificación Centro de Masas y de Rigidez.

Editado por: Gustavo Espinel

8.1.5. Cargas en Columnas Corregidas.

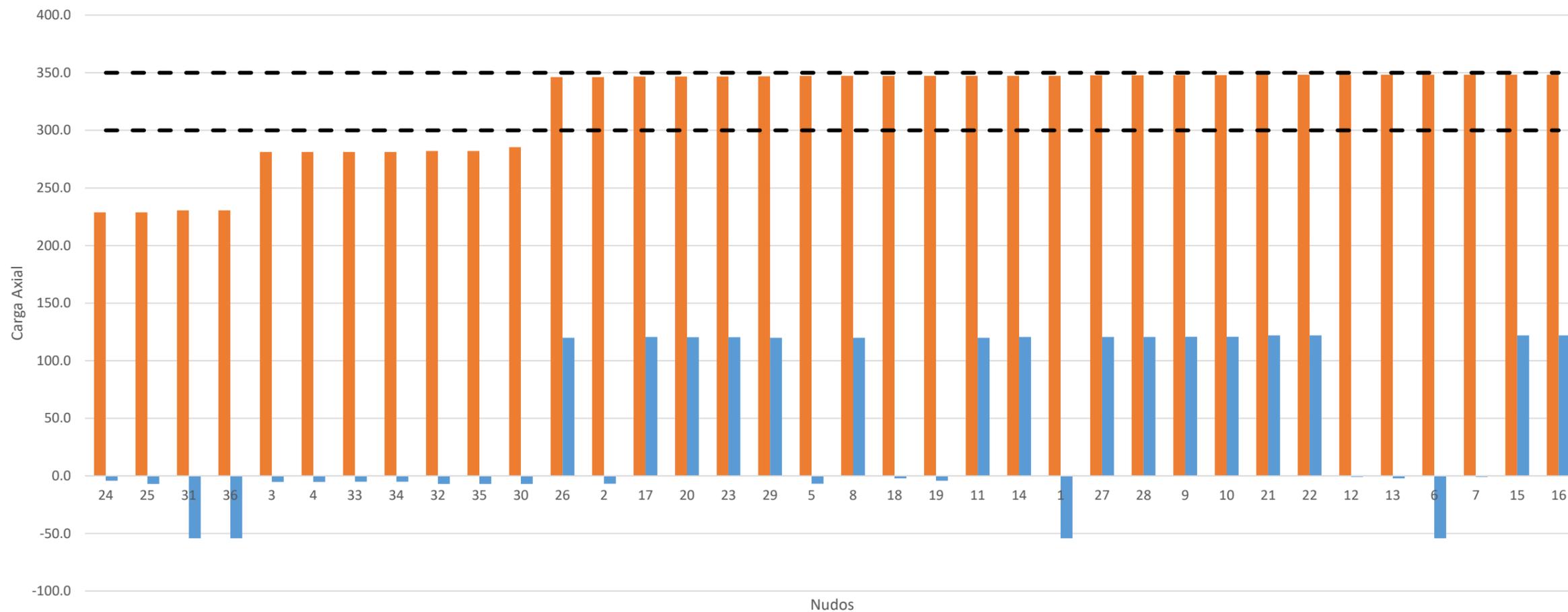


Ilustración 50: Cargas en Columnas Corregidas.

Editado por: Gustavo Espinel

Donde se puede ver que las cargas axiales calculadas originalmente no varían sustancialmente de las obtenidas, por lo tanto, no es requerido volver a verificar el aislador. Se puede ver que existen 4 columnas con tensión, estas columnas corresponden a las columnas esquineras. La magnitud de las cargas en tensión es de aproximadamente 50tf. No es posible tener un aislador en tensión, por lo tanto se plantea el uso de un dado de mayor tamaño en estas columnas conjunto a capiteles en los pisos para reducir el valor de esta carga:

$$W_{DADO} = 3 \times 3 \times 1.5 \times 2.4 = 32,40 [tf]$$

Ecuación 53

$$W_{CAPITEL} = 1.5 \times 1.5 \times 0.5 \times 2.4 \times 6 = 16,20 [tf]$$

Ecuación 54- Alternativamente se podría incrementar el peso en los niveles inferiores de manera que baje el centro de masas del sistema y se reduzca el momento de volcamiento.

8.1.6. Modelo Matemático.

Para poder realizar el modelo matemático de la estructura debemos incorporar en el modelo original los elementos de la interfase donde debemos caracterizar la rigidez lateral y vertical del aislador.

Para el modelo matemático primero creamos los aisladores con las características obtenidas en el diseño de los mismos para ser utilizados en Etabs.

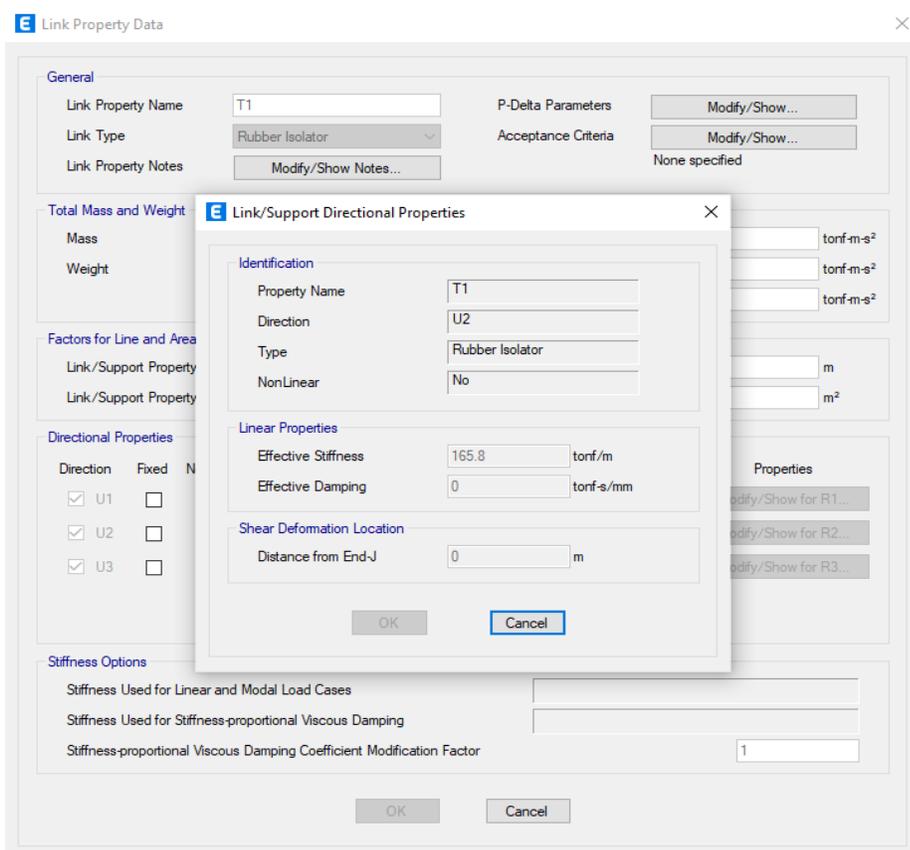


Ilustración 51: Modelo Matemático I

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

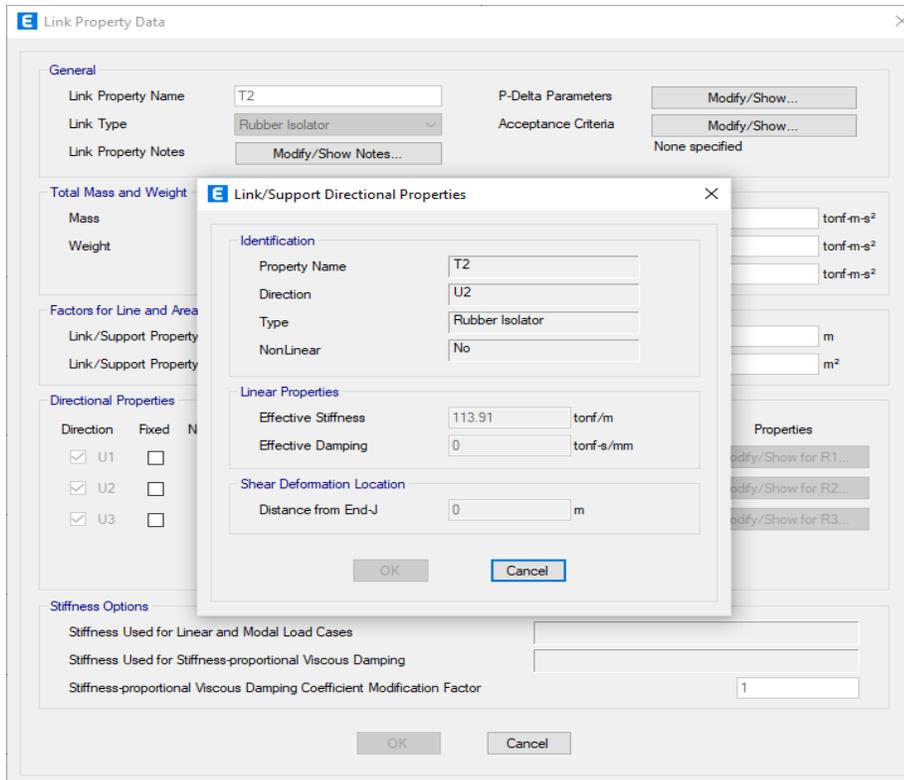


Ilustración 52: Modelo Matemático II

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

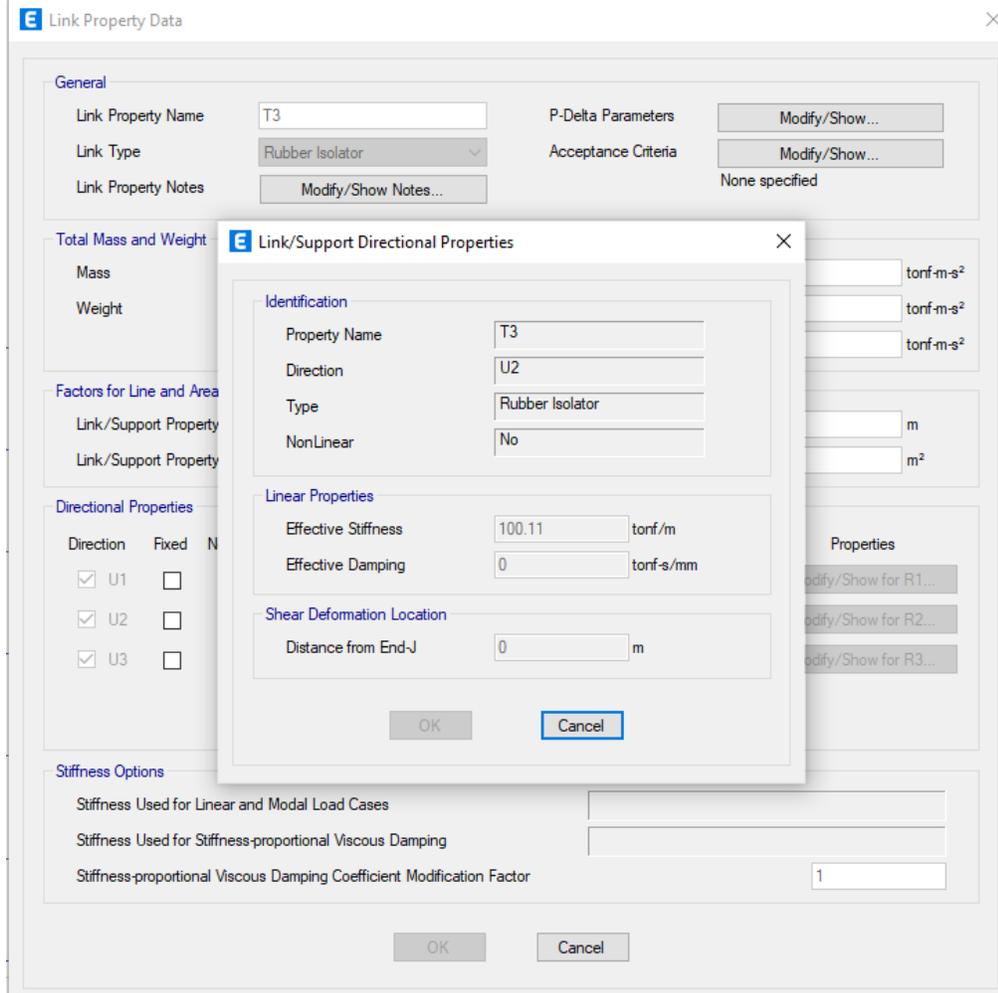


Ilustración 53: Modelo Matemático III

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

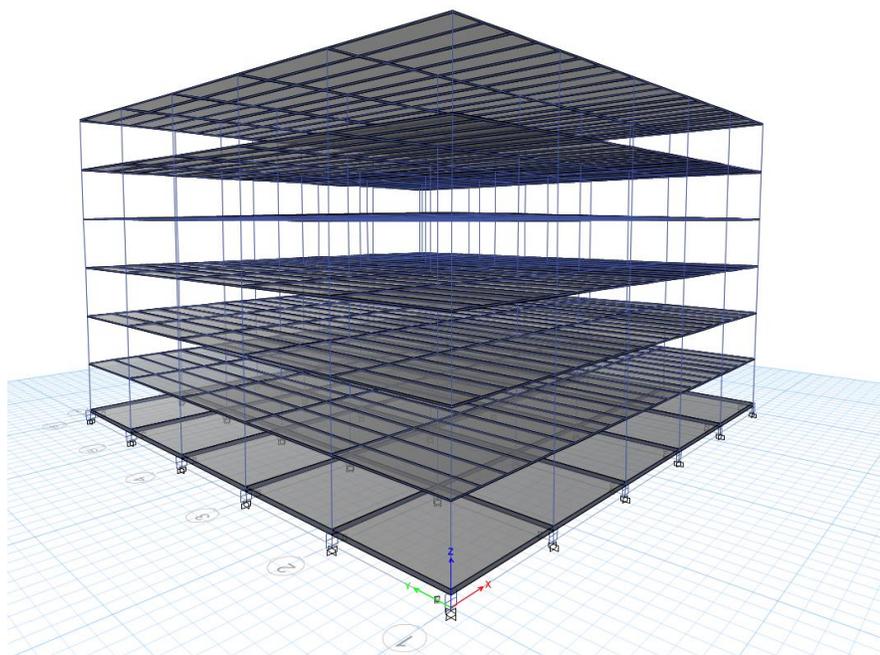


Ilustración 54: Isometría- Estructura 3D

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

8.1.7. Resumen del Sistema.

Se presenta un resumen de las fuerzas utilizadas en la aislacion y en la super estructura

8.1.7.1. Cortante para elementos de superestructura

$$V_s = \frac{V_{ST}}{R_1}$$

Ecuación 55

$$V_{st} = V_b \left(\frac{W_s}{W} \right)^{(1-2.5\beta m)}$$

Ecuación 56

Donde la selección de R responde al sistema resistente lateral seleccionado para la superestructura, en este caso se está usando pórticos intermedios resistentes a momento, por lo tanto:

$$R_1 = 2$$

$$V_{St} = 837,70 \text{ [tf]} - \text{Nominal}$$

Ecuación 57

$$V_s = 418,85 \text{ [tf]} = 0.077W - \text{Nominal}$$

Ecuación 58

Como se puede observar en los datos contenidos, el mayor cortante basal de la superestructura es el correspondiente a las propiedades de límite superior, y con ese se debe diseñar los elementos y verificar las derivas.

8.1.7.2. Perfil de desplazamientos máximos en la estructura

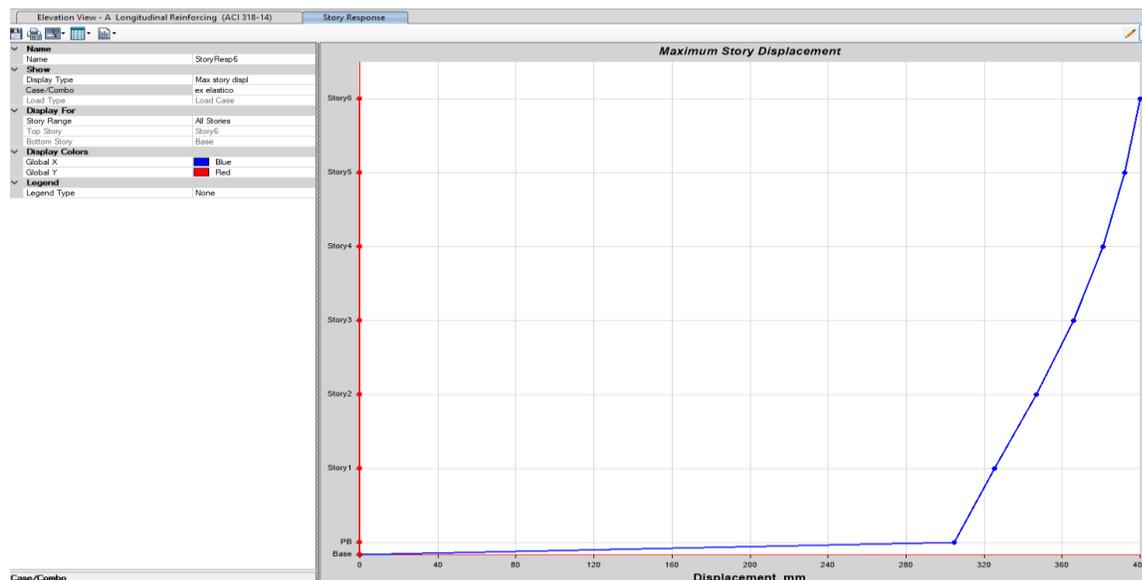


Ilustración 55: Perfil de desplazamientos máximos en la estructura

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

8.1.7.3. Perfil de derivas

Para el cálculo de las derivas se usó un factor de amplificación de desplazamientos, C_d igual a R1:

$$C_d = 2$$

Ecuación 59

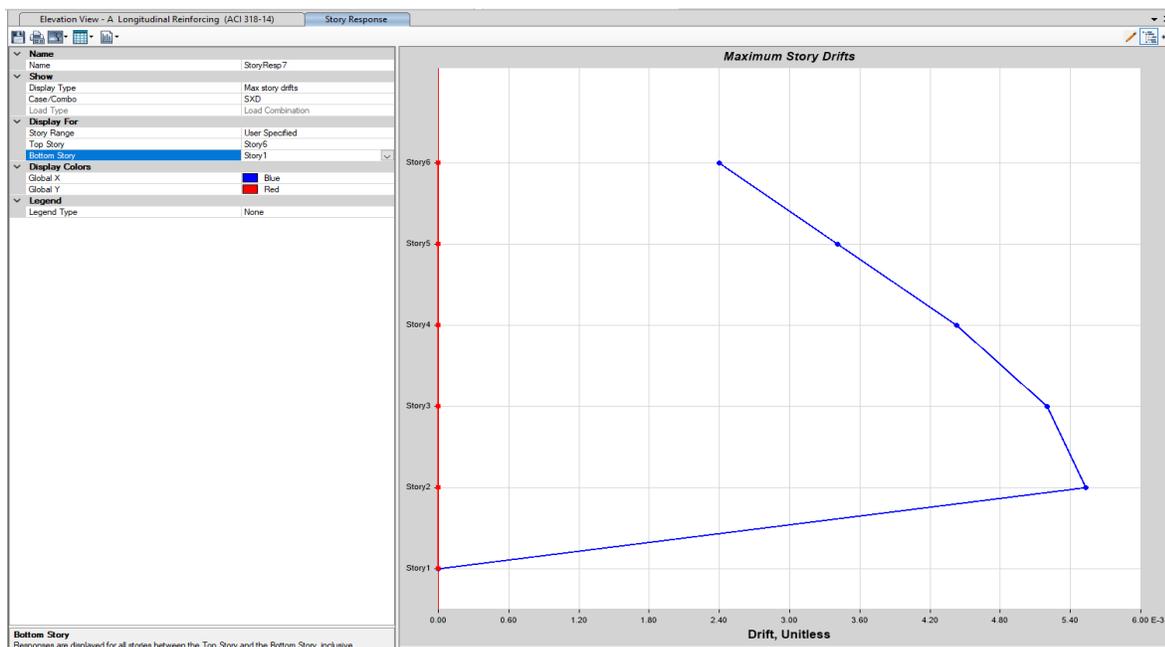


Ilustración 56: Perfil de derivas

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

Las derivas son menores del límite de 0.0055. Este límite fue impuesto considerando que el espectro tiene ordenadas espectral sumamente altas, este límite es 3 veces menos el límite propuesto por el ASCE y es 1.5 veces el valor propuesto por la norma chilena.

Si bien el límite es superior que lo recomendado en la norma chilena en función del limitar el daño no estructural; se considera que el límite seleccionado sirve para el diseño de esta estructura tomando en cuenta que el espectro es sumamente alto.

8.2. Diseño de la estructura aislada

El diseño por resistencia de la super estructura fue realizado de manera similar al presentado en el diseño convencional

8.2.1. Refuerzo de vigas

8.2.1.1. Eje A

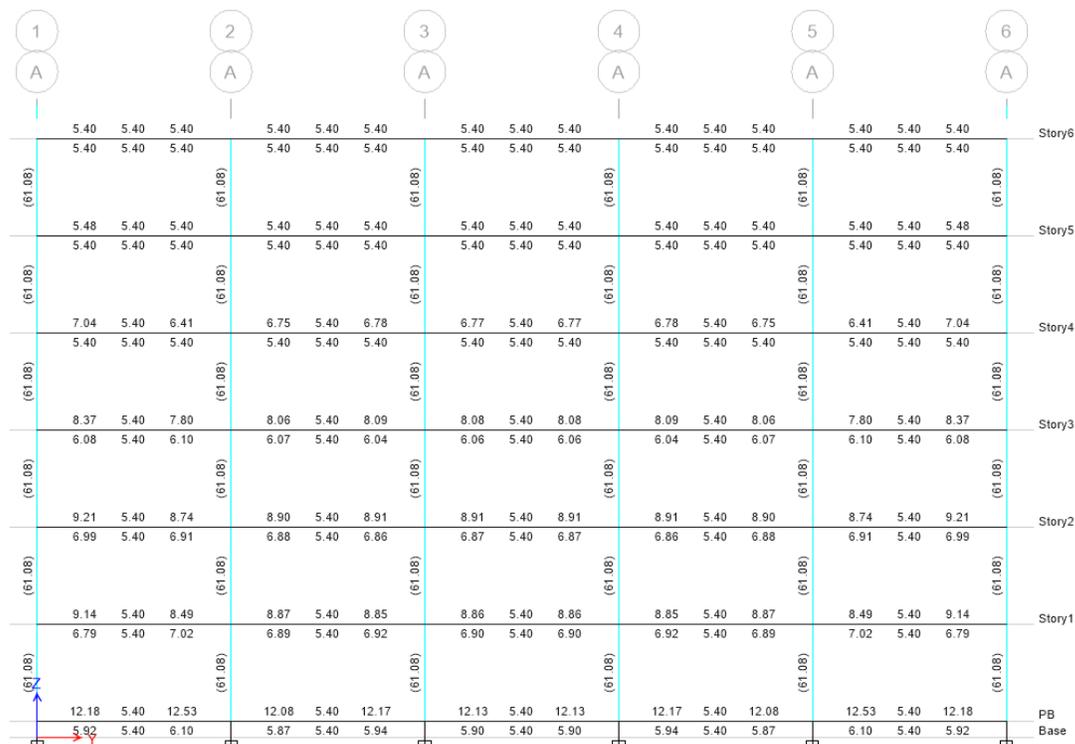


Ilustración 57: Diseño de la estructura aislada- Refuerzo de vigas Eje A

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

8.2.1.2. Eje B

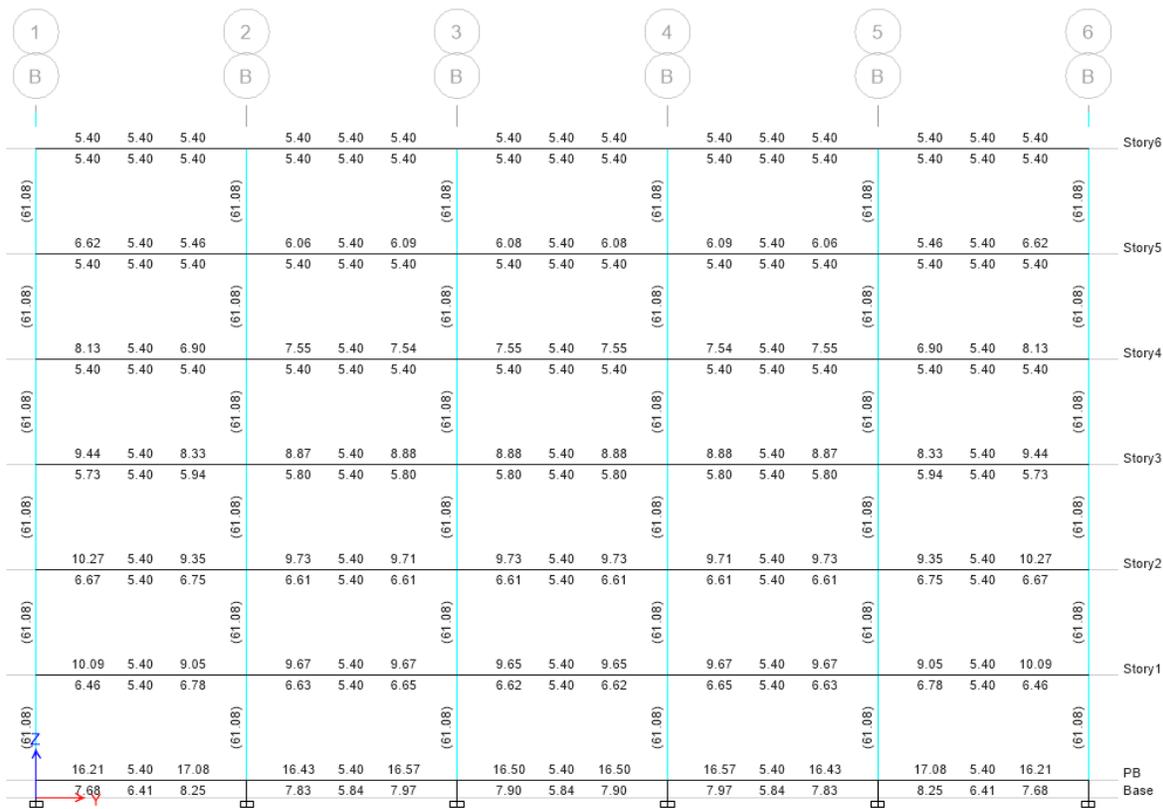


Ilustración 58: Diseño de la estructura aislada- Refuerzo de vigas Eje B

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

8.2.1.3. Eje C

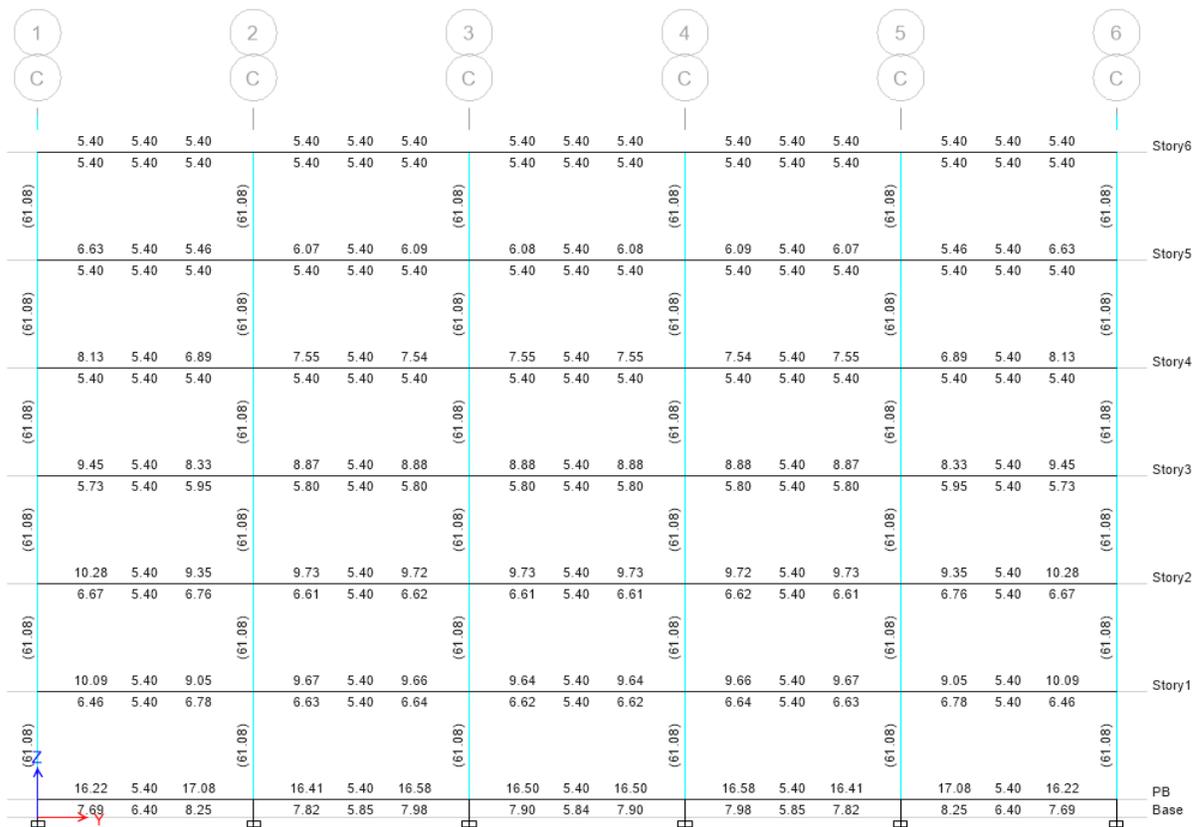


Ilustración 59: Diseño de la estructura aislada- Refuerzo de vigas Eje C

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

8.2.1.4. Eje D

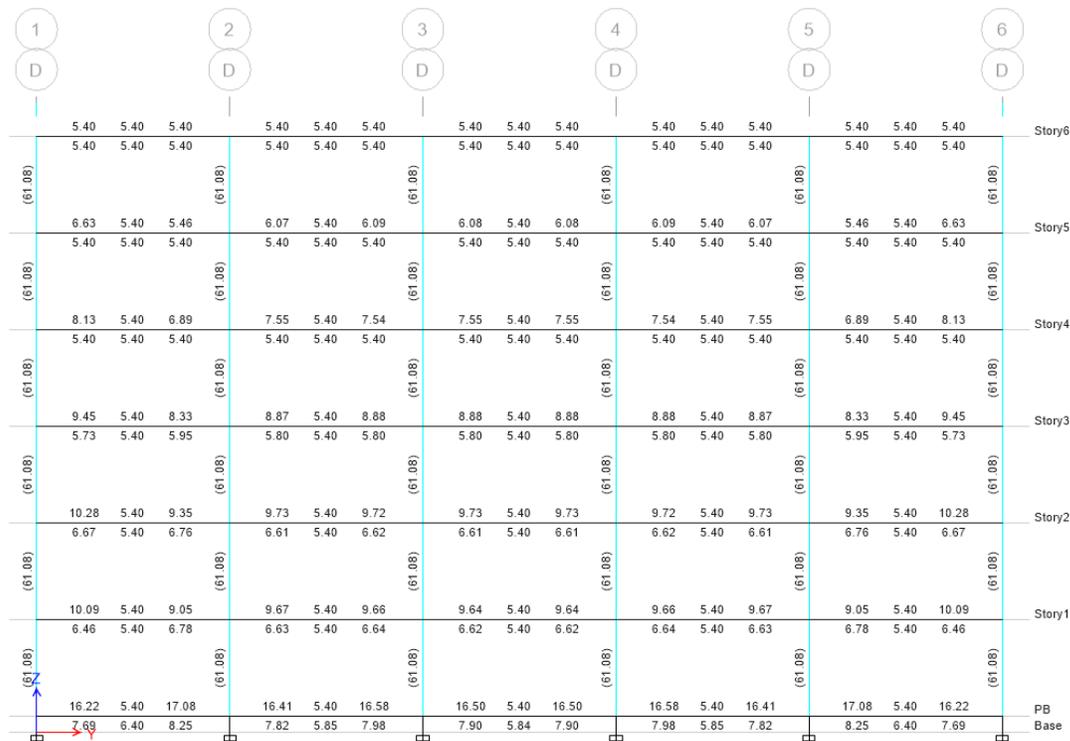


Ilustración 60: Diseño de la estructura aislada- Refuerzo de vigas Eje D

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

8.2.1.5. Eje E

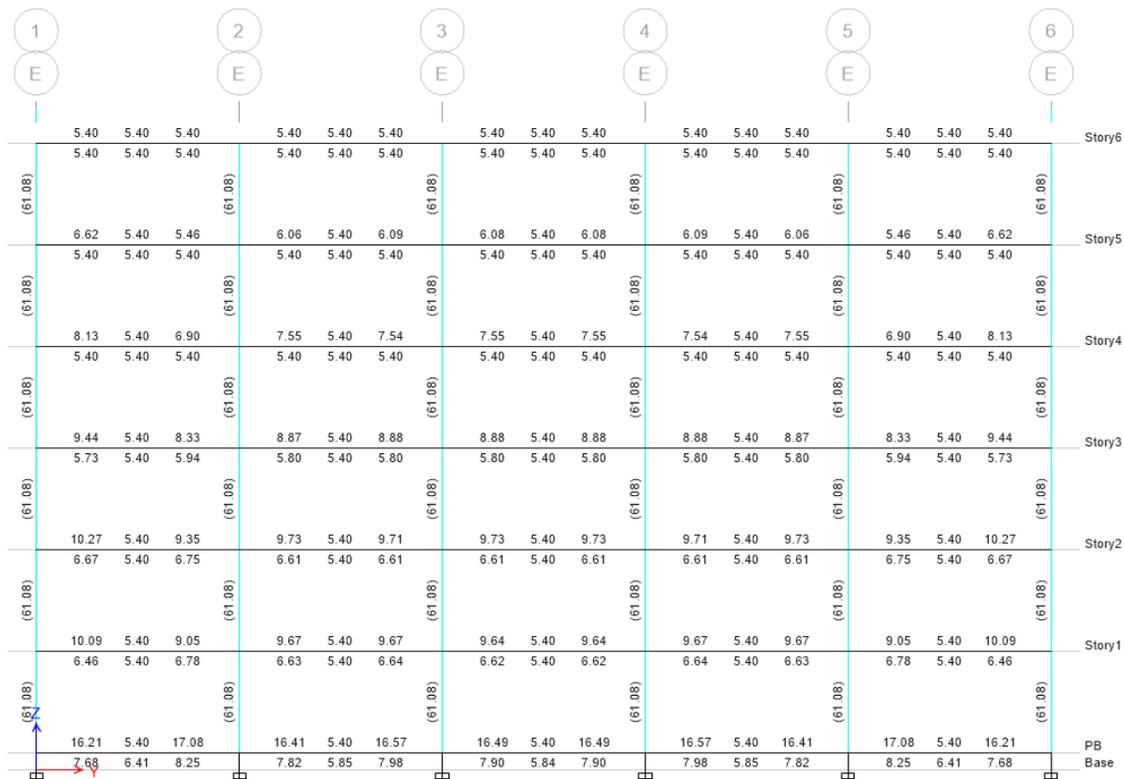


Ilustración 61: Diseño de la estructura aislada- Refuerzo de vigas Eje E

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

8.2.1.6. Eje F

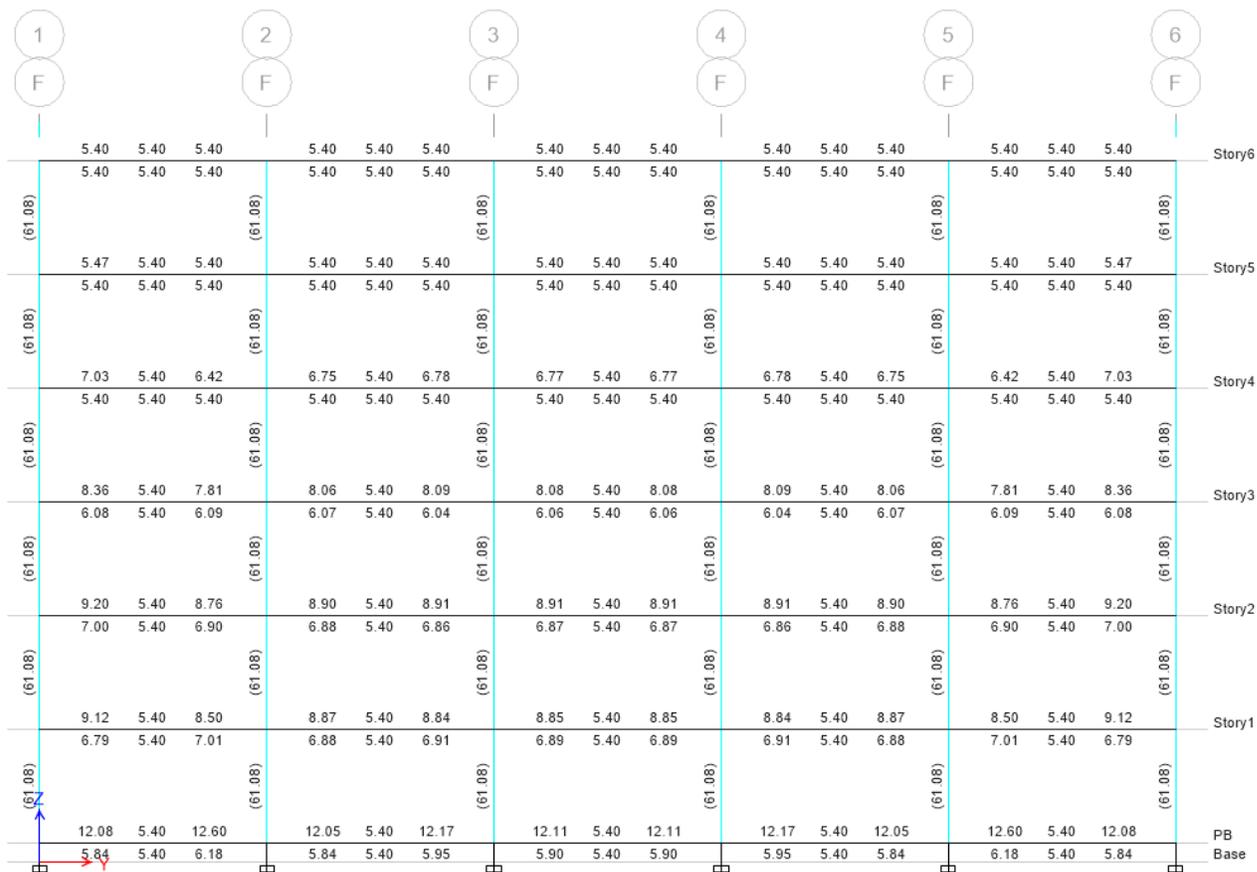


Ilustración 62: Diseño de la estructura aislada- Refuerzo de vigas Eje F

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

8.3. Refuerzo de columnas

En esta grafica indicala cantidad de acero provisto en las columnas.

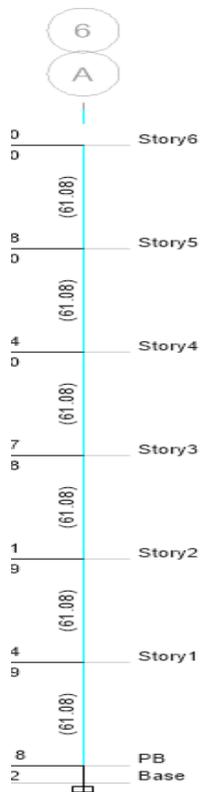


Ilustración 63: Refuerzo de columnas

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

8.3.1. Diagramas de interaccion

En las figuras siguientes se indican los diagramas de interaccion del elemento donde adicionalmente se encuentran graficadas las fuerzas actuantes.

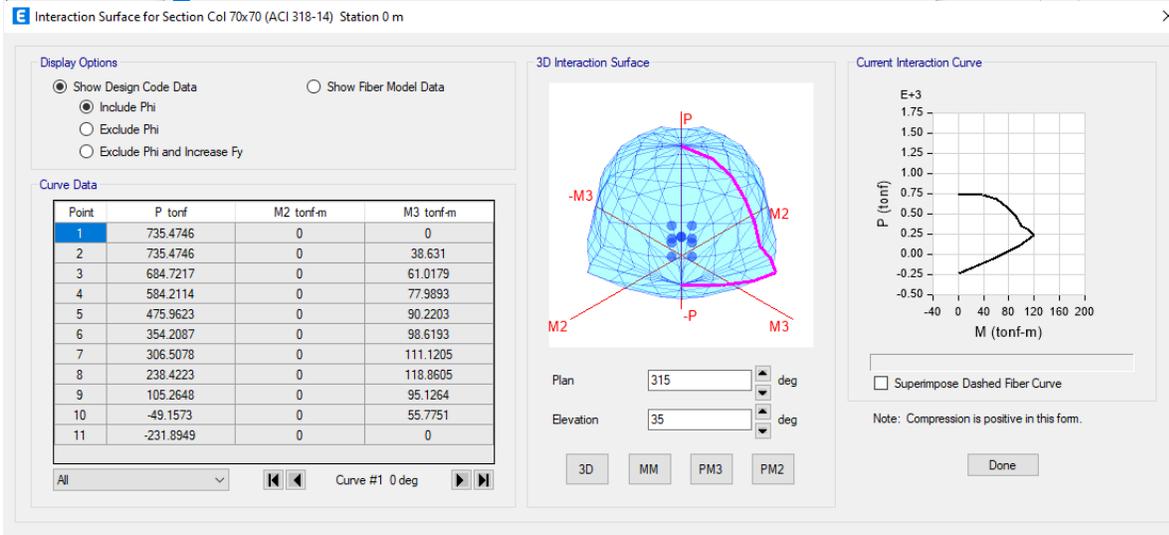


Ilustración 64: Diagrama de intercción- Piso 1

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

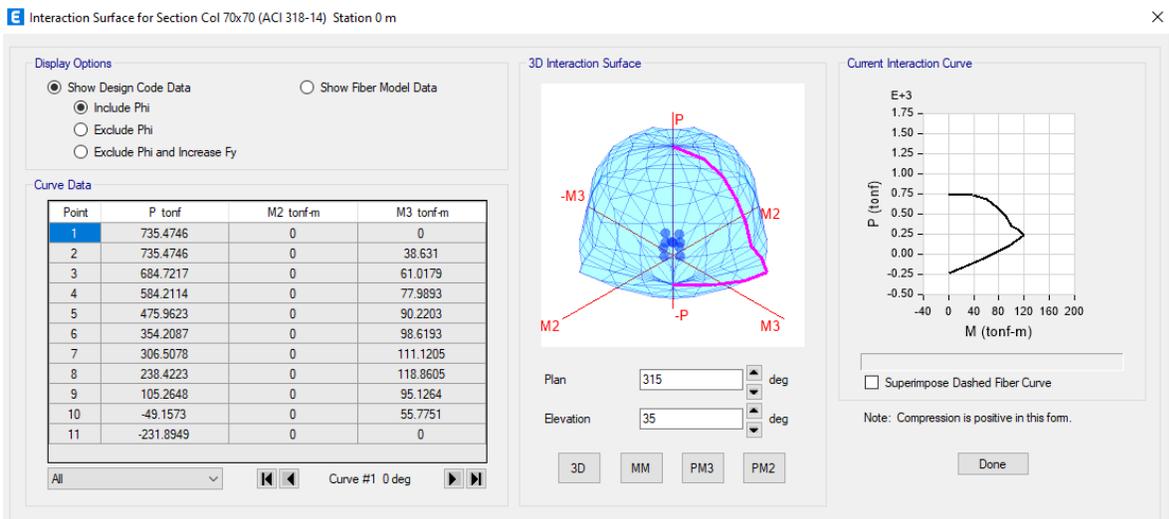


Ilustración 65: Diagrama de intercción- Piso 2

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

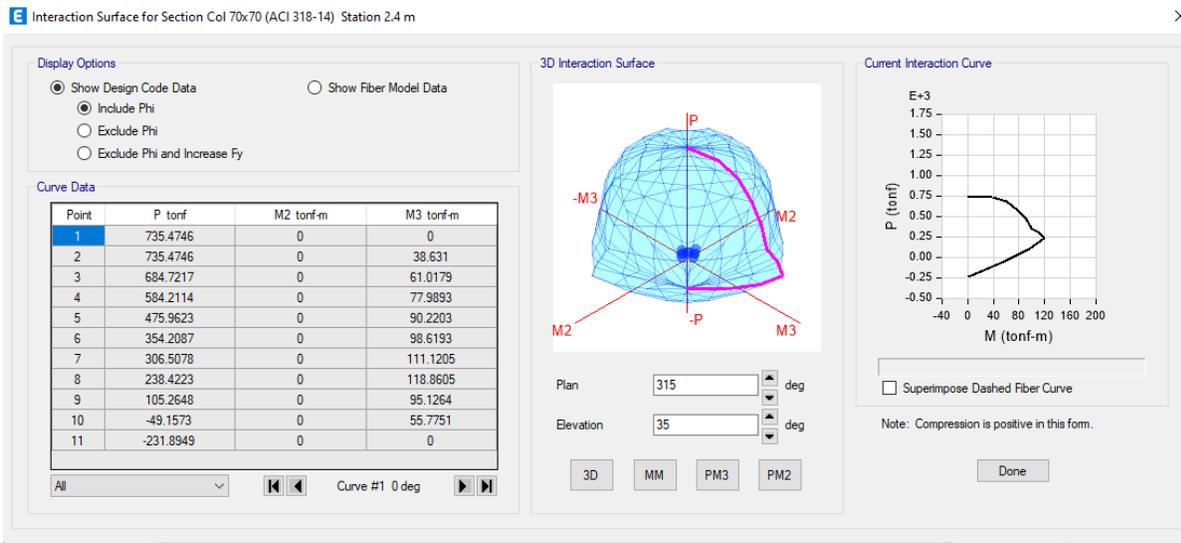


Ilustración 66: Diagrama de interacción- Piso 3

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

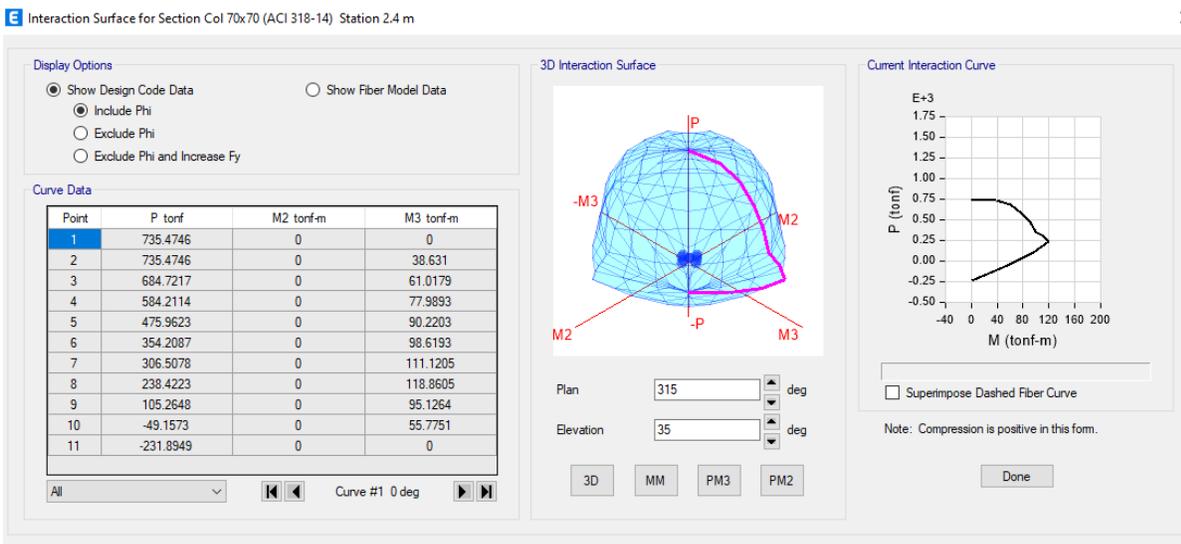


Ilustración 67: Diagrama de interacción- Piso 4

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

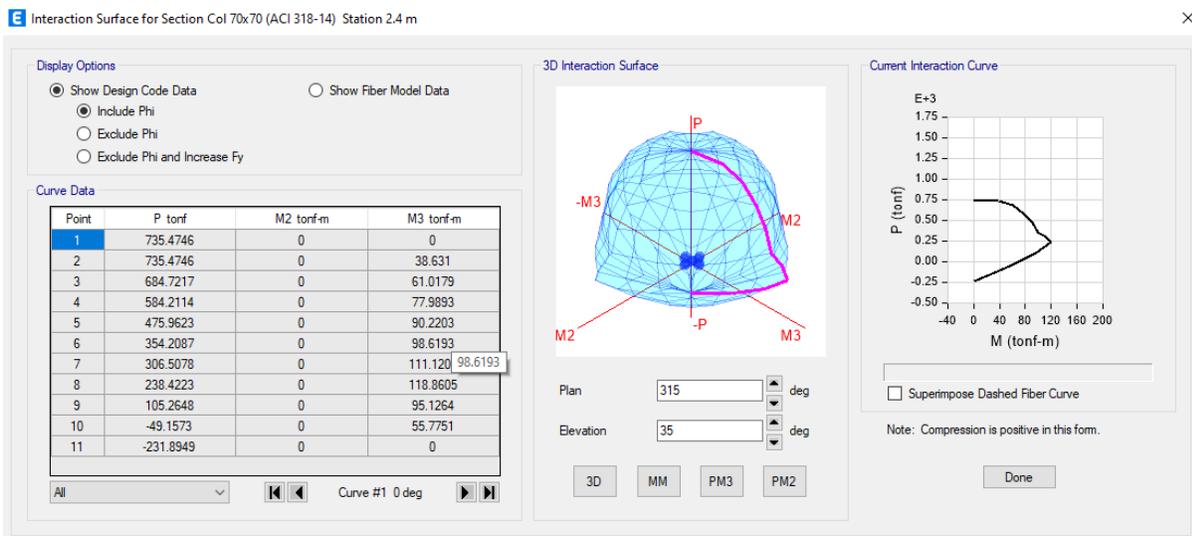


Ilustración 68: Diagrama de Intercción- Piso 5

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

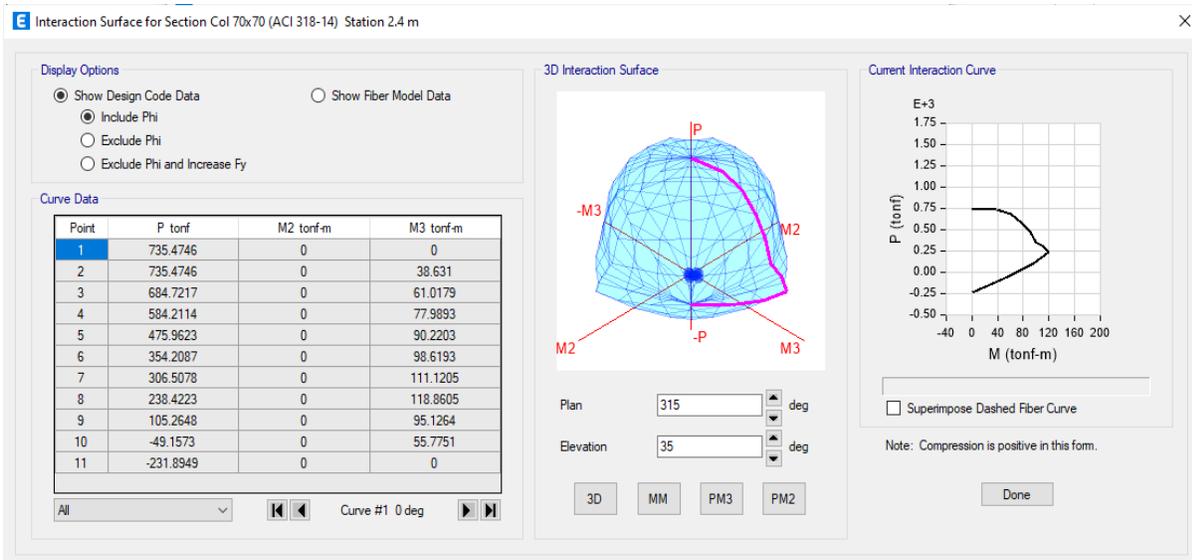


Ilustración 69: Diagrama de intercción- Piso 6

Fuente: (CSI Structure, 2021)

Editado por: Gustavo Espinel

9 CONCLUSIONES Y RESUMEN DE RESULTADOS

- Los desplazamientos calculados de la super estructura aislada fueron menores que los calculados usando los procedimientos tradicionales.
- Los aisladores reducen la vulnerabilidad de las estructuras, esto puede ser apreciado a través de la reducción de la magnitud de las derivas de entrepiso.
- Usando el volumen estimado de los aisladores se estimó un costo de aproximadamente 45 \$-m², este costo es relativamente bajo considerando el costo total de la estructura.
- El uso de aisladores de base reduce sustancialmente el nivel de deformación entre pisos, lo cual esta correlacionado directamente la probabilidad de daño de los elementos no estructurales.
- Se puede ver que el nivel de activación del sistema juega un papel muy importante en dimensionamiento del sistema de aislación, para poner amortiguamientos objetivos más altos se tiene que incrementar la fuerza de activación o disminuir el desplazamiento objetivo. El concepto del uso de los aisladores está basado en el criterio de flexibilizar y amortiguar, por lo tanto, la selección de la fuerza de activación del sistema juega un papel importante en el balance de los parámetros de diseño.
- Se pudo ver en los cálculos del cortante basal del sistema aislado, el valor del cortante depende del nivel de desplazamiento del sistema, ya que, al existir una pendiente post-fluencia, la resistencia a corte continúa incrementando a medida que existe más desplazamiento.
- Se puede ver que el procedimiento de diseño es muy sensible al nivel de peligro sísmico establecido; y que el uso del peligro sísmico codificado podría llegar a inviabilizar el proyecto.

- Se puede constatar que el uso de aisladores de base es una excelente solución para el control de irregularidades en planta del sistema, donde la disposición correcta de estos elementos permite el control de la irregularidad sin mayores cambios al programa arquitectónico.
- Se pudo ver que el momento de volcamiento puede ser un parámetro determinante en el diseño del sistema, ya que si existe un nivel de peligro alto; donde las fuerzas laterales sean considerables y la componente vertical reduzca substancialmente el peso que contrarresta el momento, se tiene que realizar ajustes al sistema para bajar el centro de masas o usar contrapesos para contra restar la tensión en los aisladores.
- A través del uso de las curvas de fragilidad obtenidas del programa HAZUS se puede claramente ver como los parámetros de derivas tienen una influencia directa en el potencial de daño estructura y no estructural del sistema.
- Se comprobó que el reforzamiento de la estructura aislada con la tradicional no tienen mucha diferencia ya que, la estructura tradicional fue diseñada en función de la rigidez para poder cumplir con la deriva.

10 Investigacion Futura

- Se recomienda realizar un analisis no lineal tiempo historia utilizando registros sismicos reales, para determinar los espectros de piso y comparar con el procedimiento de diseño simplificado indicado en el ASCE 7-16 para elementos no estructurales.
- Se recomienda realizar el diseño de la interfaz de aislacion con la super estructura
- Recomendaria realizar un analisis comparativo entre los aisladores de goma con los de pendulo de friccion para evaluar las ventajas y desventajas de cada sistema.
- Se recomienda realizar un analisis economico de la estructura tradicional vs. La estructura aislada para cuantificar la diferencia

12 Bibliografía

- ASCE 7. (2016). Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles. Estados Unidos.
- AstroCiencias. (21 de Abril de 2016). *Principales Terremotos en el Ecuador*. Obtenido de <http://astrocienciasecu.blogspot.com/2016/04/principales-terremotos-en-el-ecuador.html>
- Bouassida, M. (2016). *Design of Column-Reinforced Foundations*. J-Ross Publishing.
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation Analysis and Design*. The McGraw-Hill Company.
- CSI Structure. (2021). *V19.0.0*.
- Das, B. (2019). *Principles of Foundation Engineering*. CENGAGE.
- Elnashai, A. S., & Di Sarno, L. (2008). *Fundamentals of Earthquake Engineering*. UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Espíndola, J. (1984). *Terremotos y Ondas sísmicas, breve introducción*. México: UNAM.
- Fitzpatrick Engineering Group. (25 de Marzo de 2012). *Seismic Response Modification Factor - R*. Obtenido de <http://www.fegstructural.com/announcements/seismic-response-modification-factor-r>
- Grupo Ingenieros ACI. (2018). *AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI)*. Michigan, Estados Unidos.
- INOCAR. (s.f.). *Eventos en el Ecuador*. Obtenido de <http://www.inocar.mil.ec/web/index.php/que-son-los-tsunamis/73-eventos-en-el-ecuador>
- Instituto Geofísico. (s.f.). *Red Nacional de Acelerógrafos*. Obtenido de <http://www.igepn.edu.ec/red-nacional-de-acelerografos>

Instituto Geofísico. (s.f.). *Red Nacional de Sismógrafos*. Obtenido de <http://www.igepn.edu.ec/red-nacional-de-sismografos>

Luna, A. S. (2006). *Geografía un enfoque constructivista*. Mexico: Pearson.

Lymon C. Reese. (2006). *Analysis and Design of Shallow and Deep Foundations*. John Wiley & Sons.

Morral, F. R. (2004). *Metalurgia General*. Barcelona: Reverté.

Muñoz, D. (1989). *Conceptos básicos en riesgo sísmico*. Obtenido de <https://revistas.ucm.es/index.php/FITE/article/download/.../12605>

Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). Categoría de edificaciones y coeficiente de importancia I. En N. E. Construcción, *Peligro Sísmico* (pág. 39). Quito: MIDUVI.

Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). Coeficientes de perfil de suelo. En N. E. Construcción, *Peligro Sísmico* (págs. 31-32). Quito: MIDUVI.

Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). Curvas de peligro sísmico. En N. E. Construcción, *Peligro Sísmico* (pág. 111). Quito: MIDUVI.

Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). Diseño basado en fuerzas. En N. E. Construcción, *Peligro Sísmico* (pág. 62). Quito: MIDUVI.

Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). Ductilidad y factor de reducción de resistencia sísmica R. En N. E. Construcción, *Norma Ecuatoriana de la Construcción* (pág. 65). Quito: MIDUVI.

Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). Espectro elástico de respuesta. En N. E. Construcción, *Peligro Sísmico* (pág. 33). Quito: MIDUVI.

- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). *Peligro Sísmico*. Quito: MIDUVI.
- Norma Ecuatoriana De La Construcción. (2015). *Peligro Sísmico*. Quito: MIDUVI.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). Procedimiento de cálculo del DBF. En N. E. Construcción, *Norma Ecuatoriana de la Construcción* (págs. 60-61). Quito: MIDUVI.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). Regularidad/configuración estructural. En N. E. Construcción, *Peligro Sísmico* (págs. 50-51). Quito: MIDUVI.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). Tipos de perfiles de suelos para el diseño sísmico. En N. E. Construcción, *Peligro Sísmico* (pág. 30). Quito: MIDUVI.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). Zonificación sísmica y factor de zona z. En N. E. Construcción, *Peligro Sísmico* (pág. 27). Quito: MIDUVI.
- Rao, N. K. (2011). *Foundation Design: Theory and Practice*. John Wiley & Sons.
- Reese, L. C. (2011). *Single Piles and Piles Groups Under Lateral Load*. CRC Press.
- Retamales, R. (2020). Apoyo Elastomérico. *Innovaciones Tecnológicas /USFQ*. Quito.
- Rochel, R. (2012). *Análisis y diseño sísmico de edificios*. Medellín: Fondo Editorial Universitario.
- Rojas, A. (2012). *Proyecto Arquitectónico En Zonas Sísmicas*. Bloomington: Palibro.
- Rotondo, L. M. (2000). *Diseño sismorresistente de edificios: Técnicas convencionales y avanzadas*. Barcelona: Reverté.
- Sociedad Geográfica de Lima. (1940). *Boletín de la Sociedad Geográfica de Lima*. Lima: Sociedad Geográfica de Lima.

Suarez, V. (2015). Diseño Sismico de Pilas con Pilotes Pre-Barrenados Incluyendo Interaccion Suelo Estructural.

U.S. Geological Survey . (s.f.). *Plate Tectonics and the Hawaiian Hot Spot*. Obtenido de <http://geology.com/usgs/hawaiian-hot-spot/>

Viggiani, C. (2012). *Piles and Pile Foundation*. Spoon Press.