UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR

POSGRADOS

MAESTRÍA EN

INGENIERÍA MECÁNICA CON MENCIÓN EN DISEÑO DE ESTRUCTURAS METÁLICAS EN OBRAS CIVILES E INDUSTRIALES

RPC-SO-24-NO.540-2020

OPCIÓN DE TITULACIÓN:

PROYECTO DE TITULACIÓN CON COMPONENTES DE INVESTIGACIÓN APLICADA Y/O DE DESARROLLO

TEMA:

ANÁLISIS DE AISLADORES Y DISIPADORES SÍSMICOS EN UN EDIFICIO DE 5 PLANTAS EN LA CIUDAD DE CUENCA, SECTOR YANUNCAY

AUTOR:

ÁNGEL EFRÉN APOLO AGUILAR
JAIME RENATO ESQUIVEL CAMPOVERDE

DIRECTOR:

PAÚL BOLÍVAR TORRES JARA

CUENCA – ECUADOR
2024

Autores:

Ángel Efrén Apolo Aguilar
Ingeniero Mecánico.
Candidato a Magíster en Ingeniería Mecánica con mención en Diseño de Estructuras Metálicas en Obras Civiles e Industriales por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.
aapolo@est.ups.edu.ec

Jaime Renato Esquivel Campoverde
Ingeniero Mecánico.
Candidato a Magíster en Ingeniería Mecánica con mención en Diseño de Estructuras Metálicas en Obras Civiles e Industriales por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.
jesquivelc@est.ups.edu.ec

Dirigido por:

Paúl Bolívar Torres Jara
Ingeniero Mecánico.
Magíster en Ingeniería Mecánica.
ptorresj@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos, investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS
2024 © Universidad Politécnica Salesiana.
CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA
ÁNGEL EFRÉN APOLO AGUILAR
JAIME RENATO ESQUIVEL CAMPOVERDE
Análisis de aisladores y disipadores sísmicos en un edificio de 5 plantas en la ciudad de Cuenca, sector Yanuncay

Dedicatoria

Angel

Me gustaría dedicar este trabajo a las personas más importantes en mi vida y aquellas que me han permitido alcanzar las metas que me he propuesto:

Gracias a mis padres, Adalia y Ascanio, quienes me apoyaron desde el inicio de mis estudios y no los defraudé.

A mi esposa Lcda. Evelyn Paredes y a mis hijos Emily y Julián por ser la fuente de inspiración para mis estudios.

Jaime

Dedico este logro a mi esposa Margeory, que siempre ha estado presente junto a mí en los retos del diario vivir; a mis hijos, Sofia, José y Juan, que son el motivo para trabajar con el ejemplo para ellos.

A mis padres por brindarme la oportunidad de vivir y por su apoyo incondicional.

Finalmente, a todos mis amigos que de alguna forma han sido partícipes indirectos.

Agradecimientos

Angel

A Dios por el regalo de la vida, por darme la salud y paciencia para superar todas las dificultades y por concederme sus bendiciones para ver cumplidas mis metas.

A la Universidad Politécnica Salesiana, Facultad de Ingeniería Mecánica, por habernos guiado y formado a lo largo de nuestros años de estudio, a todo el personal docente, en especial a nuestro tutor, el Msc. Paúl Torres, por compartir sus conocimientos y experiencia que han contribuido a nuestra formación personal y profesional.

Agradezco especialmente a mis Padres Adalia y Ascanio, a mi esposa Cristina, gracias por estar siempre a mi lado, impulsándome a ser mejor cada día.

Finalmente, un agradecimiento a mi compañero de tesis Jaime Esquivel, por haber fomentado en mí el deseo de superación, depositando su entera confianza en cada reto que se me presenta, sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y capacidad.

Jaime

A mi familia, por su confianza y apoyo; a mis profesores, por compartir sus conocimientos; en especial a mi director de tesis, Msc. Paúl Torres por su apoyo constante durante el desarrollo de este proyecto, y a mi compañero, Angel Apolo, por su ahínco y voluntad para llevar a cabo esta tesis.

Índice

Dedicatoria I

Agradecimientos II

Resumen XII

Abstract XIII

1 Introducción. 1

2 Determinación del Problema. 3

3 Marco teórico referencial. 4

3.1 Enfoque sismorresistente de los sistemas de protección sísmica. 4

3.2 Aislamiento Sísmico. 6

3.2.1 Fundamentos del aislamiento sísmico. 6

3.2.2 Aisladores sísmicos. 7

3.2.3 Tipos de aisladores sísmicos. 8

3.2.3.1 Aisladores Elastoméricos. 8

3.2.3.1.1 Aisladores Elastoméricos NRB. 9

3.2.3.1.2 Aisladores Elastoméricos LRB. 9

3.2.3.1.3 Aisladores Elastoméricos HDR. 10

3.2.3.2 Aisladores de fricción o deslizantes. 10

3.2.3.3 Propiedades de la modelación bilineal de los aisladores sísmicos para el programa ARSAP 11

3.3 Disipadores sísmicos. 12

3.3.1 Fundamentos de los disipadores sísmicos. 12

3.3.2 Tipos de disipadores sísmicos. 13

3.3.2.1 Disipadores histeréticos. 14

3.3.2.1.1 Disipador por plastificación tipo ADAS. 15

3.3.2.1.2 Disipador por plastificación tipo TADAS. 15

3.3.2.1.3 Disipadores metálicos por fricción. 16

3.3.2.2 Disipadores viscoelásticos. 17

3.3.2.3 Disipadores de amortiguamiento viscoso. 17

3.3.3 Configuración de los disipadores sísmicos en la edificación. 18

3.4 Diseño sismorresistente de estructuras de acero. 19
3.4.1 Riesgo Sísmico. 21
3.4.2 Filosofía del diseño sismorresistente. 21
3.4.3 Comportamiento estructural del acero. 22
3.5 Cargas y combinaciones de cargas. 22
3.6 Procedimiento de análisis estructural con ARSAP 2022. 23

4 Metodología. 26
4.1 Establecer los Parámetros iniciales de aisladores y disipadores sísmicos en un edificio de 5 plantas para determinar el desempeño de los mismos. 26
4.1.1 Materiales utilizados para el análisis. 26
4.1.2 Cargas permanentes, variables y accidentales. 27
4.1.3 Sistema estructural utilizado en la edificación. 31
4.1.4 Condiciones de apoyo de la estructura. 31
4.1.5 Liberación de momentos en vigas secundarias. 33
4.1.6 Diseño Arquitectónico de la edificación. 33
4.1.7 Predimensionamiento de secciones. 36
4.1.7.1 Predimensionamiento de losas. 37
4.1.7.2 Predimensionamiento de vigas secundarias. 38
4.1.7.3 Predimensionamiento de vigas principales. 41
4.1.7.4 Predimensionamiento de columnas. 42
4.1.8 Diseño y Análisis de la edificación Convencional. 45
4.1.8.1 Verificación del cortante basal estático y dinámico. 45
4.1.8.2 Verificación de masas participativas. 46
4.1.8.3 Verificación de desplazamientos y derivas de piso 47
4.1.8.4 Cálculo y optimización de las secciones estructurales del edificio. 51
4.1.8.5 Comportamiento sísmico del Edificio convencional. 56
4.1.9 Selección de alternativas de sistemas de protección sísmica. 56
4.1.9.1 Selección de alternativa de aislamiento sísmico. 60
4.1.9.2 Selección de alternativa de disipadores sísmicos. 61
4.2 Simular en Autodesk Robot Structural el comportamiento de los aisladores y disipadores sísmicos en un edificio de 5 plantas para determinar el desempeño de los mismos. 63

4.2.1 Simulación de la edificación con aisladores sísmicos en ARSAP 2022. 63
4.2.1.1 Caracterización del edificio con aislamiento sísmico. . . 64
4.2.1.2 Diseño del sistema de aislamiento para la edificación. . 66
4.2.1.2.1 Parámetros y características para el modelado bilineal de un aislador sísmico elastomérico LRB. 66
4.2.1.3 Simulación de aisladores sísmicos LRB en ARSAP. . . 76
4.2.1.3.1 Cálculo y optimización del edificio con aisladores LRB. 80
4.2.1.3.2 Comportamiento sísmico del Edificio con aisladores LRB. 84
4.2.2 Simulación de la edificación con disipadores sísmicos en ARSAP 2022. 87
4.2.2.1 Parámetros de diseño de los disipadores sísmicos de fricción. 87
4.2.2.2 Caracterización del edificio con disipadores sísmicos de fricción CRD. 90
4.2.2.3 Cálculo de los disipadores de fricción CRD para la edificación. 92
4.2.2.4 Simulación de disipadores sísmicos CRD en ARSAP. . 96
4.2.2.4.1 Cálculo y optimización del edificio con disipadores CRD. 99
4.2.2.4.2 Comportamiento del Edificio con disipadores sísmicos CRD. 103
4.3 Evaluar los resultados de la simulación de aisladores y disipadores sísmicos en un edificio de 5 plantas para determinar el desempeño de los mismos. 106
4.3.1 Comparación y verificación de resultados obtenidos de la simulación.107
4.3.2 Análisis comparativo de peso estructural. 118
4.3.3 Análisis comparativo de costos del edificio. 119

5 Conclusiones y recomendaciones 123
5.1 Conclusiones 123
5.2 Recomendaciones 124

Referencias bibliográficas 126

ANEXOS 127

Lista de Tablas

1 Valores del factor Z en función de la zona sísmica 21
2 Combinaciones de cargas para el análisis de la edificación 23
3 Desglose de cargas permanentes utilizadas en el análisis 28
4 Desglose de cargas vivas utilizadas en el análisis 29
5 Velocidad instantánea máxima del viento 29
6 Parámetros para definir la carga estática y dinámica de la estructura . 30
7 Coeficientes de diseño y limitaciones para sistemas resistentes sísmicos . 32
8 Características y datos de la edificación para el análisis estructural 35
9 Características técnicas de placa colaborante Kubilosa 38
10 Características de viga secundaria predimensionada 40
11 Características de viga principal predimensionada 43
12 Características de sección para columnas 44
13 Cortante basal dinámico obtenido de ARSAP 2022 45
14 Verificación de cortante basal 46
15 Periodo y participación modal del edificio 46
16 Limites permisibles de derivas de piso 47
17 Derivas inelásticas del edificio en dirección X 49
18 Derivas inelásticas del edificio en dirección Y 50
19 Resultados demanda-capacidad de secciones del edificio 52
20 Optimización de sección de columnas 53
21 Optimización de sección de vigas secundarias 53
22 Optimización de sección de vigas principales 54
23 Peso de la estructura convencional 55
24 Datos de entrada para diseño de aisladores LRB 66
25 Coeficiente de amortiguamiento 67
26 Características del sistema de aislamiento 70
27 Características del aislador LRB 75
28 Características del aislador LRB propuesto del catálogo DIS 75
29 Optimización de sección de columnas 81
30 Optimización de sección de vigas secundarias 81
31 Optimización de sección de vigas principales 82
32 Peso de la estructura con aisladores LRB 83

33 Fuerzas de respuesta esperadas por nivel para los disipadores de fricción CRD 93
34 Parámetros de diseño de disipadores de fricción 94
35 Rigidez de disipadores de fricción 95
36 Parámetros finales para modelación de disipadores en ARSAP 2022 96
37 Optimización de sección de columnas 100
38 Optimización de sección de vigas secundarias 100
39 Optimización de sección de vigas principales 101
40 Peso de la estructura con disipadores CRD 102
41 Comparación de modos de vibración de la estructura 107
42 Porcentaje máximo de torsión presente en la edificación. 111
43 Cortante basal por piso. 112
44 Porcentaje de reducción de cortante basal por piso 112
45 Derivas máximas de los distintos diseños analizados. 114
46 Porcentaje de reducción de las derivas en la edificación 114
47 Desplazamientos máximos de los distintos diseños analizados. 116
48 Porcentaje de reducción de los Desplazamientos en la edificación 116
49 Peso estructural de las 3 configuraciones de análisis 118
50 Porcentaje de reducción del peso con dispositivos sísmicos 118
51 Presupuesto referencial diseño convencional del edificio 119
52 Presupuesto referencial diseño con aisladores sísmicos 120
53 Presupuesto referencial diseño con disipadores sísmicos 121

Lista de Figuras

1 Características de un edificio con aisladores en la base 5
2 Características de un edificio con disipadores de energía 5
3 Daño generado por altas distorsiones de piso 6
4 Daño generado por altas aceleraciones de piso 7
5 Partes de un aislador elastomérico 8
6 Tipos de aisladores elastoméricos 9
7 Partes de un aislador deslizante 10
8 Esquema del modelo bilineal 11
9 Comparación de Absorción de Energía de Diferentes tipos de Disipación 14
10 Disipador metálico por plastificación tipo ADAS 15
11 Disipador metálico por plastificación tipo TADAS 16
12 Disipador por fricción 16
13 Disipador de amortiguamiento viscoelástico 17
14 Disipador de amortiguamiento viscoso 18
15 Configuración de los disipadores sísmicos 19
16 Zonificación sísmica del Ecuador 20
17 Interfaz de ARSAP 2022..... 24
18 Flujo de trabajo con ARSAP 2022 25
19 Propiedades del acero estructural ASTM A36..... 26
20 Propiedades del hormigón f'c=210 kg/cm^2.....27
21 Espectro elástico para suelo tipo D según NEC 2015 31
22 Condiciones de apoyo de la estructura 32
23 Liberación de momentos en extremos de vigas secundarias..... 33
24 Modelo arquitectónico de la edificación en Autodesk Revit 2022 34
25 Plano arquitectónico de planta 35
26 Elevación de la edificación 36
27 Detalle de losa con sistema de placa colaborante (steel deck) 37
28 Esquema de viga simplemente apoyada y diagrama de momentos 41
29 Esquema de viga empotrada y diagrama de momentos 41
30 Desplazamientos laterales máximos en dirección X 48
31 Desplazamientos laterales máximos en dirección Y 48
32 Derivas elásticas del edificio en dirección X..... 49
33 Derivas elásticas del edificio en dirección Y..... 50

34 Configuración de cálculo de secciones en ARSAP 2022 51
35 Relación demanda-capacidad de la estructura convencional 55
36 Desplazamiento máximo en sentido X estructura convencional 57
37 Derivas máximas en sentido X estructura convencional 57
38 Desplazamiento máximo en sentido Y estructura convencional 58
39 Derivas máximas en sentido Y estructura convencional 58
40 Cortante basal máximo en sentido X estructura convencional 59
41 Cortante basal máximo en sentido Y estructura convencional 59
42 Aisladores con núcleo de plomo (LRB) 60
43 Disipadores sísmicos a Fricción 62
44 Ubicación de aisladores sísmicos en planta 64
45 Ubicación de aisladores sísmicos en elevación 65
46 Espectro sísmico máximo considerado (MCE) 70
47 Dimensiones finales del aislador LRB 76
48 Modelo bilineal de aislador LRB 77
49 Interfaz de ARSAP para creación de aisladores sísmicos 78
50 Creación de aislador sísmico en ARSAP 78
51 Asignación de aisladores sísmicos en el modelo estructural 79
52 Configuración de cálculo de secciones con aisladores LRB en ARSAP . 80
53 Relación demanda-capacidad de la estructura con aisladores LRB 83
54 Desplazamiento máximo en sentido X estructura con aisladores sísmicos 84
55 Derivas máximas en sentido X estructura con aisladores sísmicos 85
56 Desplazamiento máximo en sentido Y estructura con aisladores sísmicos 85
57 Derivas máximas en sentido Y estructura con aisladores sísmicos 86
58 Cortante basal máximo en sentido X estructura con aisladores sísmicos 86
59 Cortante basal máximo en sentido Y estructura con aisladores sísmicos 87
60 Configuración de disipadores utilizados en la edificación 90
61 Perspectiva y detalle de disipadores sísmicos de fricción CRD en la edificación 91
62 Datos obtenidos del modelo convencional en ARSAP 2022 92
63 Dimensiones de contravientos en ejes X e Y 94
64 Creación de elementos Links en ARSAP 2022 97
65 Creación de parámetros para disipadores en ARSAP 2022 98
66 Asignación y disposición final de disipadores en el edificio 98
67 Configuración de cálculo de secciones con disipadores CRD en ARSAP 99

68 Relación demanda-capacidad de la estructura con disipadores CRD . . 102
69 Desplazamiento máximo en sentido X estructura con disipadores sísmicos 103
70 Derivas máximas en sentido X estructura con disipadores sísmicos . . . 104
71 Desplazamiento máximo en sentido Y estructura con disipadores sísmicos 104
72 Derivas máximas en sentido Y estructura con disipadores sísmicos . . . 105
73 Cortante basal máximo en sentido X estructura con disipadores sísmicos 105
74 Cortante basal máximo en sentido Y estructura con disipadores sísmicos 106
75 Modos de vibración de estructura convencional 108
76 Modos de vibración de estructura con aisladores sísmicos 109
77 Modos de vibración de estructura con disipadores sísmicos 109
78 Comparación de masas participativas 110
79 Cortantes basales de piso en dirección "X" 113
80 Cortantes basales de piso en dirección "Y" 113
81 Comparación de derivas de piso en dirección "X" 115
82 Comparación de derivas de piso en dirección "Y" 115
83 Comparación de Desplazamientos de piso en dirección "X" 117
84 Comparación de Desplazamientos de piso en dirección "Y" 117
85 Comparación de costos de los diseños propuestos 122

ANÁLISIS DE AISLADORES Y DISIPADORES SÍSMICOS EN UN EDIFICIO DE 5 PLANTAS EN LA CIUDAD DE CUENCA, SECTOR YANUNCAY

AUTOR(ES):

Angel Efren Apolo Aguilar

Jaime Renato Esquivel Campoverde

Resumen

Las regulaciones actuales de diseño estructural en Ecuador son cada vez más estrictas en el diseño de estructuras, ya sean estas críticas o elevada importancia, como no críticas o baja importancia. Los hospitales, los edificios gubernamentales especiales y los edificios utilizados como refugios entran en la categoría de elevada importancia. Sin embargo, los requisitos propuestos en dicha normativa, permiten grandes deformaciones, debido a que los códigos actuales utilizan cargas laterales reducidas que tienen en cuenta el comportamiento inelástico de la estructura, lo que puede causar daños sustanciales a la misma.

Con el fin de contrarrestar dichos daños estructurales, el presente trabajo tiene como principal objetivo analizar, evaluar y determinar el comportamiento y desempeño sísmico de un edificio ubicado en la ciudad de Cuenca, implementando dispositivos sísmicos de protección.

En una primera instancia se planteó y se analizó el diseño convencional sismorresistente en estructura metálica. Con base en los resultados del análisis se presentaron dos alternativas de protección sísmica; el primero, un sistema de aislamiento sísmico con dispositivos elastoméricos y núcleo de plomo LRB, y el segundo, un sistema de disipadores sísmicos de fricción restringidos a la ductilidad CRD.

Para el diseño de los elementos estructurales que conformaron el edificio, así como los dispositivos aisladores y disipadores sísmicos, se utilizaron las normas nacionales (NEC 15) y las normas internacionales: American Society of Civil Engineers (ASCE 7-16). De los resultados del análisis determino, que la implementación de dispositivos aisladores y disipadores símicos reducen efectivamente las derivas, desplazamientos y cortantes basales del edificio.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones del estudio, cuya principal conclusión es que mediante la correcta selección y diseño de dispositivos antisísmicos se puede mejorar significativamente el comportamiento sísmico de la estructura para que se mantenga operativa luego de un sismo.

Palabras clave: Aisladores sísmicos, disipadores de energía, aislamiento sísmico.

Abstract

Current Ecuadorian structural design regulations are increasingly strict by the structures design, whether they are critical or high importance, or non-critical or low importance. Hospitals, special government buildings, and buildings used as shelters belong to high importance category. However, the proposed requirements in that regulations allow large deformations, because current codes use lateral reduced loads that consider the inelastic structure behavior, these large deformations can cause substantial damage to it.

In order to counteract such structural damage, this work goal is analyze, evaluate and determine the behavior and seismic performance of a building located in Cuenca city, using seismic protection devices.

Initialy, the conventional earthquake-resistant design in a steel structure was proposed and analyzed. Based on the analysis results, two seismic protection alternatives were discussed; the first, a seismic isolation system with elastomeric devices and lead core LRB, and the second, a system with seismic friction dissipators restricted to CRD ductility.

For the building elements structural design , as well as the seismic isolating and dissipating devices, were used the national standards (NEC 15) and international standards: American Society of Civil Engineers (ASCE 7-16) . In accordance with the analized results, it was determined the use the insulating devices and seismic dissipators effectively reduce the building drifts, displacements and basal shears.

Finally, the conclusions and recommendations of the study are presented, whose the main conclusion is that the correct selection and design of anti-seismic devices, the structure seismic behavior can be significantly improved so that it remains operational after an earthquake.

Keywords: Seismic isolators, energy dissipators, seismic isolation.

1. Introducción.

Los terremotos son fenómenos naturales potencialmente destructivos que destruyen propiedades y alteran los servicios que sustentan la vida y las funciones sociales. Por lo tanto, para garantizar la seguridad y el confort de espacios utilizados por personas, es necesario mitigar los riesgos sísmicos en los lugares de mayor riesgo, investigando el comportamiento y los impactos de los edificios y sus componentes no estructurales, líneas de vida y estructuras viales. Cómo los daños causados por los terremotos a estas estructuras afectan a la sociedad y cómo se puede mitigar estos daños a través de medios innovadores. (Abdel-Kareem, 2009)

Recientemente, se han logrado muchos avances importantes en la mejora de la respuesta y el rendimiento sísmico. Se ha desarrollado dispositivos especializados para el control de daños para edificios, puentes y otras estructuras. Estos avances se pueden dividir en tres grupos: Sistemas pasivos como aislamiento básico y dispositivos de protección suplementarios con disipación de energía; sistemas activos, que requieren la participación activa de las personas. Un dispositivo mecánico cuyas características cambian durante la respuesta sísmica basada en mediciones de respuesta, y sistemas híbridos, que combinan enfoques de sistemas pasivos y activos para que la seguridad del edificio no se vea comprometida. (Castro y Sarmiento, 2009)

Convencionalmente, el diseño sísmico de estructuras de edificios se basa en el concepto de incrementar la capacidad de resistencia de las estructuras contra terremotos, empleando, por ejemplo, el uso de muros de corte, marcos arriostrados o marcos resistentes a momento, sin embargo, estos métodos tradicionales a menudo resultan en altas aceleraciones del piso para edificios rígidos, o grandes desviaciones entre pisos para edificios flexibles. Debido a esto, el contenido del edificio y los componentes no estructurales pueden sufrir daños significativos durante un terremoto importante, incluso si la estructura misma permanece básicamente intacta. Esto no es tolerable para edificios cuyo contenido es más costoso y valioso que los propios edificios. Las fábricas de producción de alta precisión son un ejemplo de edificios que contienen equipos extremadamente costosos y sensibles. Además, los hospitales, las estaciones de policía y de bomberos y los centros de telecomunicaciones son ejemplos de instalaciones que deben permanecer operativos inmediatamente después de un terremoto. (Abdel-Kareem, 2009)

Conceptualmente, los sistemas de protección sísmica reducen la respuesta de la superestructura al separarla de los movimientos sísmicos dañinos del suelo. Los sistemas de aislamiento típicos reducen las fuerzas sísmicas transmitidas a la superestructura al alargar el período del edificio y agregar cierta cantidad de amortiguación. La amortiguación adicional es una propiedad inherente de la mayoría de los aisladores, pero también puede proporcionarse mediante dispositivos de disipación de energía suplementarios instalados a lo largo de la interfaz de aislamiento. En condiciones favorables, el sistema de aislamiento reduce la deriva en la superestructura en un factor de al menos dos, y a veces, hasta en un factor de cinco de lo que ocurriría si el edificio no estuviera aislado. Las aceleraciones del piso también se reducen en la estructura, aunque la cantidad de reducción depende de las características de fuerza-deflexión de los aisladores y puede no ser tan significativa como la reducción de la deriva. La reducción de la deriva en la superestructura protege los componentes y elementos estructurales, así como los componentes no estructurales sensibles al daño inducido por la deriva. La reducción de la aceleración protege los componentes no estructurales que son sensibles al daño inducido por la aceleración, como equipos, maquinaria y hardware sensibles al movimiento. (Abdel-Kareem, 2009)

La implementación del sistema de aislamiento sísmico está en línea con la nueva filosofía global de diseño estructural, en la que el concepto de protección sísmica es más amplio, evitando daños a elementos estructurales y no estructurales, brindando mayor seguridad a las personas, a las inversiones y teniendo en cuenta eso a través del control controlado de la estructura y el conocimiento conocido para garantizar la mantenibilidad de la estructura (Cando Cando, Monrroy Rocano, Ortega Sarmiento, y Puerres Guilcazo, 2012). La aplicabilidad del concepto de protección sísmica no necesita restringirse a la estructura en su totalidad. También se puede aplicar al aislamiento de equipos sensibles montados dentro de un edificio de vibraciones no deseadas en el piso mediante, por ejemplo, la instalación de un sistema de aislamiento entre la base del equipo y el piso de soporte.

Todas estas tecnologías están jugando un papel cada vez más importante en el diseño estructural, por lo que esta investigación está orientada a sistemas pasivos de disipación de energía en edificios y puede extenderse a puentes y otro tipo de estructuras, ya que los principios básicos de funcionamiento son los mismos.

2. Determinación del Problema.

Una gran parte de la población mundial vive en regiones de riesgo sísmico, con probabilidad de terremotos de diversa gravedad y frecuencia. Los terremotos causan pérdidas significativas de vidas y daños a la propiedad cada año, por lo que se han desarrollado muchos diseños y tecnologías de construcción sísmica en un intento de mitigar los efectos de los terremotos en edificios, puentes y contenidos potencialmente vulnerables. (Skinner, Robinson, y McVerry, 1993)

Ecuador se encuentra en una de las regiones con actividad sísmica muy frecuente, ya que forma parte del Cinturón de Fuego del Pacífico, que es una de las zonas de subducción ubicadas a lo largo de la costa del Pacífico, donde se encuentran la mayoría de volcanes y es una de las regiones sísmicas más activas del mundo, razón principal por la que nuestro país sufre movimientos tectónicos con frecuencia.

En base en la idea de reducir la demanda sísmica en lugar de aumentar la capacidad resistente de las estructuras, los sistemas antisísmicos, como son, los aisladores y disipadores sísmicos, nos brindan un método simple para mitigar o reducir los posibles daños producidos por los terremotos. La correcta aplicación de esta tecnología conduce a un mejor comportamiento de las estructuras, que sigue siendo esencialmente elástico durante los terremotos de gran magnitud. (Abdel-Kareem, 2009)

Actualmente, en Ecuador, se sabe muy poco sobre este tipo de dispositivos, por lo que es necesario desarrollar proyectos de investigación que llamen la curiosidad de los profesionales y estudiantes de ingeniería y los animen a aventurarse en nuevas tendencias que involucran la ingeniería estructural; esto, seguro sucederá en un futuro próximo generando una nueva realidad arquitectónica que destaque edificaciones que logren un óptimo desempeño sísmico, reduzcan daños y eviten importantes pérdidas humanas y económicas.

Por lo antes mencionado, el presente trabajo se realiza con la finalidad de analizar el desempeño sísmico de un edificio estructural en la ciudad de Cuenca, empleando este tipo de dispositivos y comprobando el cumplimiento de la normativa vigente, para de esta manera propiciar el uso de este tipo de elementos que en la actualidad no son conocidos, ni mucho menos utilizados en proyectos estructurales.

3. Marco teórico referencial.

Los conceptos de aislamiento y disipación de energía sísmica se han estudiado desde hace más de medio siglo, y en las últimas décadas se ha estudiado su aplicación en edificios para protegerlos de terremotos de gran magnitud.

Los sistemas de protección sísmica (aislamiento sísmico) para edificios se han utilizado ampliamente en ciudades como Japón desde la década de 1980. La eficacia de los sistemas de protección sísmica se demostró en el terremoto de Kobe de 1995.

En lo que respecta a Sudamérica, Chile es uno de los pocos países que utiliza aisladores y disipadores de energía en sus estructuras. Además, su estándar NCh2745 incluye lineamientos y fórmulas para el diseño de estos dispositivos.

En Ecuador, aunque la norma NEC 2015 no brinda recomendaciones de diseño para aisladores o amortiguadores, existen algunas edificaciones diseñadas con sistemas de protección sísmica. Entre ellos se encuentra la edificación Sky Building (2016) ubicada a la salida del Aeropuerto José Joaquín de Olmedo de Guayaquil.

3.1. Enfoque sismorresistente de los sistemas de protección sísmica.

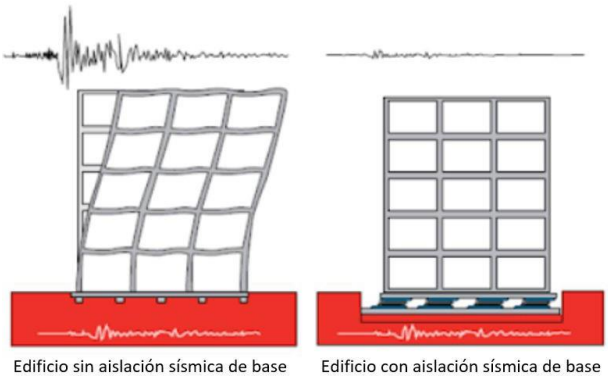
A medida que se producen fuertes terremotos en diferentes partes del mundo, se buscan diferentes alternativas para proteger las estructuras y que estas se mantengan en buen estado después de un terremoto.

Las alternativas más utilizadas para la protección contra terremotos son los sistemas de aislamiento y los sistemas de disipación de energía. Los sistemas de aislamiento se caracterizan por reducir significativamente la rigidez de la base de la estructura, al mismo tiempo que reducen las aceleraciones y fuerzas provocadas por los terremotos. A medida que se reducen las fuerzas, los elementos estructurales experimentarán menores deformaciones y tensiones, previniendo daños estructurales y no estructurales. Los sistemas disipadores de energía, por otro lado, no reducen la energía generada por un terremoto, sino que absorben la mayor parte de ella, evitando así que los elementos estructurales absorban toda esa energía que luego se liberarían como energía inelástica y provocaría daños considerables.

Las Figuras 1 y 2 ilustran el comportamiento de una estructura con aisladores y amortiguadores, durante un evento sísmico.

Figura 1

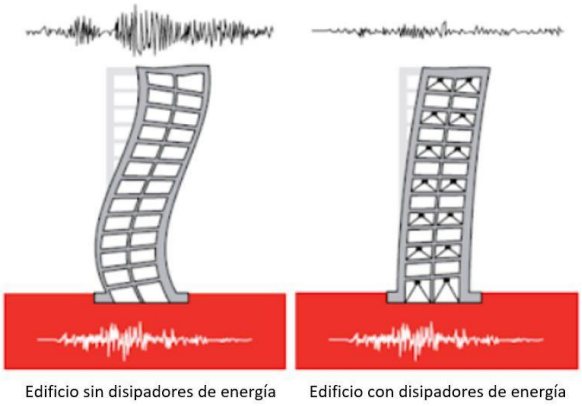
Características de un edificio con aisladores en la base.



Fuente: Tomada de (https://construccionyarquitecturaoficial.blogspot.com/2016/08/aislantes-sismicos-y-disipadores.html).

Figura 2

Características de un edificio con disipadores de energía.



Fuente: Tomada de (https://construccionyarquitecturaoficial.blogspot.com/2016/08/aislantes-sismicos-y-disipadores.html).

Los edificios que contienen estos dispositivos se comportan de manera muy diferente a los edificios que no los tienen. Esto se debe a que tanto los disipadores como los aisladores cambian algunas propiedades de la estructura, como la rigidez, el período y el amortiguamiento.

3.2. Aislamiento Sísmico.

Las características primordiales de una estructura con aislamiento y disipación sísmica consiste en resistir sismos pequeños y moderados; sin daño en elementos estructurales y no estructurales; a su vez, resistir sismos severos sin que exista falla o colapso en el sistema de aislamiento, que no se produzcan daños significativos en los elementos estructurales, ni daños masivos a elementos no estructurales, y principalmente que la superestructura permanezca en el rango elástico durante cualquier evento sísmico. (Villavicencio, 2015)

3.2.1. Fundamentos del aislamiento sísmico.

Para que una estructura logre un desempeño sísmico aceptable, los estándares de diseño sísmico se enfocan en limitar la deformación de entrepisos y emplear un grado de ductilidad o capacidad estructural para disipar energía permitiendo que la estructura invada el rango no lineal. Este concepto de diseño, conocido como "tradicional", tiene una gran desventaja porque solo controla los daños relacionados con la distorsión de pisos (ver figura 3), y no tiene en cuenta los daños causados por altos niveles de aceleración (ver figura 4), que es la principal causa de las altas tasas de daños de los componentes estructurales.(Mayes y Naeim, 2000)

Figura 3

Daño generado por altas distorsiones de piso.

Fuente: (FOPAE, 2010).

Para solucionar los problemas del análisis y diseño tradicional, en las últimas décadas se han desarrollado sistemas de protección sísmica, entre los que destacan los aisladores, con el propósito de controlar los daños estructurales de las edificaciones mediante el control de la distorsión y aceleración en todos los niveles de las edificaciones.

Figura 4

Daño generado por altas aceleraciones de piso.

Fuente: (FOPAE, 2010).

3.2.2. Aisladores sísmicos.

Los aisladores sísmicos consiguen desacoplar la estructura del terreno, colocándose estratégicamente en partes específicas de la estructura, los cuales, en un evento sísmico, proveen a la estructura la suficiente flexibilidad para diferenciar la mayor cantidad posible el periodo natural de la estructura con el periodo natural del sismo, evitando que se produzca resonancia, lo cual podría provocar daños severos o el colapso de la estructura. (Estructurando, 2022)

3.2.3. Tipos de aisladores sísmicos.

Hay mucha diversidad en los diseños de aisladores sísmicos. Estos, sin embargo, pueden agruparse en dos tipos. El primer tipo de dispositivos de aisladores son los elastoméricos, los cuales consisten en elementos que permiten grandes deformaciones laterales. Son cilindros cortos con capas de materiales flexibles como pueden ser gomas de alta resistencia, alternadas con láminas o capas de acero. El segundo tipo de aisladores sísmicos son los de deslizamiento, los cuales se basan en apoyos con planchas metálicas que permiten desplazamientos relativos entre las dos planchas. Una plancha va sujetada a la fundación y la otra a la estructura. El desplazamiento relativo de las planchas permite aislar el movimiento de la fundación, por lo que no se transmite toda la energía de movimiento a la estructura. (Genatios y Lafuente, 2016)

3.2.3.1. Aisladores Elastoméricos.

El aislador consta de capas alternas de placas de caucho y acero unidas entre sí mediante un proceso de vulcanización, como se observa en la figura 5. De esta forma, la rigidez del soporte está controlada por el espesor de la capa de caucho. Por tanto, cuanto más gruesas sean estas capas, más flexible será el soporte en dirección horizontal. En cambio, la rigidez vertical de los soportes está controlada por la alta rigidez en el plano de las placas de acero, que suprimen la expansión lateral del caucho causada por la presión vertical. (Aguiar, Almazán, Dechent, y Suárez, 2016)

Figura 5

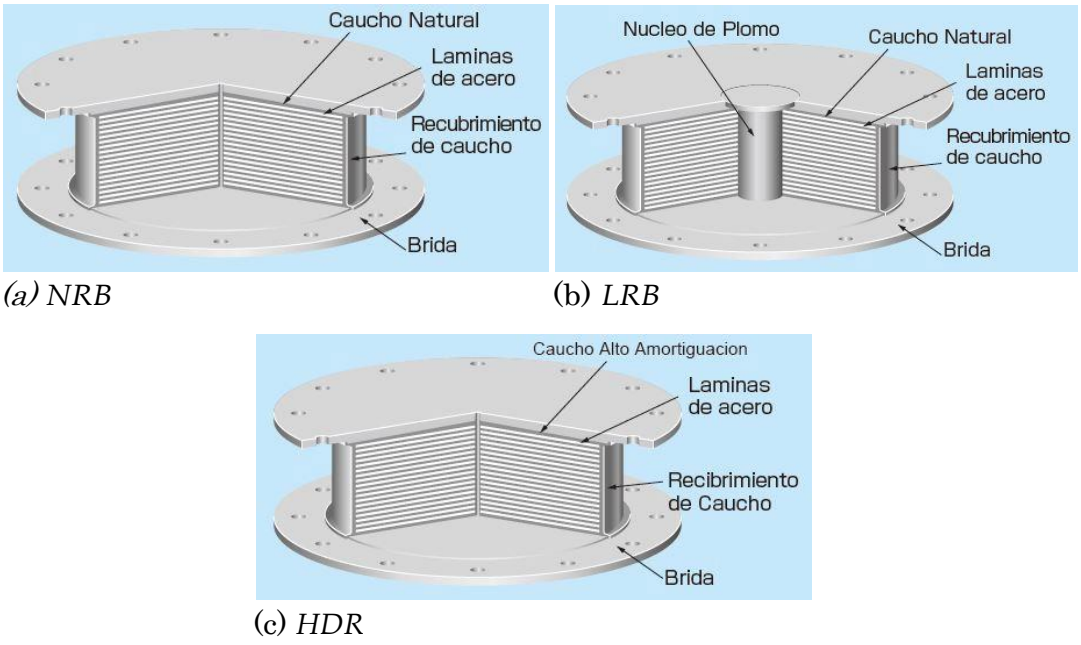
Partes de un aislador elastomérico.

Fuente: Tomada de (https://grupograsa.es/como-funcionan-los-aisladores-sismicos-de-los-edificios/).

Dependiendo de la composición del elastómero, tres tipos de aisladores de elastómero ampliamente utilizados son los aisladores de caucho natural (NRB), los aisladores de caucho con núcleo de plomo (LRB) y los aisladores de caucho de alta amortiguación (HDR), los cuales podemos observar en la figura 6.

Figura 6

Tipos de aisladores elastoméricos.



(a) NRB (b) *LRB*

(c) *HDR*

Fuente: Catalogo Bridgestone

3.2.3.1.1. Aisladores Elastoméricos NRB.

Este dispositivo, mostrado en la figura 6a, utiliza caucho natural, que tiene un coeficiente de amortiguación menor en comparación con otros aisladores. Aun así, es resistente. Su diseño le aporta una gran flexibilidad, aunque no cuenta con un sistema de amortiguación propio.

3.2.3.1.2. Aisladores Elastoméricos LRB.

El aislador de núcleo de plomo mostrado en la figura 6b, está compuesto por placas de acero con láminas de caucho natural vulcanizado esparcidas entre las placas de acero. Su núcleo central es de plomo, mientras que el caucho interno proporciona acción de resorte y el núcleo interno proporciona mayor amortiguación.

3.2.3.1.3. Aisladores Elastoméricos HDR.

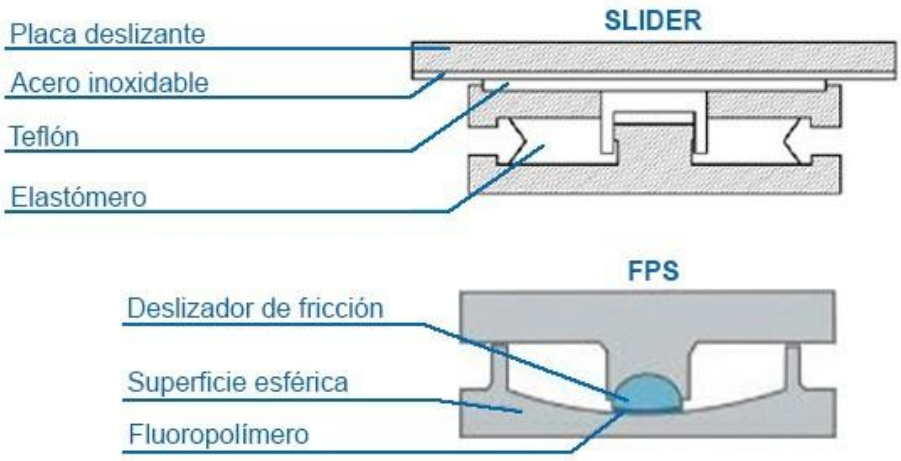
El aislador de alto amortiguamiento mostrado en la figura 6c, proporciona la misma funcionalidad sin el uso de núcleo de plomo. Este dispositivo consta internamente de placas metálicas intercaladas con capas de caucho de alto amortiguamiento, el mismo que proporciona la flexibilidad y rigidez requerida para este tipo de aislador.

3.2.3.2. Aisladores de fricción o deslizantes.

Los aisladores deslizantes utilizan el principio de un péndulo simple para incrementar el periodo natural de la estructura aislada. De esta manera, el periodo objetivo de la estructura aislada se determina en función del radio de curvatura de la superficie cóncava del aislador.

Figura 7

Partes de un aislador deslizante.



Fuente: Tomada de (http://www.disipaing.com/aisladores-sismicos/).

La versión más sencilla de este tipo de aisladores, es el "Slider" deslizador, que consiste en dos planchas planas de acero inoxidable, con un material intermedio de baja fricción. Los aisladores con planchas curvas, generan una condición de péndulo, por lo que son conocidos como sistemas de péndulos de fricción "FPS" (friction pendulum systems). Estos sistemas incluyen superficies esféricas de contacto que permiten un desplazamiento relativo y generan un movimiento pendular, ver figura 7.

3.2.3.3. Propiedades de la modelación bilineal de los aisladores sísmicos para el programa ARSAP.

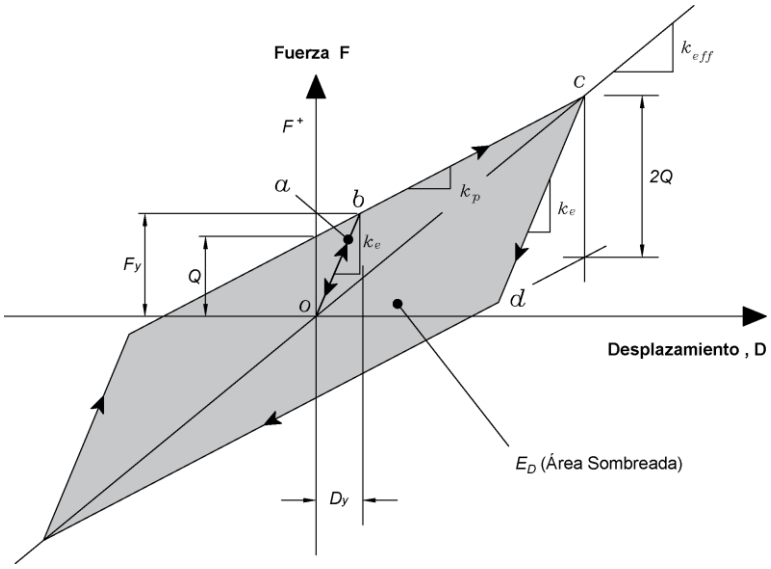
La mayoría de los sistemas de aislamiento sísmico, pueden representarse mediante modelos bilineales porque las curvas de histéresis están bien idealizadas usando esta aproximación bilineal; los modelos bilineales se basan principalmente en tres parámetros: rigidez inicial, rigidez post-fluencia y fuerza en deformación cero. (Cando Cando y cols., 2012)

Si se cumplen las condiciones anteriores, se puede encontrar una relación lineal con las fuerzas sísmicas que afectan al sistema. Sin embargo, en la mayoría de los casos se encuentran condiciones como configuraciones estructurales complejas, suelos muy blandos, proximidad a fallas activas, todo lo cual impide que el análisis lineal represente con precisión el desempeño de la estructura. (Mullo Pilamunga, 2014)

En la Figura 8 se presenta un esquema de una representación bilineal, usado para expresar la relación entre la fuerza cortante y el desplazamiento lateral que sufre el sistema de aislamiento sísmico.

Figura 8

Esquema del modelo bilineal.



Fuente: (Meza Blandón y Sánchez García, 2010)

Para el modelo histerético, se encuentra que las propiedades del aislador son independientes de la velocidad. En este modelo, los desplazamientos máximo y mínimo ocurren con el corte máximo y mínimo, respectivamente.

Al utilizar el programa ARSAP, además de ingresar los datos anteriores, es necesario definir parámetros adicionales relacionados con la amortiguación efectiva y la energía disipada de dichos aisladores.

Los parámetros para modelar el sistema de aislamiento en ARSAP deben obtenerse de los lazos de histéresis producidos por pruebas de corte dinámico de prototipos de aisladores. Sin embargo, cuando esta información no está disponible, estas propiedades pueden estimarse utilizando las fórmulas dadas en las normas y luego verificarse y refinarse utilizando los datos proporcionados por los fabricantes de estos dispositivos. (Gutiérrez, 2016)

3.3. Disipadores sísmicos.

Los disipadores sísmicos tienen como función disipar las acumulaciones de energía asegurándose que otros elementos de la estructura no sean sobre solicitados, evitando daños a la estructura. Es decir, los disipadores sísmicos ofrecen un incremento de la amortiguación a la estructura. (Estructurando, 2022)

3.3.1. Fundamentos de los disipadores sísmicos.

La disipación de energía en estructuras se basa en la idea de colocar dispositivos en estructuras diseñados para aumentar la capacidad de la estructura de perder energía durante los terremotos. Toda estructura se deforma para disipar o eliminar la energía de un terremoto. Cuando se aplican dispositivos o mecanismos de disipación de energía a las estructuras, estas experimentan fuertes deformaciones a medida que la estructura se mueve durante los terremotos. A través de estas fuertes deformaciones, la capacidad de disipación de energía de la estructura aumenta significativamente a medida que disminuye la deformación estructural. Estos dispositivos se denominan disipadores de energía o amortiguadores sísmicos y pueden tener diversas formas y principios operativos. Los más conocidos se basan en elementos viscosos deformables o elementos metálicos que facilitan la fluencia. (Oviedo, Ricardo, 2004)

3.3.2. Tipos de disipadores sísmicos.

Los sistemas de control pasivo consisten en dispositivos que reaccionan ante acciones sísmicas, cambiando el comportamiento dinámico de la estructura y reduciendo su respuesta estructural; y no requieren de una fuente de energía para operar. (Lama, 2013)

Estos dispositivos se agrupan en tres categorías diferentes: dispositivos activados por desplazamiento, dispositivos activados por velocidad y dispositivos activados por movimiento.

Los dispositivos activados por desplazamiento, disipan energía a través del desplazamiento relativo que se produce entre sus puntos de conexión a la estructura primaria. En general, su comportamiento es independiente de la frecuencia de vibración de la excitación. Además, las fuerzas generadas por estos dispositivos en los principales elementos estructurales están en fase con las fuerzas internas generadas durante la excitación, es decir, las fuerzas máximas que ocurren en el disipador coinciden con las que ocurren durante los terremotos, en la estructura principal. Un ejemplo típico son los disipadores histeréticos. (Jurado, 2015)

Los dispositivos activados por velocidad disipan energía a través de la velocidad relativa entre sus puntos de conexión. La respuesta fuerza-desplazamiento de estos disipadores de calor depende de la frecuencia de excitación porque las fuerzas generadas por estos dispositivos están desfasadas con las fuerzas internas generadas en la estructura durante la excitación. Ejemplos típicos de estos dispositivos son disipadores viscosos y viscoelásticos. (Jurado, 2015)

Los dispositivos activados por movimiento interrumpen el flujo de energía en la estructura mediante vibraciones del sistema auxiliar. Un ejemplo típico de este sistema es el sistema de masa sintonizada. (Jurado, 2015)

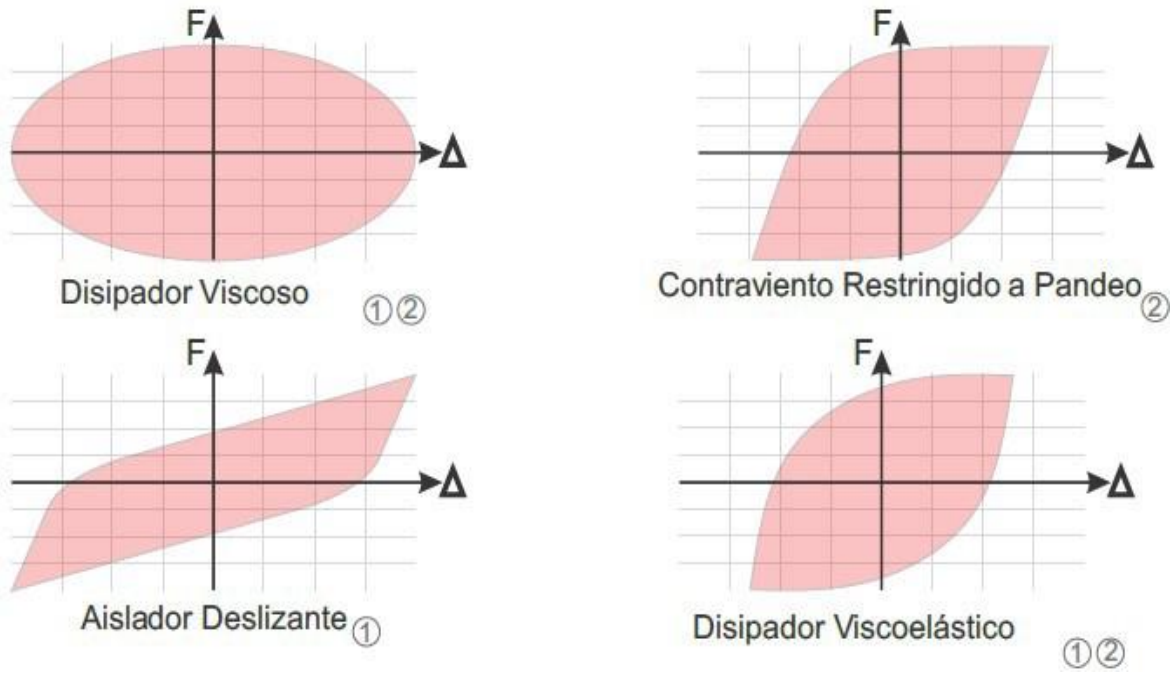
En la figura 9 se observa la comparación de absorción de energía de los diferentes sistemas pasivos de control sísmico, el área dentro de cada curva histerética es proporcional a la energía absorbida por el dispositivo. Los números marcados en cada curva en la parte inferior derecha indican:

1. Dependiente de la Velocidad, adiciona complejidad al diseño.

2. Debe ser reemplazado después del sismo, recalibrado en el caso Viscoso.

Figura 9

Comparación de Absorción de Energía de Diferentes tipos de Disipación.



Fuente: QUAKETEK, 2022

3.3.2.1. Disipadores histeréticos.

Estos dispositivos disipan energía a medida que se deforman y fluyen al doblarse, cortarse, torcerse o apretarse. Suelen estar fabricados en acero debido a su alta homogeneidad y permiten una fácil caracterización mecánica del dispositivo. Su comportamiento se modela con base en curvas de fuerza-desplazamiento y la energía que disipan se cuantifica con base en las propiedades cíclicas de histéresis del dispositivo.

Los dispositivos histeréticos más conocidos son:

- Disipadores por plastificación de metales
- Disipadores metálicos por fricción

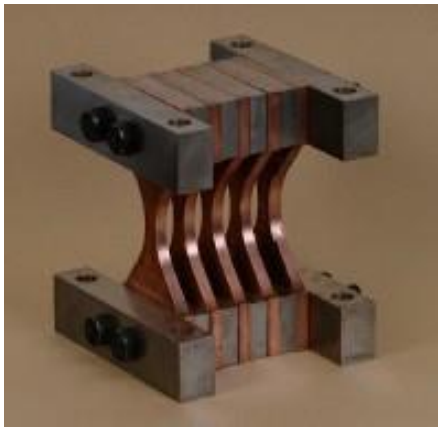
3.3.2.1.1. Disipador por plastificación tipo ADAS.

Estos disipadores convierten la energía sísmica mediante la acción de fluencia del metal contenido en dicho disipador, ya que durante un terremoto el metal que constituye el disipador está sometido a esfuerzos de flexión y corte.

Debido a la geometría del dispositivo, la plastificación se produce de forma uniforme y estable, optimizando el proceso de disipación de energía. Por lo tanto, estos dispositivos deben ubicarse en áreas críticas de las diagonales de la estructura donde se espera que se formen rótulas plásticas durante eventos sísmicos, ver figura 10.

Figura 10

Disipador metálico por plastificación tipo ADAS.



Fuente: Tomada de (http://www.disipaing.com/disipadores-energia/).

3.3.2.1.2. Disipador por plastificación tipo TADAS.

El dispositivo consta de un conjunto de placas de acero triangulares paralelas de espesor constante. La forma triangular de las placas se debe a que están empotradas en un extremo y articuladas en el otro, además esta configuración permite una distribución global de la plastificación, ver figura 11.

Este tipo de unión permite el desplazamiento vertical de manera que las cargas gravitatorias no afectan el comportamiento del dispositivo, por lo que se consigue plasticidad a la flexión y la respuesta inelástica del sistema es altamente predecible.

Figura 11

Disipador metálico por plastificación tipo TADAS.

Fuente: Tomada de (http://www.disipaing.com/disipadores-energia/).

3.3.2.1.3. Disipadores metálicos por fricción.

Un disipador de fricción es un dispositivo basado en dos placas conectadas con una resistencia considerable, y se modela basándose en el desplazamiento relativo de las dos placas conectadas con pernos de alta resistencia, como se observa en la figura 12. Están diseñados para disipar energía mediante la acción de fuerzas que limitan la intensidad de la energía que ingresa al edificio.

Figura 12

Disipador por fricción.

Fuente: Tomada de (https://quaketek.com/es/disipadores-sismicos-disipadores-a-friccion/).

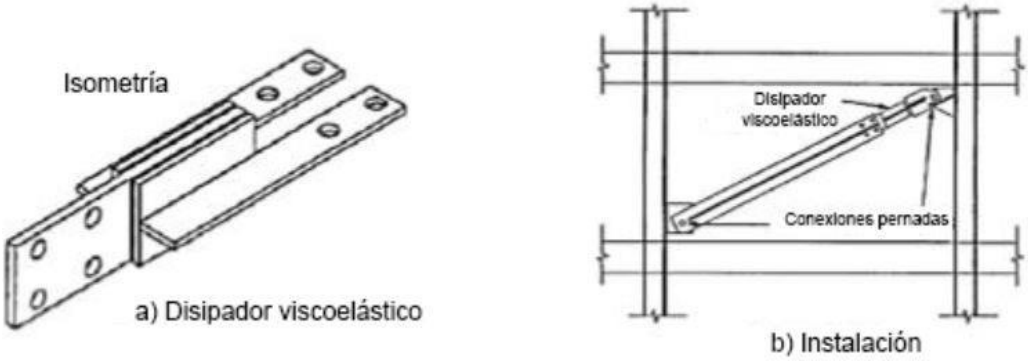
3.3.2.2. Disipadores viscoelásticos.

Su funcionamiento depende de la velocidad y el desplazamiento, disipando la energía generada por el sismo mediante corte deformación del material viscoelástico.

Estos dispositivos pueden estar hechos de polímero o caucho. Consiste en una almohadilla sólida fijada a una placa de acero como se observa en la figura 13. Se instalan en la estructura en forma de V. A medida que un extremo del disipador se mueve con respecto al otro, el material viscoelástico se corta, lo que provoca que la temperatura aumente y se disipe energía al medio ambiente.

Figura 13

Disipador de amortiguamiento viscoelástico.



Fuente: Tomada de (http://www.disipaing.com/disipadores-energia/).

3.3.2.3. Disipadores de amortiguamiento viscoso.

Los dispositivos de fluidos viscosos suelen consistir en un cilindro dentro del cual se mueve un pistón, incrustado en un fluido altamente viscoso, y que disipa energía obligando al fluido a pasar entre sus cámaras internas.

Estos dispositivos generan fuerzas dependientes de la velocidad; la disipación de energía se logra cuando el pistón aplica presión al fluido en su interior; el mismo ciclo de alta velocidad crea fricción entre sus partículas y la cabeza del pistón. Estas fuerzas de fricción hacen que la energía se disipe en forma de calor.

Figura 14

Disipador de amortiguamiento viscoso.

Fuente: Tomada de (https://dev.cdvperu.com/disipadores-sismicos-taylor/).

3.3.3. Configuración de los disipadores sísmicos en la edificación.

Los disipadores sísmicos se pueden instalar en casi cualquier proyecto, ya sea nuevo o existente. Se puede adaptar a elementos de madera, acero u hormigón armado. Estos dispositivos se pueden configurar dentro de las estructuras con las siguientes disposiciones típicas.

- Configuración Diagonal

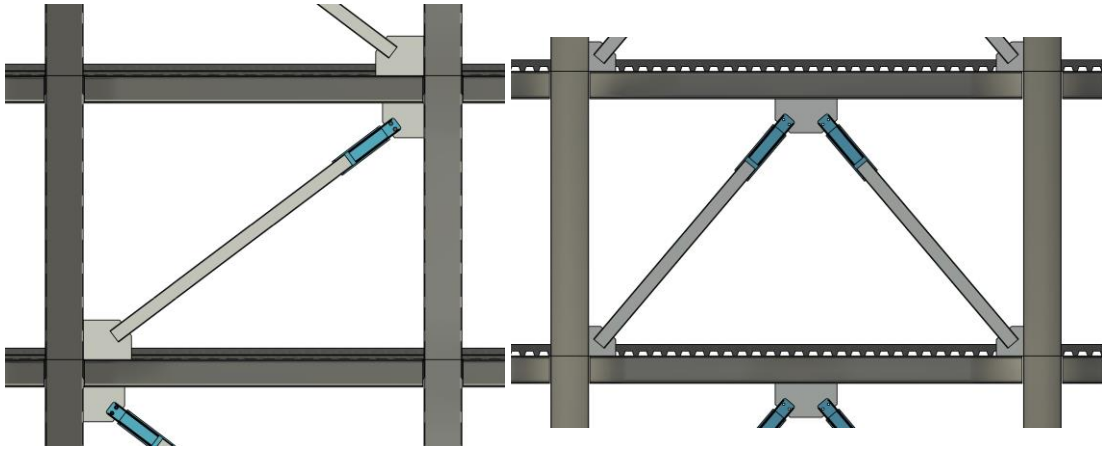
En esta disposición observada en la figura 15a, los frenos sísmicos se orientan en diagonal hacia el interior del pórtico, lo que resulta en la opción la más económica, ya que solo requiere perfiles metálicos para su instalación. Por otro lado, esta disposición es la menos eficiente, ya que solo la componente horizontal participa en la disipación de energía. (Burgos y Prado, 2018)

- Configuración Chevron

Esta configuración, que se observa en la figura 15b, utiliza dos frenos sísmicos que se encuentran en el punto medio de la viga, esta es la opción más costosa porque hay que invertir en más material. Tiene la gran ventaja de que esta configuración permite que un dispositivo opere en tensión y el otro en compresión, anulando así las respectivas componentes de carga axial. (Dunn, 2021)

Figura 15

Configuración de los disipadores sísmicos.



(a) *Diagonal* (b) *Chevron*

Fuente: Elaboración propia

3.4. Diseño sismorresistente de estructuras de acero.

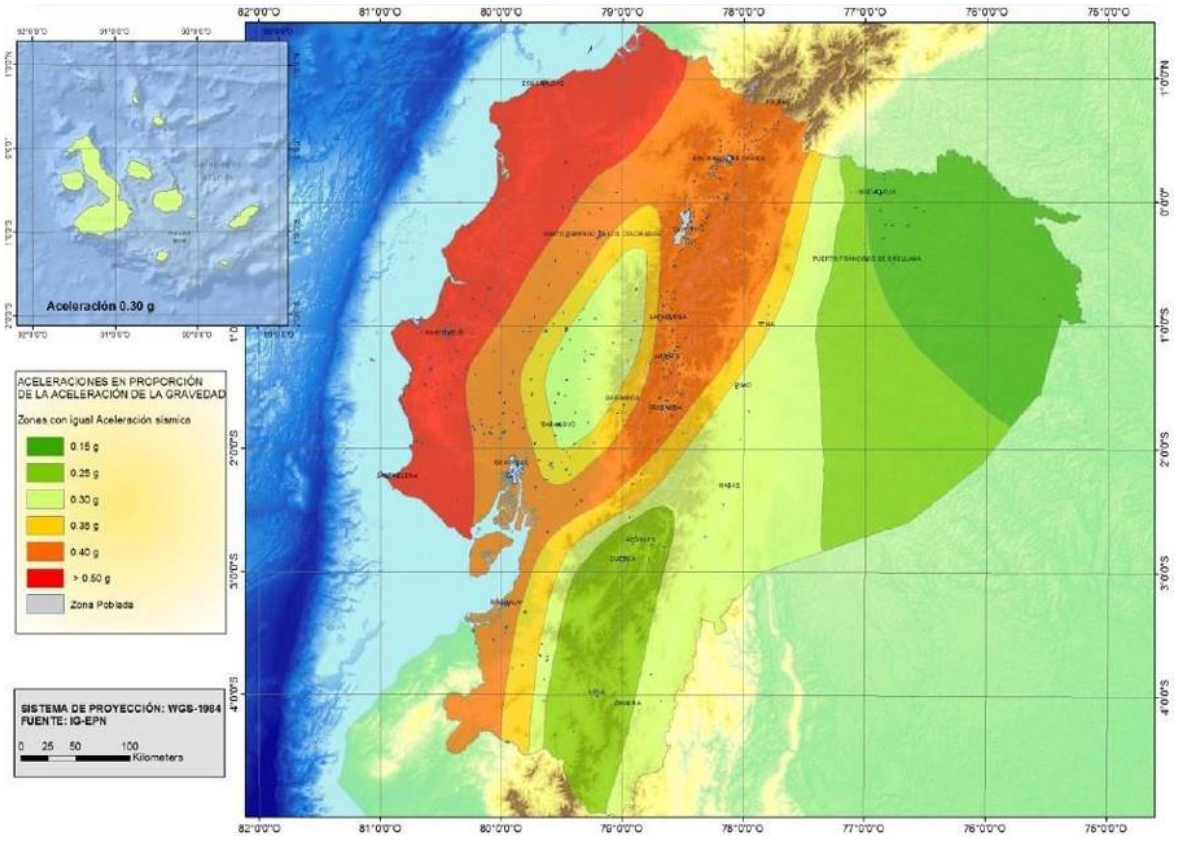
Ecuador es un país propenso a sufrir terremotos, sin embargo, la mayoría de ellos son indetectables para los humanos. La actividad sísmica del Ecuador está relacionada principalmente con la interacción de dos placas tectónicas, la placa oceánica de Nazca y la placa continental sudamericana.

Este proceso, que muestra múltiples fuentes sísmicas en el país, es causado por la colisión y subducción de placas oceánicas hacia placas continentales de unos 8 centímetros por año, generando una acumulación y posterior liberación repentina de energía que desencadena eventos sísmicos.

Con base en los resultados de las fuentes sísmicas existentes y los estudios de peligrosidad sísmica en el país, se estableció un mapa de zonificación sísmica del Ecuador con base en los valores Z, que representan la aceleración máxima esperada en las rocas. Expresados como una fracción de la aceleración debida a la gravedad, sus valores figuran en la normativa NEC 2015.

Figura 16

Zonificación sísmica del Ecuador.



Fuente: (NEC-SE-DS, 2015)

En el Ecuador, la norma NEC ha establecido seis zonas sísmicas, como se muestra en la Tabla 1 y se observa en la figura 16. El peligro sísmico se presenta con una caracterización intermedia, pasando a alta y terminando en muy alta, relacionados directamente con el valor de la zona sísmica que cambian dependiendo de la ubicación en donde se implemente la edificación.

Tabla 1

Valores del factor Z en función de la zona sísmica.

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor del factor Z	0.15	0.25	0.3	0.35	0.4	≥ 0.50
Caracterización del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy alta

Fuente: (NEC-SE-DS, 2015)

3.4.1. Riesgo Sísmico.

A lo largo de su historia, la humanidad ha experimentado los efectos devastadores de los terremotos, que se han convertido en el fenómeno natural más costoso para el ser humano, superando a otros desastres como ciclones, huracanes, inundaciones y erupciones volcánicas.

El riesgo sísmico se define principalmente desde dos aspectos: peligro sísmico y vulnerabilidad. El primer aspecto representa el peligro o amenaza en un lugar debido a fuentes sísmicas que actúan sobre el área considerada. La vulnerabilidad, por otro lado, se puede definir como la susceptibilidad de un edificio a sufrir daños durante un evento sísmico.

No es posible cambiar la amenaza o peligro sísmico de un lugar, sin embargo, el diseño sísmico debe enfocarse en reducir la vulnerabilidad de las edificaciones y con ello reducir el riesgo sísmico.

3.4.2. Filosofía del diseño sismorresistente.

Excepto en casos especiales, las estructuras sísmicas están diseñadas para responder en el rango inelástico para ejercer ductilidad y asegurar la disipación de energía post-elástica en caso de terremotos severos.

El procedimiento tradicional para diseñar estructuras sismorresistentes aplicando fuerzas muy por debajo de las realmente generadas durante un evento sísmico consiste en reducir las fuerzas obtenidas del espectro elástico de diseño por un factor de corrección

de respuesta (R), que tiene en cuenta principalmente la ductilidad del sistema estructural utilizado.

Según la NEC 2015, el diseño estructural se realiza para un sismo de diseño, es decir, un evento sísmico con una probabilidad de exceder el 10 % dentro de 50 años (período de retorno de 475 años). Para la norma ASCE 7-10, en cambio, el diseño tiene en cuenta el mayor terremoto, un evento con una probabilidad superior al 2% en 50 años (con un período de retorno de 2475 años). Ambos conceptos de diseño producirán los mismos resultados, permitiendo la definición de factores de importancia o de seguridad apropiados basados en la categoría de ocupación de la estructura.

El código AISC 341-10, al igual que otros códigos de diseño sísmico, considera tres niveles de desempeño de las estructuras, a saber: pórticos especiales, pórticos intermedios o pórticos ordinarios. Para pórticos especiales se permiten factores de corrección de respuesta (R) más altos (lo que significa menores acciones sísmicas), por lo que requieren de verificación y detalles constructivos más estrictos que los otros dos niveles de desempeño. En cambio, un pórtico regular está diseñado para una mayor acción sísmica y, por tanto, tiene un menor nivel de detalle en sus elementos.

3.4.3. Comportamiento estructural del acero.

El acero es un material de alta resistencia, alta rigidez y ductilidad, lo que le permite soportar la deformación plástica sin reducir su resistencia, por lo que es muy recomendable su uso en construcciones sismorresistentes.

Los aceros utilizados tradicionalmente en el diseño estructural sísmico tienen menor resistencia, pero mayor ductilidad en comparación con los aceros de alta resistencia con ductilidad reducida. Por lo tanto, la norma sísmica AISC 341-10 limita el límite elástico mínimo a 345 MPa (3515 kg/cm^2) para los componentes que se espera que desarrollen un comportamiento inelástico en las estructuras.

3.5. Cargas y combinaciones de cargas.

El diseño estructural debe analizarse utilizando cargas permanentes debidas al peso propio de la estructura, cargas variables, cargas accidentales y sus combinaciones. La estructura debe diseñarse de manera que la resistencia iguale o supere los efectos de las

cargas, por tal motivo serán definidas según la norma ecuatoriana NEC-SE-CG 2015: Cargas no sísmicas. La Tabla 2 indica las combinaciones de carga utilizadas en el análisis del edificio utilizado en esta investigación.

Las cargas accidentales serán definidas por el código ecuatoriano NEC-SE-DS 2015: Peligro sísmico y requisitos de diseño sismo resistente.

Tabla 2

Combinaciones de cargas para el análisis de la edificación.

COMBINACIÓN	CARGAS
ELU1	1.4D
ELU2	1.2D + 1.6L
ELU3	1.2 + L + E
ELU4	1.2D + L - E
ELU5	0.9D + E
ELU6	0.9D - E
ELU7	0.9D + W
ELU8	1.2D + 1.6L + 0.5W
ELS	D + L

Fuente: Elaboración propia - (NEC-SE-CG, 2015).

3.6. Procedimiento de análisis estructural con ARSAP 2022.

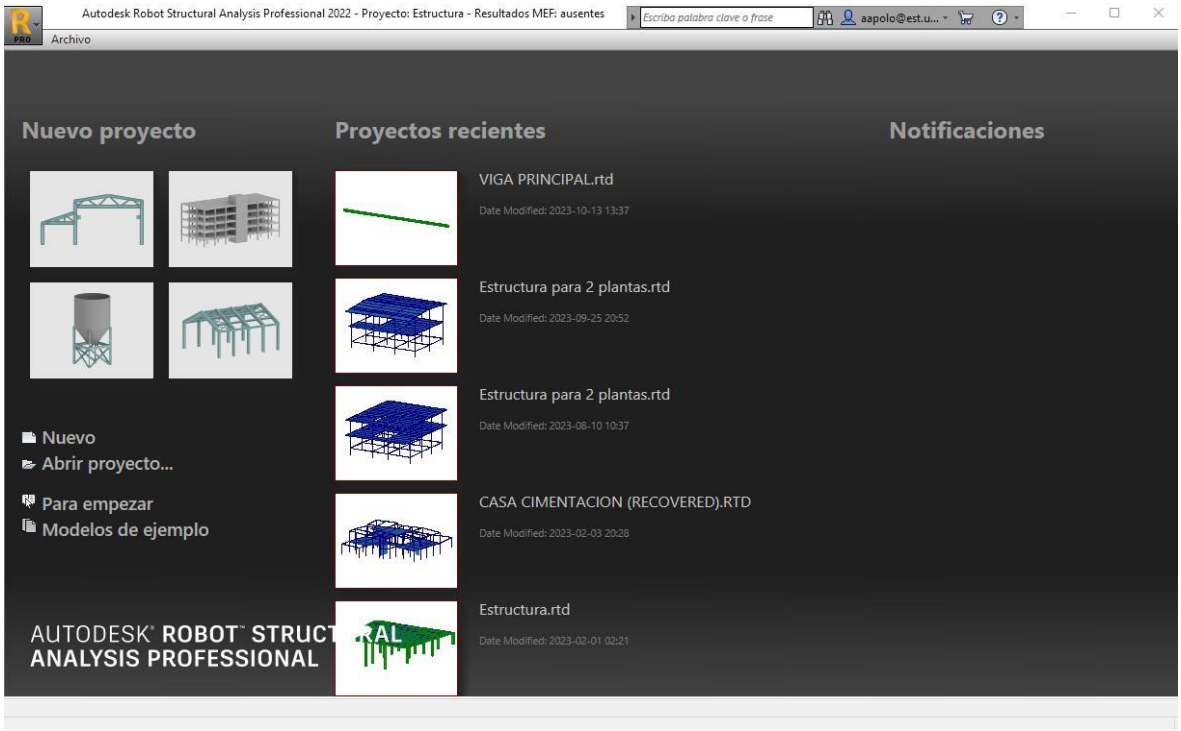
Para el análisis y la simulación estructural del edificio considerado en nuestra investigación se utiliza el software con licencia estudiantil Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2022. Autodesk es la empresa dueña de este programa y la Universidad Politécnica Salesiana cuenta con las licencias educativas, que nos faculta para poder utilizar este software en nuestra investigación.

Autodesk Robot Structural Analysis Professional (en adelante llamado ARSAP, o

simplemente ROBOT) es un programa gráfico integrado que se usa para modelación, análisis y diseño de varios tipos de estructuras. El programa permite al usuario crear estructuras, realizar cálculos estáticos y dinámicos y luego resultados de la validación. Además, es posible determinar las dimensiones de los elementos que componen la estructura según diferentes normativas y crear la documentación correspondiente. (Villarroel, 2016)

Figura 17

Interfaz de ARSAP 2022.

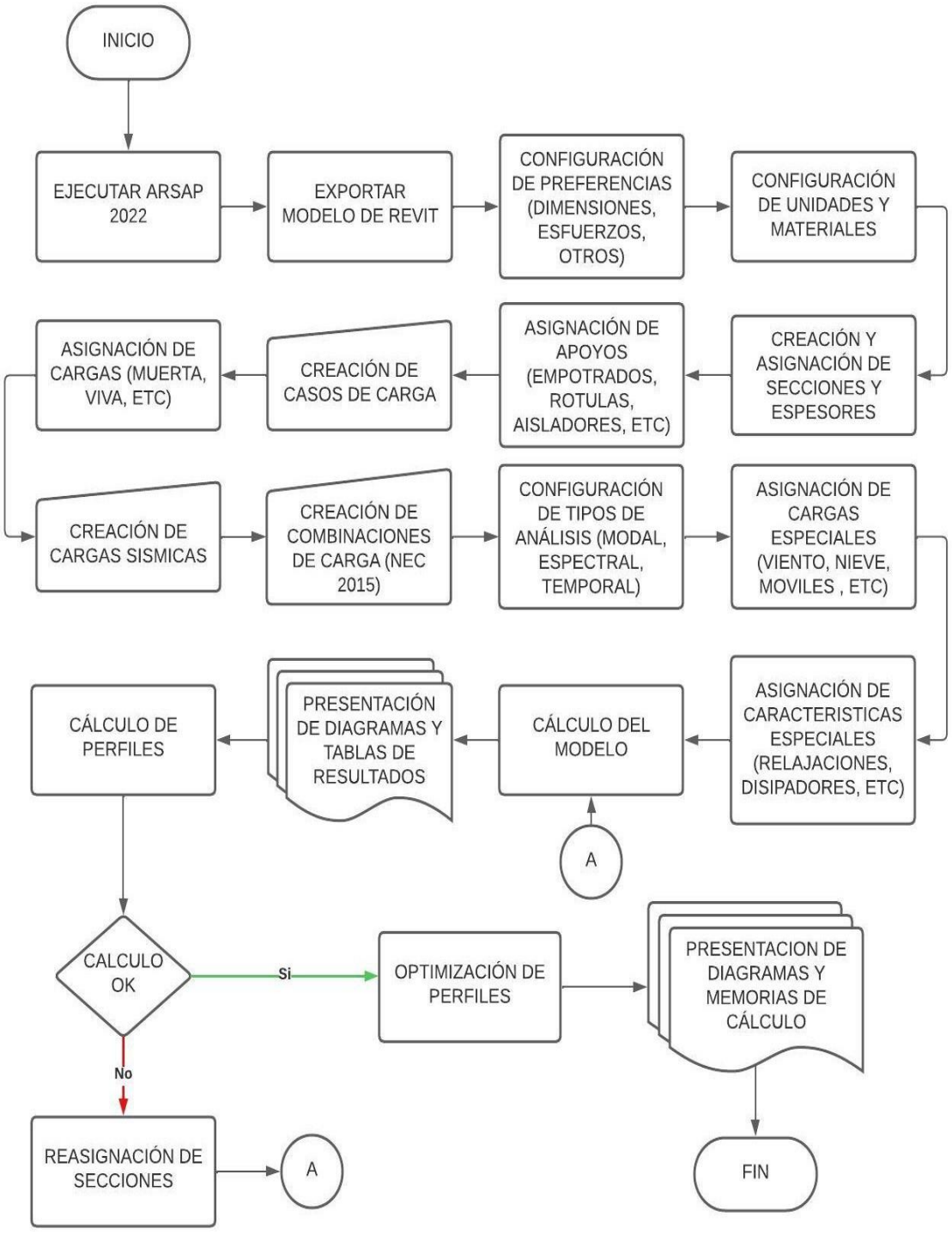


Fuente: ARSAP 2022

Además de la interoperabilidad con Autodesk Revit Structure, ARSAP proporciona un flujo de trabajo altamente flexible para ampliar el modelado de información de construcción (BIM), una tecnología de modelado de información aceptada como estándar global. En la figura 18 observamos el flujo de trabajo empleado para realizar el análisis estructural del edificio en ARSAP 2022.

Figura 18

Flujo de trabajo con ARSAP 2022.



Fuente: Elaboración propia

4. Metodología.

4.1. Establecer los Parámetros iniciales de aisladores y disipadores sísmicos en un edificio de 5 plantas para determinar el desempeño de los mismos.

En esta sección definimos todos los parámetros técnicos, geométricos y normativos necesarios para poder realizar el diseño y análisis del desempeño de los dispositivos aisladores y disipadores sísmicos en el edificio considerado en el estudio.

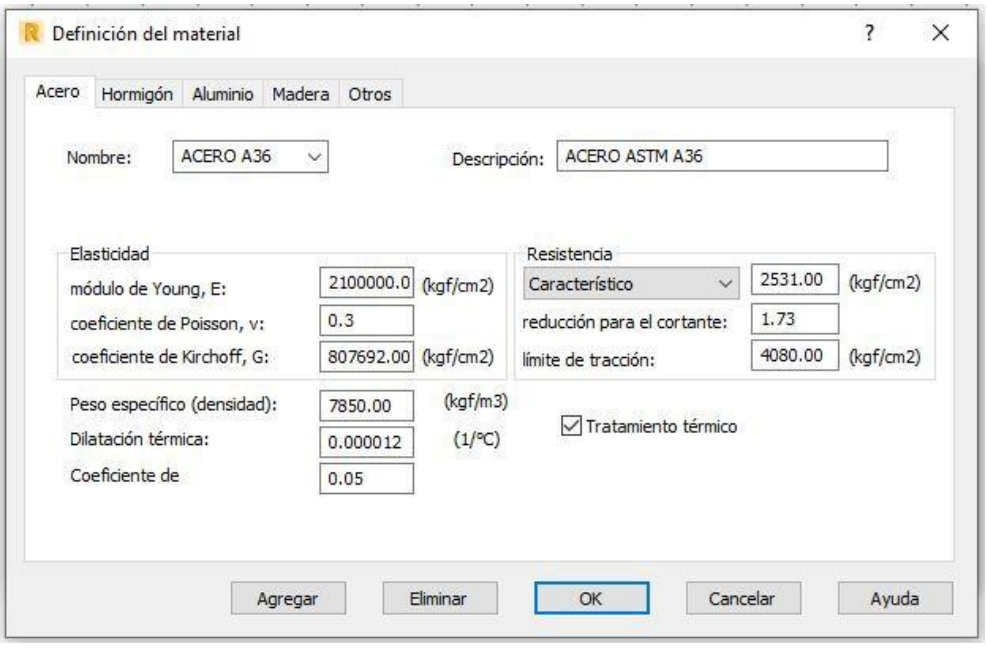
4.1.1. Materiales utilizados para el análisis.

- **ACERO**

Los elementos estructurales que conforman la edificación, como vigas y columnas, estarán fabricados en acero estructural ASTM A36 con un límite elástico de 2531 kg/cm^2. Las características principales del acero A36 las podemos observar en la figura 19.

Figura 19

Propiedades del acero estructural ASTM A36.



Fuente: ARSAP 2022

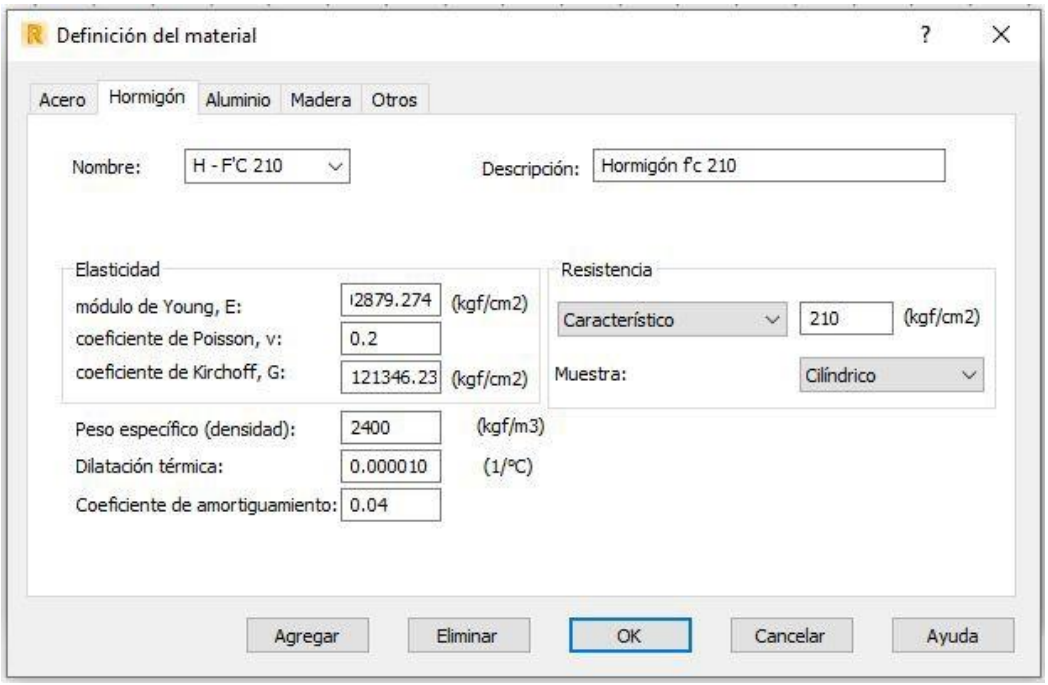
- **HORMIGÓN**

El hormigón se utiliza únicamente en el sistema de losas, el cual consta de paneles o placas colaborantes (steel deck) y las propiedades de compresión del concreto son f´c=210 kg/cm^2. El módulo de elasticidad del hormigón se calcula con la expresión mostrada en la ecuación 1, valor con el que se trata de ajustar a la realidad actual del Ecuador. En la figura 20 se observa sus propiedades finales establecidas para el análisis.

$$Ec = 14000 \cdot \sqrt{f'c} \tag{1}$$

Figura 20

Propiedades del hormigón f´c=210 kg/cm^2.



Fuente: ARSAP 2022

4.1.2. Cargas permanentes, variables y accidentales.

Para la definición de las cargas utilizadas en la edificación se utilizará la sección 2.1 de la norma NEC-SE-CG 2015.

- **CARGAS PERMANENTES**

En el código NEC-SE-CG apéndice 4.1, se establecen valores referenciales para las cargas muertas utilizadas en una edificación, dependiendo de los materiales empleados en la construcción de la misma. En ningún caso de análisis estructural, los valores de sobrecargas serán menores a los valores indicados en la norma NEC 2015.

En la tabla 3 se observa los valores de carga muerta considerados para nuestra edificación.

Tabla 3

Desglose de cargas permanentes utilizadas en el análisis.

DESCRIPCIÓN	CARGA [Kg/m^2]
CARGA MUERTA (D)	
Peso de la placa steel deck 0.65 mm	6.5
Peso del hormigón	173.14
Acabados (enlucidos, masillado, etc)	75.00
Mamposteria	150.00
Intalaciones (cielos rasos, ductos, cañerias, etc)	40.00
TOTAL [Kg/m2]	**444.64**

Fuente: Elaboración propia.

- **CARGAS VARIABLES**

En el código NEC-SE-CG apéndice 4.2, se establecen valores referenciales para las cargas vivas utilizadas en una edificación, dependiendo de su ocupación o uso. En ningún caso de análisis estructural, los valores de sobrecargas serán menores a los valores indicados en la norma NEC 2015.

En la tabla 4 se observa los valores de carga variable considerados para el análisis de la edificación.

Tabla 4

Desglose de cargas vivas utilizadas en el análisis.

DESCRIPCIÓN	CARGA [Kg/m^2]
CARGA VIVA (L)	
Residencias Unifamiliares y Multifamiliares	200.00
TOTAL [Kg/m2]	**200.00**

Fuente: Elaboración propia.

Las cargas variables por viento se asignarán directamente en el programa de cálculo ARSAP 2022, para lo cual se necesita simplemente la velocidad instantánea máxima del viento que la encontramos en el código NEC-SE-CG sección 3.2.4, cuyo valor se observa en la tabla 5.

Tabla 5

Velocidad instantánea máxima del viento.

DESCRIPCIÓN	CARGA [m/s]
CARGA POR VIENTO (W)	
Velocidad instantanea maxima del viento	21.00
TOTAL [m/s]	**21.00**

Fuente: Elaboración propia.

- **CARGAS ACCIDENTALES**

Las cargas accidentales o cargas sísmicas se detallan en el código NEC-SE-DS donde se establecen los peligros sísmicos y los requisitos de diseño sismo resistente, que se deben tomar en cuenta para diseñar una edificación.

Para obtener el espectro de diseño, según la normativa ecuatoriana, se determinó que la estructura se encuentra ubicada en la ciudad de Cuenca (Z = 0.25) y se asumió que se implementaría en suelo tipo D.

Los parámetros para el análisis estático y dinámico de nuestro modelo se resumen en la tabla 6 y se obtuvieron del código NEC-SE-DS sección 3.1. Se establece un factor de importancia igual a 1 y considerando que se trata de estructuras ordinarias que no presentan irregularidad en planta ni en elevación, por lo que sus respectivos factores son también igual a 1. Se determina también el coeficiente sísmico (C_s) que debe ingresarse en el programa ARSAP 2022 para realizar el análisis estático de la edificación.

Tabla 6

Parámetros para definir la carga estática y dinámica de la estructura.

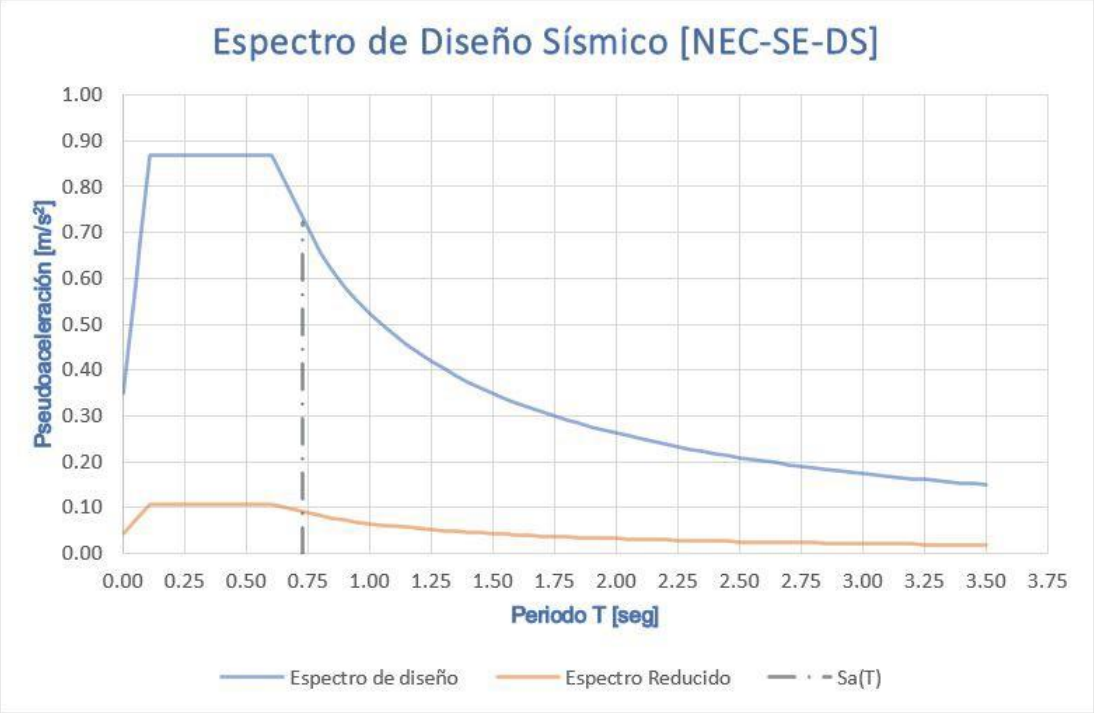
ABREV.	VALOR	DESCRIPCIÓN
z	0.25	Cuenca - Zona II - Peligro alto
Suelo	Tipo D	50 > N ≥15
Fa	1.4	Factor de sitio
Fd	1.45	Factor de sitio
Fs	1.06	Factor de sitio
r	1	Factor r que depende de la ubicacion
η	2.48	Razon η que varia segun la region
zFa	0.35	Aceleracion de superficie de terreno
C_t	0.072	Coeficiente que depende del tipo de edificio
α	0.8	Coeficiente que depende del tipo de edificio
h	18	Altura de la edificación
T	0.727	Período de vibración
Sa	0.721	Aceleración espectral
I	1	Coeficiente de importancia
R	8	Factor de reduccion sismica
$Ø_p$	1	Irregularidad en planta tipo 1
$Ø_e$	1	Irregularidad en elevación tipo 1
T_o	0.110	Periodo inicial de meseta
T_c	0.604	Periodo final de meseta
T_L	3.480	Periodo limite de vibración
Cs	0.09013	Coeficiente sísmico

Fuente: Elaboración propia - NEC-SE-DS 2015.

Finalmente, con todos los datos de la tabla 6 se define el espectro de diseño elástico según la normativa NEC-SE-DS 2015 para un suelo tipo D (ver figura 21).

Figura 21

Espectro elástico para suelo tipo D según NEC 2015.



Fuente: Elaboración propia

4.1.3. Sistema estructural utilizado en la edificación.

Los pórticos se modelarán con un factor de corrección de respuesta (R) de 8 tanto para NEC 2015 como para ASCE 7-16. Según el Código ASCE 7-16 en la Tabla 12.2-1, los pórticos especiales de momento no tienen restricciones de altura para ninguna categoría de diseño sísmico, como se muestra en la tabla 7.

4.1.4. Condiciones de apoyo de la estructura.

Las condiciones de apoyo del modelo planteado para el análisis, se modelará como empotramiento, como se observa en la figura 22.

Tabla 7

Coeficientes de diseño y limitaciones para sistemas resistentes sísmicos.

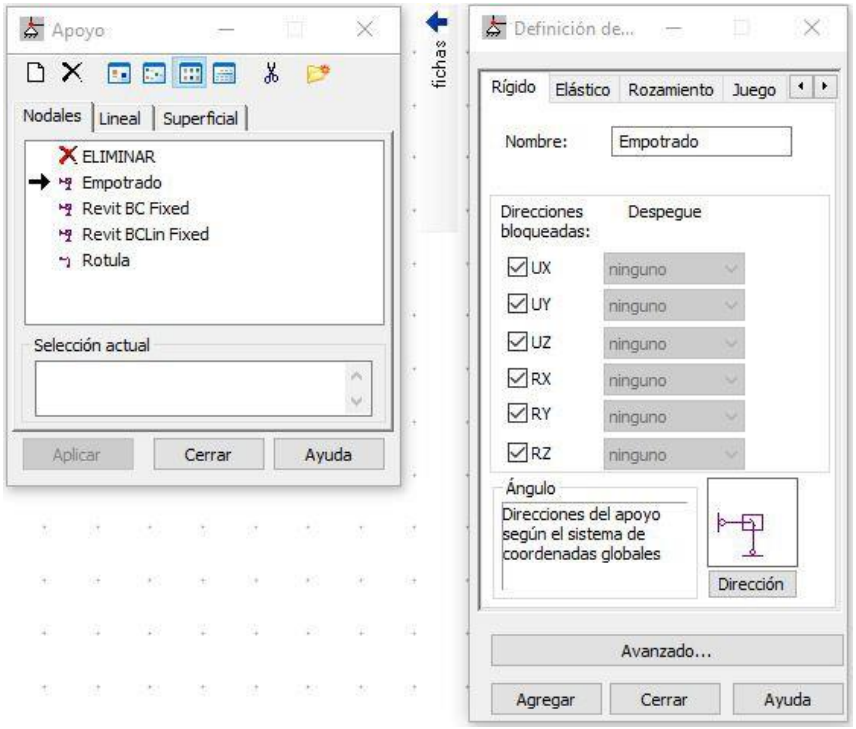
Table 12.2-1 Design Coefficients and Factors for Seismic Force-Resisting Systems

Seismic Force-Resisting System	ASCE 7 Section Where Detailing Requirements Are Specified	Response Modification Coefficient, R^a	Overstrength Factor, $\Omega_0{}^b$	Deflection Amplification Factor, $C_d{}^c$	Structural System Limitations Including Structural Height, h_n (ft) Limits[d] — Seismic Design Category B	C	D[e]	E[e]	F[f]
C. MOMENT-RESISTING FRAME SYSTEMS									
1. Steel special moment frames	14.1 and 12.2.5.5	8	3	5½	NL	NL	NL	NL	NL
2. Steel special truss moment frames	14.1	7	3	5½	NL	NL	160	100	NP
3. Steel intermediate moment frames	12.2.5.7 and 14.1	4½	3	4	NL	NL	35[k]	NP[k]	NP[k]
4. Steel ordinary moment frames	12.2.5.6 and 14.1	3½	3	3	NL	NL	NP[j]	NP[j]	NP[j]
5. Special reinforced concrete moment frames[m]	12.2.5.5 and 14.2	8	3	5½	NL	NL	NL	NL	NL
6. Intermediate reinforced concrete moment frames	14.2	5	3	4½	NL	NL	NP	NP	NP
7. Ordinary reinforced concrete moment frames	14.2	3	3	2½	NL	NP	NP	NP	NP
8. Steel and concrete composite special moment frames	12.2.5.5 and 14.3	8	3	5½	NL	NL	NL	NL	NL
9. Steel and concrete composite intermediate moment frames	14.3	5	3	4½	NL	NL	NP	NP	NP
10. Steel and concrete composite partially restrained moment frames	14.3	6	3	5½	160	160	100	NP	NP
11. Steel and concrete composite ordinary moment frames	14.3	3	3	2½	NL	NP	NP	NP	NP
12. Cold-formed steel—special bolted moment frame[n]	14.1	3½	3[n]	3½	35	35	35	35	35

Fuente: (ASCE-7, 2016).

Figura 22

Condiciones de apoyo de la estructura.



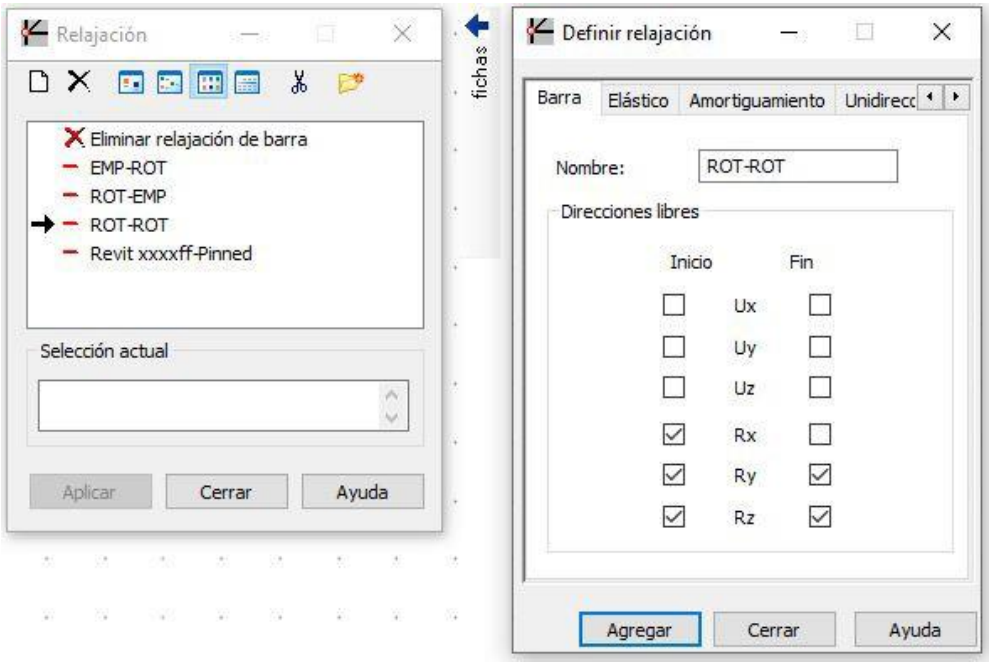
Fuente: ARSAP 2022

4.1.5. Liberación de momentos en vigas secundarias.

Las vigas secundarias son elementos estructurales diseñados para soportar cargas verticales únicamente, por lo que el modelado de estos elementos debe corresponder a las operaciones descritas. Las vigas secundarias se pueden modelar como soportes simples liberando momentos en sus extremos aplicando relajaciones, como se observa en la figura 23.

Figura 23

Liberación de momentos en extremos de vigas secundarias.



Fuente: ARSAP 2022

4.1.6. Diseño Arquitectónico de la edificación.

Para el análisis correspondiente, se utilizarán los planos arquitectónicos de la edificación conformada por 5 niveles con azotea y un nivel de sótano, ver Anexo 1. Con propósito de la investigación se establece que el edificio estará ubicado en la ciudad de Cuenca, será regular tanto en planta como en elevación, con un área total de 300 m^2 por piso y una altura de entrepiso de 3m.

Figura 24

Modelo arquitectónico de la edificación en Autodesk Revit 2022.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 8 se describen los datos y características principales consideradas para el análisis estructural de la edificación.

En la Figura 25 se muestra la distribución en planta de la edificación propuesta, la cual se replica en todos los niveles que son el caso de estudio de esta investigación.

En la Figura 26 se observa la vista en elevación de la edificación propuesta, tanto el sótano como los niveles tienen una altura de entrepiso de 3m.

Tabla 8

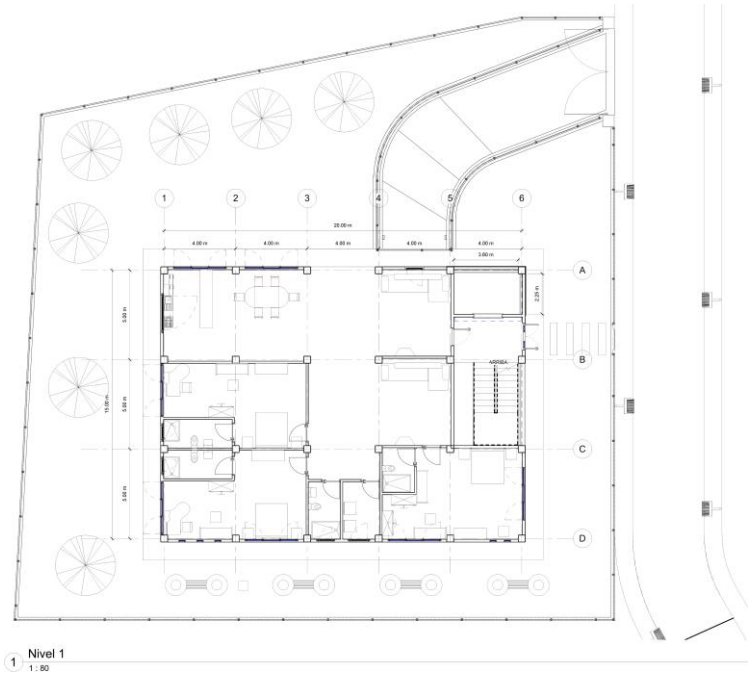
Características y datos de la edificación para el análisis estructural.

DESCRIPCIÓN	VALOR	INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA
Uso de la edificacion	Residencial	Departamentos
Numero de Pisos	5	Mas sotano y asotea
Altura entre pisos	3 m	Sin considerar acabados
Tipo de estructura	Metalica	Acero ASTM A-36
Zona sismica	II	Zona sismica de peligrosidad alta
Factor de importancia	1	Estructura de vivienda multifamiliar
Tipo de suelo	D	Perfil de suelo Rigido

Fuente: Elaboración propia.

Figura 25

Plano arquitectónico de planta.



Fuente: Elaboración propia

Figura 26

Elevación de la edificación.

Fuente: Elaboración propia

4.1.7. Predimensionamiento de secciones.

Las predimensiones de los elementos estructurales deben tener en cuenta la seguridad y el coste de la edificación. En términos de seguridad, la estructura no solo debe soportar las tensiones aplicadas, sino que las deformaciones y vibraciones no deben ser excesivas. Este criterio siempre debe prevalecer sobre los económicos, ya que se debe reducir los costes de construcción sin reducir la resistencia requerida.

Para las construcciones de acero, es importante elegir el material más ligero con las propiedades necesarias para diferentes tensiones, pero no es necesariamente el más económico. Además, es importante que se considere el equipo o maquinaria disponible

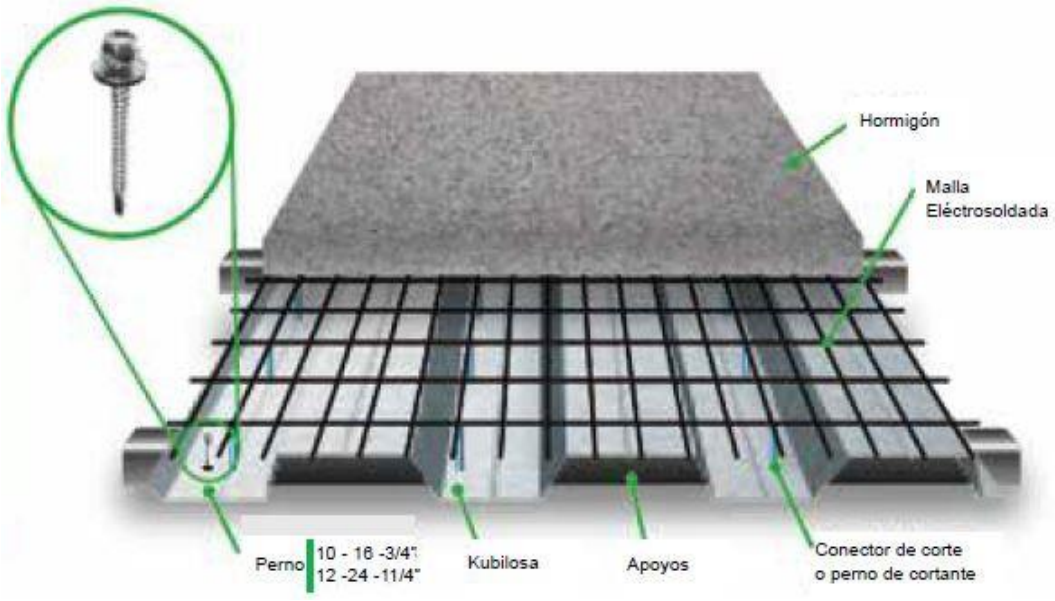
para que la fabricación y montaje de la estructura sea factible.

4.1.7.1. Predimensionamiento de losas.

La función de la losa es recibir y distribuir la carga a las vigas primarias, vigas secundarias y columnas. En este caso, las losas estarán compuestos por paneles colaborativos (steel deck, ver figura 27), cuyo predimensionado se realiza básicamente en función de la separación entre los elementos donde se colocarán los paneles.

Figura 27

Detalle de losa con sistema de placa colaborante (steel deck).



Fuente: Kubiec

La losa de piso tipo deck se modelará con un espesor de placa de 0.65 mm, y un espesor de concreto de 5.00 cm en la parte superior, dando como resultado una losa de piso con un espesor total igual a 10 cm. Las dimensiones y propiedades de los paneles se determinan según el catálogo de paneles tipo deck de Kubiec.

En la tabla 9, se observa las propiedades y capacidades de carga de las planchas tipo deck del catálogo de Kubiec.

Tabla 9

Características técnicas de placa colaborante Kubilosa.

VOLÚMEN DE HORMIGÓN /M2

	Espesor de losa (cm)	Hormigón (m3/m2)
Hormigón sobre la cresta. Espesor de la losa.	5	0.06950
	6	0.07954
	7	0.08954
	8	0.09954
	10	0.11954
	12	0.13954

Tabla de ayuda para diseño KUBILOSA

CARGA SOBREIMPUESTA (KG/M²)												MÁXIMA LUZ SIN APUNTALAR SEGÚN CONDICIONES DE APOYO					
ESPESOR KUBILOSA	ESPESOR LOSA	SEPARACIÓN ENTRE APOYOS (m)										ESPESOR KUBILOSA	CONDICIÓN DE APOYO	ESPESOR DE LA LOSA (cm)			
(mm)	(cm)	1,60	1,80	2,00	2,20	2,40	2,60	2,80	3,00	3,20	3,40	(mm)		5	6	7	8
0,65	5	2.200	1.727	1.365	1.098	894	736	610	509	426	357	0,65	una luz	1,59	1,52	1,47	1,42
	6	2.200	1.979	1.565	1.258	1.025	844	700	584	489	410		dos luces	2,06	1,98	1,90	1,84
	7	2.200	2.229	1.763	1.418	1.156	951	789	659	552	463		tres luces	1,91	1,83	1,76	1,70
	8	2.200	2.478	1.960	1.557	1.285	1.058	878	733	614	516						
0,76	5	2.200	2.046	1.624	1.311	1.074	889	742	624	527	446	0,76	una luz	1,67	1,60	1,54	1,49
	6	2.200	2.345	1.861	1.503	1.231	1.019	851	716	605	513		dos luces	2,17	2,08	2.01	1,94
	7	2.200	2.641	2.097	1.694	1.388	1.149	960	807	682	579		tres luces	2,01	1,92	1,85	1,79
	8	2.200	2.936	2.331	1.884	1.543	1.278	1.068	898	759	644						
0,90	5	2.200	2.450	1.951	1.582	1.301	1.082	909	744	582	456	0,90	una luz	1,77	1,70	1,63	1,58
	6	2.200	2.808	2.236	1.813	1.492	1.241	1.043	883	751	643		dos luces	2,30	2,20	2.12	2,05
	7	2.200	2.200	2.519	2.043	1.681	1.399	1.175	995	847	725		tres luces	2,12	2,03	1,96	1,89
	8	2.200	2.200	2.801	2.272	1.869	1.556	1.307	1.107	943	807						

Fuente: Kubiec.

4.1.7.2. Predimensionamiento de vigas secundarias.

Para propósitos de prediseño, se desprecia el peso propio de la viga secundaria, y se trabaja con la siguiente combinación de carga LRFD:

$$U = 1.2D + 1.6L$$
$$U = 1.2 \cdot (444.64\frac{Kg}{m^2}) + 1.6 \cdot (200\frac{Kg}{m^2}) \quad (2)$$
$$U = 853.56\frac{Kg}{m^2}$$

La conexión entre la viga secundaria y la viga principal se considera flexible o simplemente apoyada, de modo que el momento flector positivo máximo se determina considerando la viga secundaria simplemente apoyada.

$$Mu =$$

$$Mu =$$

$$Mu =$$

De la misma manera, la fuerza de reacción en los apoyos, es la carga puntual transferida de la viga secundaria a la viga principal.

$$R_1 = \frac{wL}{2}$$
$$R_1 = \frac{853.56\frac{Kg}{m^2} \cdot 1.25m \cdot 4m}{2} \quad (4)$$
$$R_1 = 2133.92Kg$$

Finalmente, mediante la siguiente expresión se calcula el valor del módulo plástico requerido Zx_{req}.

$$Zx_{req} = \frac{Mu}{\varnothing_b \cdot fy}$$
$$Zx_{req} = \frac{213392Kg \cdot cm}{0.9 \cdot 2531\frac{Kg}{m^2}} \quad (5)$$
$$Zx_{req} = 93.68cm^3$$

El siguiente paso es seleccionar los perfiles comerciales con un módulo de sección plástica similar o superior al módulo de sección requerido de las tablas o catálogos que disponemos en nuestro medio. Sin embargo, como alternativa, la normativa permite proponer vigas armadas fabricadas con flejes de acero, con dimensiones similares a las de los perfiles comerciales o a su vez dimensiones suficientes para cumplir con las solicitaciones a las que están sometidas.

Para definir una sección de viga secundaria que cumpla con la resistencia requerida y además sea el material más liviano, se utiliza una hoja de cálculo en Excel con las características y comprobaciones que se muestran en la tabla 10.

Tabla 10

Características de viga secundaria predimensionada.

CALCULO DE VIGAS SECUNDARIAS		
Lv	4.00 [m]	Longitud de viga
Nv	3.00 [u]	Numero de vigas
At	1.25 [m]	Ancho tributario (1.2 - 1.6 optimo)
OK		Comprobacion de costo
W	**4131.29** [Kg] 4.13 [t]	Carga puntual sobre viga
Wr	**1032.82** [Kg/m] 1.03 [t/m]	Carga distribuida sobre viga
Mu	**2065.64** [Kg-m] 2.07 [t-m]	Momento o demanda de la viga
DATOS DE VIGA		
Ac	36.00 [Ksi]	Material grado
bf	11.00 [cm]	Ancho de patin
tf	0.60 [cm]	Espesor de patin
COMPACTO		Patin compacto o no
h	20.00 [cm]	Altura de viga
tw	0.30 [cm]	Espesor de alma
SISMICAMENTE COMPACTO		Alma compacto o no
PROPIEDADES MECANICAS DE SECCION		
A	18.84 [cm2]	Area de seccion
Pv	14.79 [Kg/m]	Peso de la viga
Ix	**1408.50** [cm4]	Inercia en X
Iy	133.14 [cm4]	Inercia en Y
Sx	**140.85** [cm3]	Modulo de seccion elastico en x
Sy	24.21 [cm3]	Modulo de seccion elastico en y
Zx	**154.55** [cm3]	Modulo de seccion plastico en x
Zy	36.72 [cm3]	Modulo de seccion plastico en y
rx	8.65 [cm]	Radio de giro en x
ry	2.66 [cm]	Radio de giro en y
Lp	134.80 [cm]	Longitud maxima de apoyos Laterales
Ap	0.00 [u]	Numero de apoyos en viga
Lb	400.00 [cm]	Longitud de apoyo Lateral de viga real
Mr	229303.98 [Kg-cm] **2.29** [t-m]	Momento resistente
Mp	**351887.22** [Kg-cm] 3.52 [t-m]	Momento plastificante
D/C	**0.90**	Demanda - capacidad (0.975 - 1)

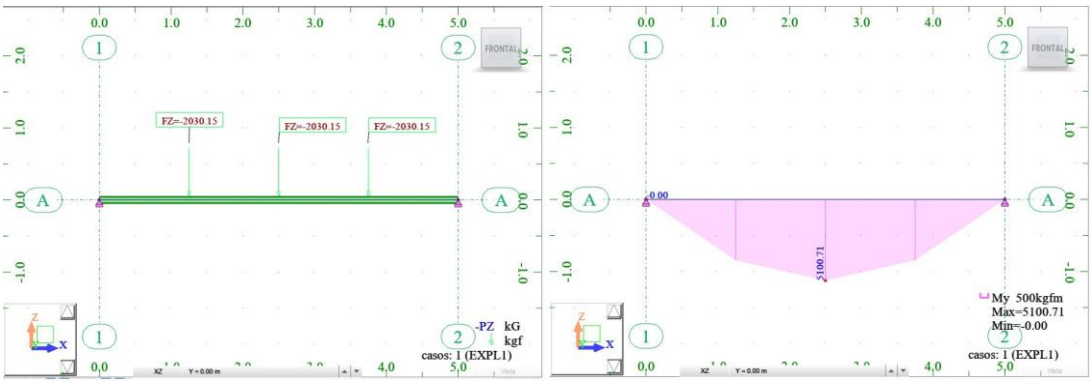
Fuente: Elaboración propia.

4.1.7.3. Predimensionamiento de vigas principales.

La viga secundaria simplemente se apoya en la viga primaria, es decir, solo transfiere cargas puntuales, cuyo valor corresponde al R_1 previamente calculado. Para determinar el momento máximo se suponen dos condiciones de apoyo: una viga está simplemente apoyada (ver figura 28) y la otra perfectamente empotrada en ambos extremos (ver figura 29).

Figura 28

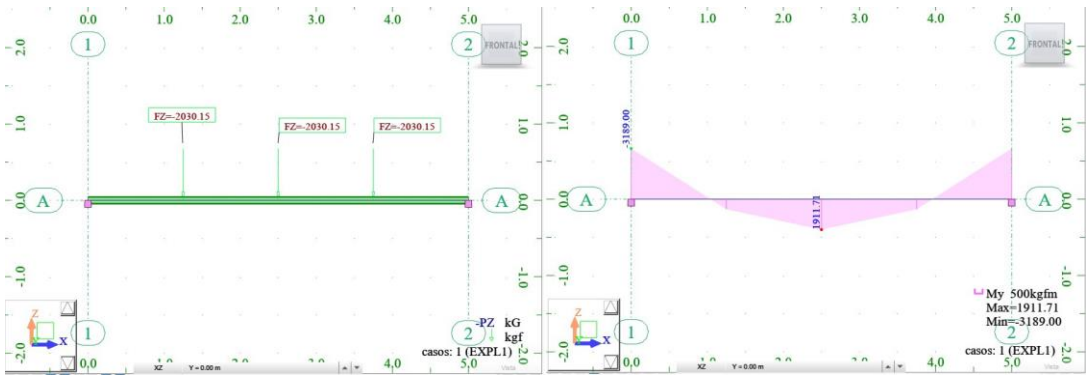
Esquema de viga simplemente apoyada y diagrama de momentos.



Fuente: ARSAP 2022

Figura 29

Esquema de viga empotrada y diagrama de momentos.



Fuente: ARSAP 2022

Los momentos máximos se presentan en vigas simplemente apoyadas, sin embargo, debido al tipo de conexiones momentorresistentes que se establecen en estos modelos, es razonable considerar momentos menores, ya que la situación real será intermedia entre los dos casos presentados.

Para fines de prediseño, se utilizará un momento de 5100,71$Kg \cdot m$, ya que estas piezas serán verificadas y optimizadas una vez analizadas en el programa Autodesk Robot 2022. Calculado el momento y aplicando la Ecuación 5, se obtiene:

$$Zx_{req} = \frac{Mu}{\varnothing_b \cdot fy}$$

$$Zx_{req} = \frac{510071Kg \cdot cm}{0.9 \cdot 2531\frac{Kg}{m^2}}$$

$$Zx_{req} = 223.92cm^3$$

Las secciones utilizadas en este análisis tienen en cuenta los efectos de los terremotos, por lo que se eligieron secciones más grandes para los pisos inferiores y secciones más pequeñas para los pisos superiores. Otro aspecto a considerar es que, al diseñar pórticos resistentes a momentos para edificios altos, el diseño está determinado por la condición de uso (deriva) y no por la resistencia de los miembros. Las dos últimas razones hacen necesario seleccionar secciones mucho mayores que los establecidos en el prediseño.

En la Tabla 11 se muestra la sección final utilizada en el edificio considerando los aspectos anteriores. En la misma tabla se indican las propiedades geométricas relevantes de la sección, su módulo plástico y la longitud máxima no arriostrada requerida para pórticos especiales resistentes a momentos.

4.1.7.4. Predimensionamiento de columnas.

Las columnas son elementos verticales cuya función estructural es recibir cargas de las vigas principales y transferirlas a la cimentación.

Para propósitos de prediseño, se considera que las columnas soportan cargas concéntricas y operan puramente en compresión. Si tras el análisis mediante el procedimiento en el software Autodesk Robot 2022 resultan insatisfactorios, será necesario revisarlos.

Tabla 11

Características de viga principal predimensionada.

CALCULO DE VIGA TRABE O PRINCIPAL		
Lv	5.00 [m]	Longitud de viga principal
Ncp	3.00 [m]	Numero de cargas puntuales
Tipo	Central	Tipo de viga
Pi	4.13 [t] 4131.29 [Kg]	Carga individual
P-I	1.00	Cargas pares o impares
Mart	10.33 [t-m]	Momento para conexión articulada
Memp	6.46 [t-m]	Momento para conexión empotrada
Tipo	EMPOTRADO	Tipo de conexión
Mu	**6455.14** [Kg-m] 6.46 [t-m]	Momento o demanda de la viga
OK		Comprobacion de apoyo lateral
DATOS DE VIGA PRINCIPAL		
Ac	36.00 [Ksi]	Material grado
Fy	2530 [Kg/cm2]	Fluencia del acero
bf	13.00 [cm]	Ancho de patin
tf	0.80 [cm]	Espesor de patin
SISMICAMENTE COMPACTO		Patin compacto o no
h	29.00 [cm]	Altura de viga
tw	0.50 [cm]	Espesor de alma
SISMICAMENTE COMPACTO		Alma compacto o no
PROPIEDADES MECANICAS DE SECCION		
A	34.50 [cm2]	Area de seccion
Pv	27.08 [Kg/m]	Peso de la viga
Ix	**4993.48** [cm4]	Inercia en X
Iy	293.22 [cm4]	Inercia en Y
Sx	**344.38** [cm3]	Modulo de seccion elastico en x
Sy	45.11 [cm3]	Modulo de seccion elastico en y
Zx	**387.13** [cm3]	Modulo de seccion plastico en x
Zy	69.31 [cm3]	Modulo de seccion plastico en y
rx	12.03 [cm]	Radio de giro en x
ry	2.92 [cm]	Radio de giro en y
Lp	147.83 [cm]	Longitud maxima de apoyos Laterales
Mr	**881437.10** [Kg-cm] 8.81 [t-m]	Momento resistente
D/C	**0.73**	Demanda - capacidad (0.75) 0.25 sismo

Fuente: Elaboración propia.

Para las columnas del modelo propuesto se eligieron secciones cuadradas huecas. La Tabla 12 muestra la sección de columna final utilizada en el modelo. Esta sección será más grande que la requerida en él prediseño por dos razones principales: primero el prediseño no tomó en cuenta el efecto de la flexión sobre las columnas, y por último se reconoció que, al aumentar el espectro sísmico en la estructura, el diseño resulta ser más grande que el requerido en el prediseño.

Tabla 12

Características de sección para columnas.

CALCULOS DE COLUMNAS		
At	20.00 [m2]	Area tributaria de columna
Pu	112064.28 [Kg] **112.06** [t]	Carga ultima sobre columna
Pr	**323159.49** [Kg-cm] **323.16** [t-m]	Carga resistente
D/C	**0.35**	Demanda - capacidad
La relacion D/C tiene que ser como max 0.60 (60%) para lograr columna fuerte viga debil		
DATOS DE COLUMNA		
Ac	36.00 [Ksi]	Material de columna
Fy	4071 [Kg/cm2]	Fluencia del acero
E	2730440.40 [Kg/cm2]	Modulo de elasticidad del acero
b	30.00 [cm]	Ancho de columna
COMPACTA		Ancho de columna compacto no
h	30.00 [cm]	Alto de columna
COMPACTA		Alto de columna compacta o no
e	0.80 [cm]	Espesor de columna
K	1.20 [ul]	Factor K no menos que 1.2
A	93.44 [cm2]	Area de sección
Pv	73.35 [Kg/m]	Peso de la sección
Ix	**13288.41** [cm4]	Inercia en X
Iy	13288.41 [cm4]	Inercia en Y
Sx	**885.89** [cm3]	Modulo de seccion elastico en x
Sy	885.89 [cm3]	Modulo de seccion elastico en y
Zx	**1023.42** [cm3]	Modulo de seccion plastico en x
Zy	1023.42 [cm3]	Modulo de seccion plastico en y
rx	11.93 [cm]	Radio de giro en x
ry	11.93 [cm]	Radio de giro en y

Fuente: Elaboración propia.

Para efectos de este estudio, en el modelo inicial propuesto se utiliza una sola sección de columna para toda la altura del edificio, reconociendo que si se logra un nivel de diseño claro se recomienda optimizar esta sección, especialmente en pisos superiores.

4.1.8. Diseño y Análisis de la edificación Convencional.

Tomando en cuenta que el software ARSAP 2022 no presenta en su base de datos la norma NEC 2015, la edificación convencional de este estudio se analiza utilizando la norma (ANSI/AISC-360, 2016), que es la normativa principal en la que se basa las disposiciones presentadas en la norma NEC 2015. En el anexo 2 se presenta el procedimiento de análisis y cálculo de la estructura convencional en el software ARSAP 2022.

4.1.8.1. Verificación del cortante basal estático y dinámico.

Según la NEC 2015, el valor de cortante basal dinámico debe ser al menos el 80% del valor de cortante basal estático para estructuras regulares y al menos el 85% para estructuras irregulares. En la tabla 13 se observa los cortantes basales obtenidos por el método estático y dinámico en el software ARSAP 2022.

Tabla 13

Cortante basal dinámico obtenido de ARSAP 2022.

Nudo/Caso/Modo	FX (kgf)	FY (kgf)
Caso	7 - Espectral Dirección_X	
Modo CQC		
Suma final	0.0	0.0
Suma de reacciones <	66405.50	0.64
Suma de esfuerzos	69975.53	0.67
Verificación	136381.04	1.31
Caso	8 - Espectral Dirección_Y	
Modo CQC		
Suma final	0.0	0.0
Suma de reacciones <	1.10	66162.69
Suma de esfuerzos	0.53	69698.84
Verificación	1.63	135861.53

Fuente: ARSAP 2022.

En este caso, al ser una estructura regular, el cortante basal dinámico debe ser al menos el 80 % del cortante basal estático, en la tabla 14 se hace la respectiva comprobación y se observa que se cumple esta condición que establece la norma NEC 2015.

Tabla 14

Verificación de cortante basal.

EJE	ANÁLISIS		% REQUERIDO	% OBTENIDO	ESTADO
	ESTÁTICO [Kgf]	DINÁMICO [Kgf]			
X	77849.74	69975.53	80%	89.9%	CUMPLE
Y	77849.74	69698.84	80%	89.5%	CUMPLE

Fuente: Elaboración propia.

4.1.8.2. Verificación de masas participativas.

Para el análisis, se deben considerar múltiples modos de vibración que tienen un impacto significativo en la respuesta general de la estructura. Para ello, la normativa establece que se debe considerar la participación de una masa modal acumulada de al menos el 90 % de la masa total de la estructura para cada dirección. En el análisis se consideró 12 modos de vibración, tabulados en la tabla 15, donde se observa cada modo de vibración con su masa participativa.

Tabla 15

Periodo y participación modal del edificio.

Caso/Modo	Frecuencia (Hz)	Período (sec)	. UX (%)	. UY (%)
8/ 1	0.6719	1.4884	81.0397	0.0000
8/ 2	0.8361	1.1960	81.0397	82.5347
8/ 3	0.9427	1.0608	81.0397	82.5347
8/ 4	2.1560	0.4638	91.5754	82.5347
8/ 5	2.6050	0.3839	91.5754	92.7215
8/ 6	2.9567	0.3382	91.5754	92.7215
8/ 7	4.0112	0.2493	95.9605	92.7215
8/ 8	4.6232	0.2163	95.9605	96.6495
8/ 9	5.3045	0.1885	95.9605	96.6495
8/ 10	6.2860	0.1591	98.3439	96.6495
8/ 11	6.8624	0.1457	98.3439	98.6775
8/ 12	8.0055	0.1249	98.3439	98.6775

Fuente: ARSAP 2022.

4.1.8.3. Verificación de desplazamientos y derivas de piso.

La deriva del piso se define como el desplazamiento lateral relativo de un piso con respecto a pisos sucesivos debido a la acción de fuerzas horizontales causadas por el viento o los terremotos. El desplazamiento lateral de dos pisos consecutivos deberá medirse en dos puntos ubicados en la misma línea vertical de la estructura.

En este estudio el control de la deriva de los pisos se realizó de acuerdo con lo establecido en la NEC 2015 en su sección 6.3.9, donde establece que el control de la deformación se logrará calculando el desplazamiento inelástico máximo del piso de la estructura debido a un sismo de diseño. La norma establece que la deriva inelástica máxima debe calcularse de la siguiente manera:

$$\Delta_M = 0.75 \cdot R \cdot \Delta_E \tag{6}$$

Donde:

Δ_M : Deriva máxima inelástica

Δ_E: Desplazamiento obtenido en aplicación de las fuerzas laterales de diseño reducidas

R: Factor de reducción de resistencia

Se deberá verificar que la deriva inelástica máxima obtenida y expresada como una fracción de la altura de piso, no sea mayor al valor dado en la Tabla 16.

Tabla 16

Limites permisibles de derivas de piso.

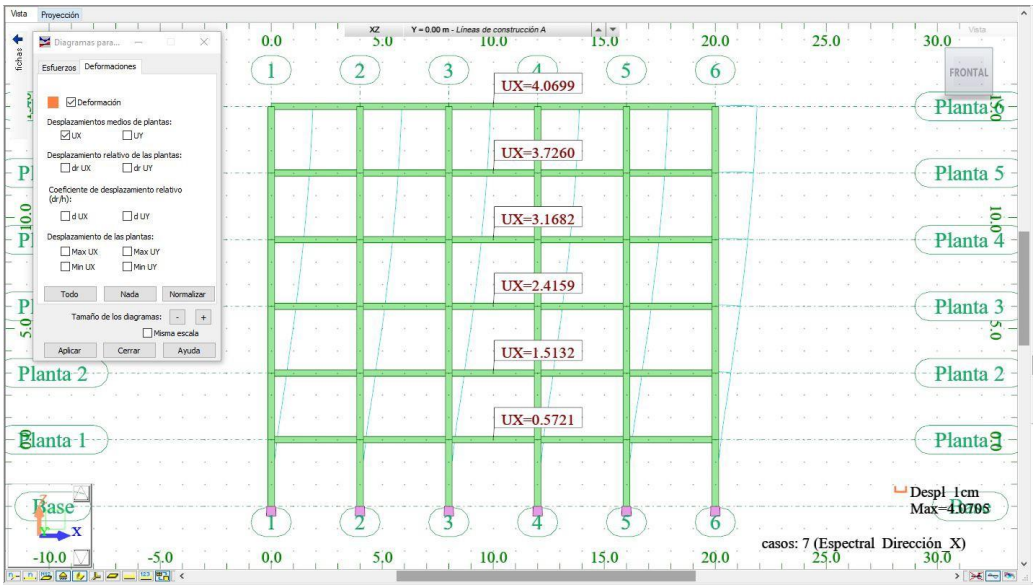
ESTRUCTURAS DE:	ΔM MÁXIMA
Hormigón armado, estructuras metálicas y de madera	0.02
De mampostería	0.01

Fuente: NEC 2015.

En la figura 30 Y 31 se observa los desplazamientos máximos de cada nivel en la dirección X e Y debido al análisis espectral, calculados por el ARSAP 2022.

Figura 30

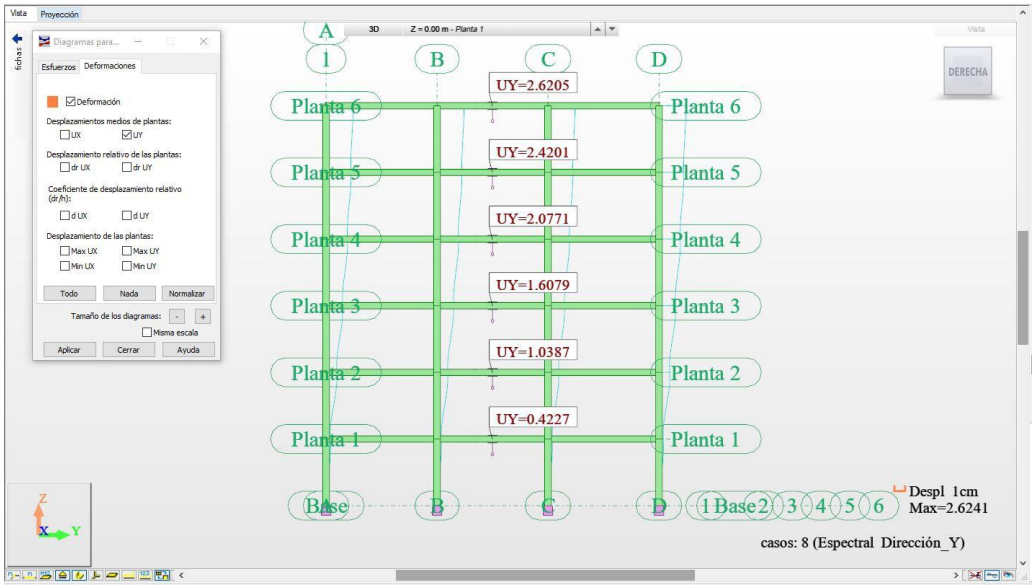
Desplazamientos laterales máximos en dirección X.



Fuente: ARSAP 2022

Figura 31

Desplazamientos laterales máximos en dirección Y.

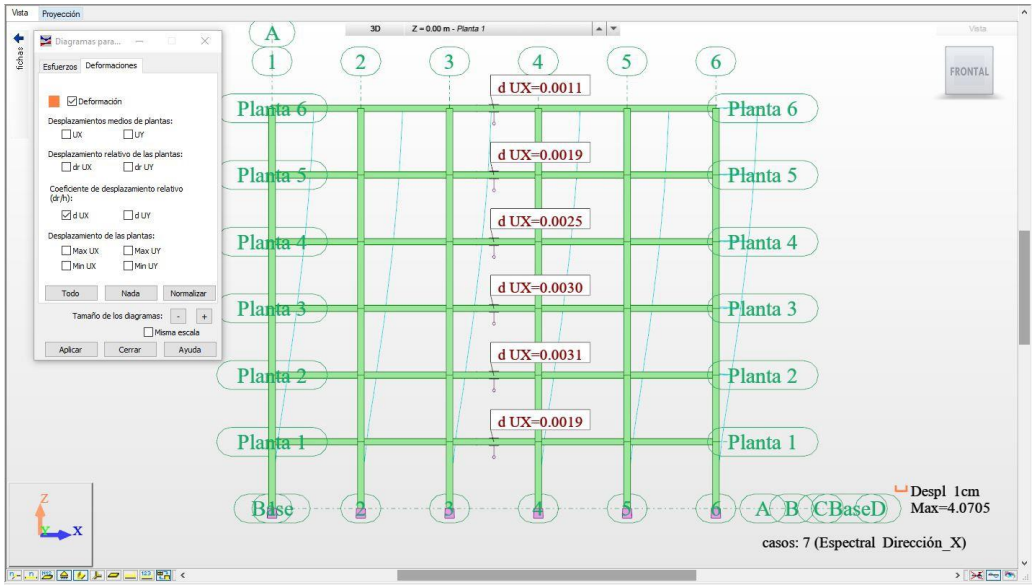


Fuente: ARSAP 2022

En la figura 32 se observa la deriva elástica máxima de cada nivel en la dirección X debido al análisis espectral, calculados por ARSAP 2022. En la tabla 17 se resumen las distorsiones o derivas inelásticas calculadas en concordancia con la norma NEC 2015.

Figura 32

Derivas elásticas del edificio en dirección X.



Fuente: ARSAP 2022

Tabla 17

Derivas inelásticas del edificio en dirección X.

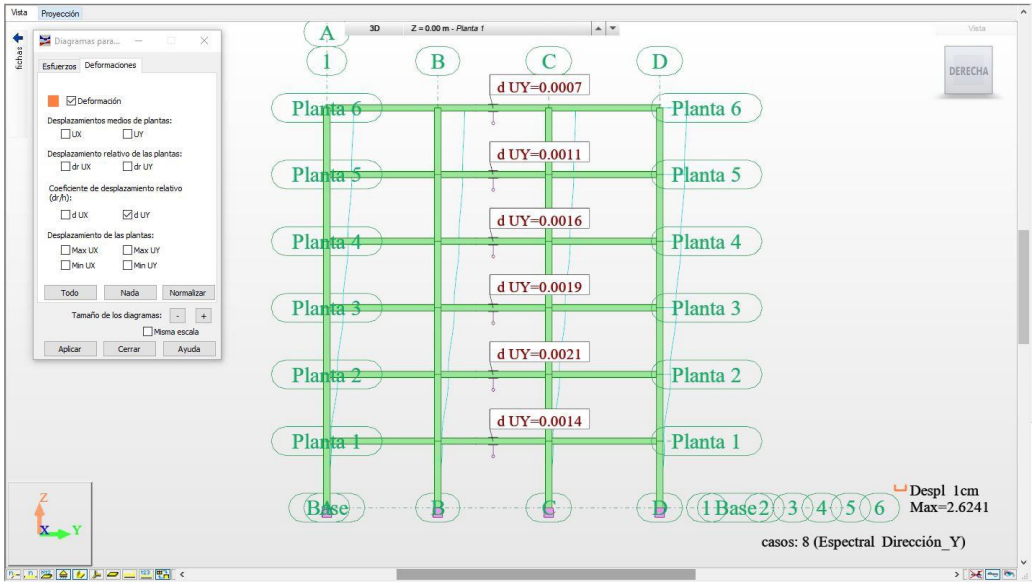
PISO	MÁXIMA DISTORSIÓN DE ENTREPISO [Δ_E] (ARSAP)	0,75 · [R]	DISTORSIÓN NORMATIVA [Δ_M] NEC-SE-DS	CONTROL [Δ_M máxima]	ESTADO
5	0.0011	6	0.007	0.02	CUMPLE
4	0.0019	6	0.011	0.02	CUMPLE
3	0.0025	6	0.015	0.02	CUMPLE
2	0.0030	6	0.018	0.02	CUMPLE
1	0.0031	6	0.019	0.02	CUMPLE
P B	0.0019	6	0.011	0.02	CUMPLE
Sotano	0.0000	0	0.000	0	NA

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 33 se observa la deriva elástica máxima de cada nivel en la dirección Y debido al análisis espectral, calculados por ARSAP 2022. En la tabla 18 se resumen las distorsiones o derivas inelásticas calculadas en concordancia con la norma NEC 2015.

Figura 33

Derivas elásticas del edificio en dirección Y.



Fuente: ARSAP 2022

Tabla 18

Derivas inelásticas del edificio en dirección Y.

PISO	MÁXIMA DISTORSIÓN DE ENTREPISO [Δ_E] (ARSAP)	0,75 · [R]	DISTORSIÓN NORMATIVA [Δ_M] NEC-SE-DS	CONTROL [Δ_M máxima]	ESTADO
5	0.0007	6	0.004	0.02	CUMPLE
4	0.0011	6	0.007	0.02	CUMPLE
3	0.0016	6	0.010	0.02	CUMPLE
2	0.0019	6	0.011	0.02	CUMPLE
1	0.0021	6	0.013	0.02	CUMPLE
P B	0.0014	6	0.008	0.02	CUMPLE
Sotano	0.0000	0	0.000	0	NA

Fuente: Elaboración propia.

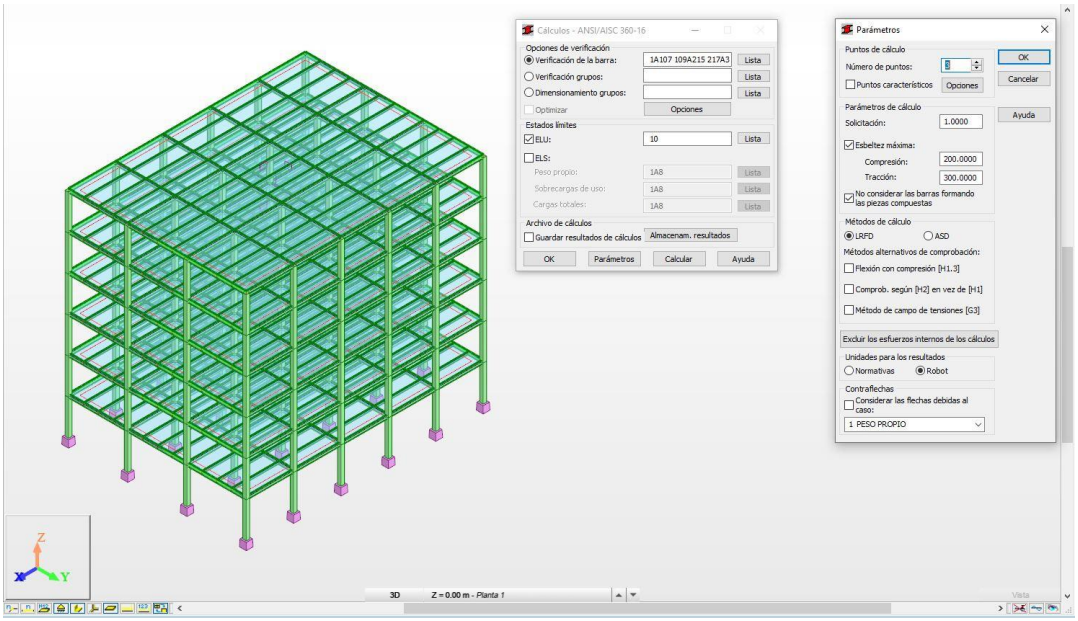
4.1.8.4. Cálculo y optimización de las secciones estructurales del edificio.

Una vez finalizadas las verificaciones que recomienda la norma NEC 2015, el último paso es calcular las secciones y verificar si cumplen las solicitaciones de carga mínimas establecidas. Para esto se utiliza la norma ANSI/AISC 360-16, configurada previamente en el modelo de cálculo estructural.

En la figura 34 se observa la interfaz de configuración utilizada por el programa ARSAP para realizar el cálculo y validación estructural del edificio.

Figura 34

Configuración de cálculo de secciones en ARSAP 2022.



Fuente: ARSAP 2022

En la tabla 19 se observa los resultados de las secciones en la primera corrida de cálculo. Como se puede verificar, las secciones de vigas principales y secundarias no están cumpliendo la resistencia mínima, ya que la solicitación o la relación demanda-capacidad es superior a 1, por consiguiente, se debe incrementar el módulo plástico modificando las secciones de estos elementos estructurales, esto se vuelve un proceso iterativo hasta conseguir las secciones adecuadas.

Tabla 19

Resultados demanda-capacidad de secciones del edificio.

ANSI/AISC 360-16 - Verificación de grupos de barras (ELU) 1A30

Resultados | Mensajes

Barra		Perfil	Material	Lay	Laz	Solicit.	Caso
Grupo : 1 C PB							
15 Pilar_15	OK	C_300X8	ACERO A36	25.1566	25.1566	0.6957	11 1.2 (D1+D2) + L + SX
Grupo : 2 C P1							
123 Pilar_123	OK	C_300X8	ACERO A36	25.1566	25.1566	0.5471	11 1.2 (D1+D2) + L + SX
Grupo : 3 C P2							
223 Pilar_223	OK	C_300X8	ACERO A36	25.1566	25.1566	0.4615	11 1.2 (D1+D2) + L + SX
Grupo : 4 C P3							
331 Pilar_331	OK	C_300X8	ACERO A36	25.1566	25.1566	0.3754	11 1.2 (D1+D2) + L + SX
Grupo : 5 C P4							
440 Pilar_440	OK	C_300X8	ACERO A36	25.1566	25.1566	0.3049	11 1.2 (D1+D2) + L + SX
Grupo : 6 C P5							
548 Pilar_548	OK	C_300X8	ACERO A36	25.1566	25.1566	0.3153	11 1.2 (D1+D2) + L + SX
Grupo : 7 VS PB							
75 Viga_75	NO	I-110X6-200	ACERO A36	46.2617	150.4674	1.0434	10 1.2 (D1+D2) + 1.6L
Grupo : 8 VS P1							
183 Viga_183	NO	I-110X6-200	ACERO A36	46.2617	150.4674	1.0434	10 1.2 (D1+D2) + 1.6L
Grupo : 9 VS P2							
291 Viga_291	NO	I-110X6-200	ACERO A36	46.2617	150.4674	1.0434	10 1.2 (D1+D2) + 1.6L
Grupo : 10 VS P3							
399 Viga_399	NO	I-110X6-200	ACERO A36	46.2617	150.4674	1.0434	10 1.2 (D1+D2) + 1.6L
Grupo : 11 VS P4							
507 Viga_507	NO	I-110X6-200	ACERO A36	46.2617	150.4674	1.0434	10 1.2 (D1+D2) + 1.6L
Grupo : 12 VS P5							
615 Viga_615	OK	I-110X6-200	ACERO A36	46.2617	150.4674	0.7913	10 1.2 (D1+D2) + 1.6L
Grupo : 13 VP EXT PB							
25 Viga_25	NO	I-130X8-290	ACERO A36	41.5602	171.5077	1.6680	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 14 VP EXT P1							
133 Viga_133	NO	I-130X8-290	ACERO A36	41.5602	171.5077	1.7607	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 15 VP EXT P2							
241 Viga_241	NO	I-130X8-290	ACERO A36	41.5602	171.5077	1.6411	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 16 VP EXT P3							
349 Viga_349	NO	I-130X8-290	ACERO A36	41.5602	171.5077	1.4530	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 17 VP EXT P4							
457 Viga_457	NO	I-130X8-290	ACERO A36	41.5602	171.5077	1.2322	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 18 VP EXT P5							
566 Viga_566	OK	I-130X8-290	ACERO A36	41.5602	171.5077	0.7824	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 19 VP INT PB							
33 Viga_33	NO	I-130X8-290	ACERO A36	41.5602	171.5077	2.3376	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 20 VP INT P1							
144 Viga_144	NO	I-130X8-290	ACERO A36	41.5602	171.5077	2.3761	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 21 VP INT P2							
252 Viga_252	NO	I-130X8-290	ACERO A36	41.5602	171.5077	2.2792	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 22 VP INT P3							
360 Viga_360	NO	I-130X8-290	ACERO A36	41.5602	171.5077	2.1079	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 23 VP INT P4							
471 Viga_471	NO	I-130X8-290	ACERO A36	41.5602	171.5077	1.9239	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 24 VP INT P5							
574 Viga_574	NO	I-130X8-290	ACERO A36	41.5602	171.5077	1.3157	12 1.2 (D1+D2) + L + SY

Fuente: ARSAP 2022.

En la tabla 20 se observa las secciones de columnas finales optimizadas y empleadas en el diseño del edificio.

Tabla 20

Optimización de sección de columnas.

ANSI/AISC 360-16 - Verificación de grupos de barras (ELU) 1A6

Resultados | Mensajes

Barra		Perfil	Material	Lay	Laz	Solicit.	Caso
Grupo : 1 C PB							
15 Pilar_15	OK	C_300X8	ACERO A36	25.1566	25.1566	0.6769	11 1.2 (D1+D2) + L + SX
Grupo : 2 C P1							
115 Pilar_115	OK	C_300X8	ACERO A36	25.1566	25.1566	0.5691	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 3 C P2							
223 Pilar_223	OK	C_300X6	ACERO A36	24.9896	24.9896	0.6875	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 4 C P3							
331 Pilar_331	OK	C_300X6	ACERO A36	24.9896	24.9896	0.5639	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 5 C P4							
440 Pilar_440	OK	C_300X5	ACERO A36	24.9065	24.9065	0.6205	11 1.2 (D1+D2) + L + SX
Grupo : 6 C P5							
548 Pilar_548	OK	C_300X5	ACERO A36	24.9065	24.9065	0.6195	11 1.2 (D1+D2) + L + SX

Fuente: ARSAP 2022.

En la tabla 21 se observa las secciones de vigas secundarias finales optimizadas y empleadas en el diseño del edificio.

Tabla 21

Optimización de sección de vigas secundarias.

ANSI/AISC 360-16 - Verificación de grupos de barras (ELU) 7A12

Resultados | Mensajes

Barra		Perfil	Material	Lay	Laz	Solicit.	Caso
Grupo : 7 VS PB							
102 Viga_102	OK	I-120X6-210X4	ACERO A36	45.07933	143.71515	0.79958	10 1.2 (D1+D2) + 1.6L
Grupo : 8 VS P1							
183 Viga_183	OK	I-120X6-210X4	ACERO A36	45.07933	143.71515	0.79962	10 1.2 (D1+D2) + 1.6L
Grupo : 9 VS P2							
291 Viga_291	OK	I-120X6-200X4	ACERO A36	47.16172	142.42376	0.83483	10 1.2 (D1+D2) + 1.6L
Grupo : 10 VS P3							
399 Viga_399	OK	I-120X6-200X4	ACERO A36	47.16172	142.42376	0.83491	10 1.2 (D1+D2) + 1.6L
Grupo : 11 VS P4							
512 Viga_512	OK	I-120X6-200X4	ACERO A36	47.16172	142.42376	0.83469	10 1.2 (D1+D2) + 1.6L
Grupo : 12 VS P5							
615 Viga_615	OK	I-110X6-200X3	ACERO A36	46.26173	150.46740	0.79134	10 1.2 (D1+D2) + 1.6L

Fuente: ARSAP 2022.

En la tabla 22 se observa las secciones de vigas principales finales optimizadas y empleadas en el diseño del edificio.

Tabla 22

Optimización de sección de vigas principales.

ANSI/AISC 360-16 - Verificación de grupos de barras (ELU) 13A30

Resultados | Mensajes

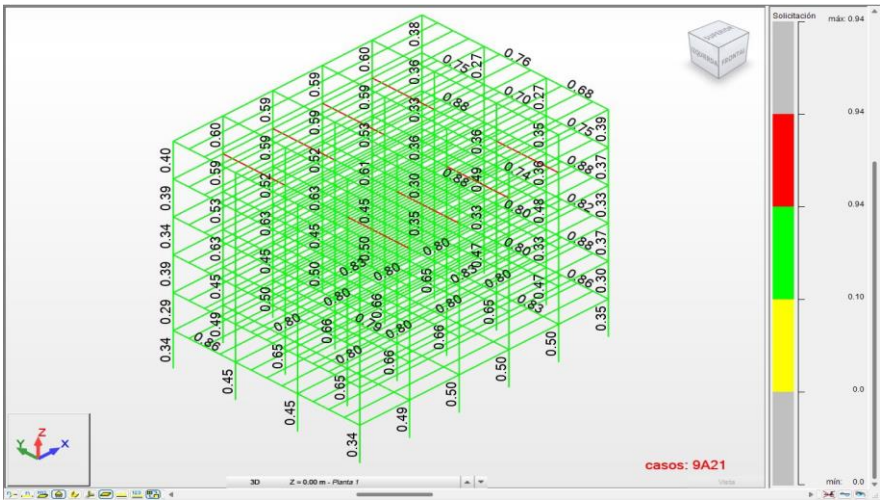
Barra	Perfil	Material	Lay	Laz	Solicit.	Caso
Grupo : 13 VP EXT PB						
25 Viga_25	OK I-160X8-340X6	ACERO A36	35.8599	143.5120	0.8865	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 14 VP EXT P1						
133 Viga_133	OK I-160X8-340X6	ACERO A36	35.8599	143.5120	0.9045	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 15 VP EXT P2						
241 Viga_241	OK I-160X8-340X6	ACERO A36	35.8599	143.5120	0.8401	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 16 VP EXT P3						
349 Viga_349	OK I-150X8-320X6	ACERO A36	38.1736	153.0953	0.9027	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 17 VP EXT P4						
457 Viga_457	OK I-150X8-320X6	ACERO A36	38.1736	153.0953	0.7676	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 18 VP EXT P5						
566 Viga_566	OK I-130X8-290X5	ACERO A36	41.5602	171.5077	0.7683	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 19 VP INT PB						
33 Viga_33	OK I-170X10-360X6	ACERO A36	33.1436	128.8278	0.8498	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 20 VP INT P1						
141 Viga_141	OK I-170X10-360X6	ACERO A36	33.1436	128.8278	0.8525	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 21 VP INT P2						
249 Viga_249	OK I-170X10-360X6	ACERO A36	33.1436	128.8278	0.8077	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 22 VP INT P3						
357 Viga_357	OK I-170X10-360X6	ACERO A36	33.1436	128.8278	0.7407	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 23 VP INT P4						
467 Viga_467	OK I-160X8-340X6	ACERO A36	35.8599	143.5120	0.9591	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 24 VP INT P5						
574 Viga_574	OK I-150X8-320X6	ACERO A36	38.1736	153.0953	0.8124	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 25 VP INT2 PB						
57 Viga_57	OK I-130X8-290X5	ACERO A36	33.2482	137.2062	0.8185	11 1.2 (D1+D2) + L + SX
Grupo : 26 VP INT2 P1						
160 Viga_160	OK I-130X8-290X5	ACERO A36	33.2482	137.2062	0.8931	11 1.2 (D1+D2) + L + SX
Grupo : 27 VP INT2 P2						
268 Viga_268	OK I-130X8-290X5	ACERO A36	33.2482	137.2062	0.8695	11 1.2 (D1+D2) + L + SX
Grupo : 28 VP INT2 P3						
372 Viga_372	OK I-130X8-290X5	ACERO A36	33.2482	137.2062	0.8111	11 1.2 (D1+D2) + L + SX
Grupo : 29 VP INT2 P4						
484 Viga_484	OK I-120X6-200X4	ACERO A36	47.1617	142.4238	0.9696	11 1.2 (D1+D2) + L + SX
Grupo : 30 VP INT2 P5						
588 Viga_588	OK I-110X6-200X3	ACERO A36	46.2617	150.4674	0.8782	11 1.2 (D1+D2) + L + SX

Fuente: ARSAP 2022.

En la figura 35 se observa las solicitaciones o ratios finales del sistema estructural optimizado. En la tabla 23 se observa el peso total de las secciones de vigas y columnas finales empleadas en el diseño del edificio.

Figura 35

Relación demanda-capacidad de la estructura convencional.



Fuente: ARSAP 2022

Tabla 23

Peso de la estructura convencional.

Tipo	Número	Longitud (m)	Peso por unidad (kG/m)	Peso de la barra (kG)	Peso total (kG)	Superficie pintada (m2)
ACERO A36						
C 300X5	48	3.00	46.32	138.95	6669	172.80
C 300X6	48	3.00	55.39	166.17	7976	172.80
C 300X8	48	3.00	73.35	220.05	10562	172.80
I-110X6-200X3	55	4.00	14.79	59.16	3254	183.48
I-120X6-200X4	145	4.00	17.21	68.83	9980	505.76
I-120X6-210X4	90	4.00	17.52	70.08	6308	321.12
I-130X8-290X5	50	4.00	27.08	108.33	5417	218.00
I-130X8-290X5	6	5.00	27.08	135.41	812	32.70
I-150X8-320X6	20	4.00	33.16	132.63	2653	98.24
I-150X8-320X6	24	5.00	33.16	165.79	3979	147.36
I-160X8-340X6	30	4.00	35.36	141.43	4243	156.96
I-160X8-340X6	30	5.00	35.36	176.78	5303	196.20
I-170X10-360X6	48	5.00	42.70	213.52	10249	333.12
Total						
C 300X5	48	144.00	46.32	6669.36	6669	172.80
C 300X6	48	144.00	55.39	7976.10	7976	172.80
C 300X8	48	144.00	73.35	10562.46	10562	172.80
I-110X6-200X3	55	220.00	14.79	3253.67	3254	183.48
I-120X6-200X4	145	580.00	17.21	9980.18	9980	505.76
I-120X6-210X4	90	360.00	17.52	6307.63	6308	321.12
I-130X8-290X5	56	230.00	27.08	6228.98	6229	250.70
I-150X8-320X6	44	200.00	33.16	6631.68	6632	245.60
I-160X8-340X6	60	270.00	35.36	9546.23	9546	353.16
I-170X10-360X6	48	240.00	42.70	10248.96	10249	333.12
Total:					77405	2711.34

Fuente: ARSAP 2022.

4.1.8.5. Comportamiento sísmico del Edificio convencional.

El diseño del edificio sismorresistente se realizó siguiendo los estándares NEC 2015, que es un diseño para soportar cargas sísmicas a través de la ductilidad proporcionada a la estructura, causando así daño estructural, pero los desplazamientos del piso se limitan al 2% para que el edificio no colapse y las personas puede evacuar a tiempo durante un evento sísmico.

Se efectuó el análisis del edificio convencional mediante un análisis dinámico utilizando el espectro de diseño del suelo tipo D con ubicación en la ciudad de Cuenca, logrando obtener el desplazamiento máximo de cada piso, la distorsión máxima de cada piso y la fuerza cortante basal en cada dirección.

En las figuras 36 y 37, se puede observar el desplazamiento máximo en el sentido X es igual a 3.66 cm y la deriva máxima en el sentido X es igual a 1.51 % la cual ocurre en el tercer piso y está por debajo de la deriva límite del 2% que establece la norma NEC.

En el sentido Y el desplazamiento máximo es igual 1.96 cm y la deriva máxima es igual a 0.84 % (ver figuras 38 y 39) la cual ocurre en el tercer piso del edificio y está por debajo de la deriva límite del 2 % que establece la norma NEC.

En las figuras 40 y 41, se puede observar el cortante basal máximo en sentido X es igual a 648.78 KN y en sentido Y es igual a 643.36 KN.

Con estos resultados se comprueba que el diseño del edificio convencional sismorresistente, utilizando el espectro de diseño sísmico reducido por el factor de reducción R=8, cumple con los límites de derivas máximas establecidas en la norma NEC 2015, por lo tanto, es un diseño satisfactorio.

4.1.9. Selección de alternativas de sistemas de protección sísmica.

Como ya analizamos en el marco teórico, existe una amplia variedad de sistemas de protección sísmica, que se pueden utilizar para contra restar los efectos que se producen durante un evento sísmico. Para los propósitos de nuestra investigación vamos a seleccionar un dispositivo de aislamiento sísmico y un dispositivo de disipación sísmica, para analizar su comportamiento en el edificio de estudio definido en el apartado anterior.

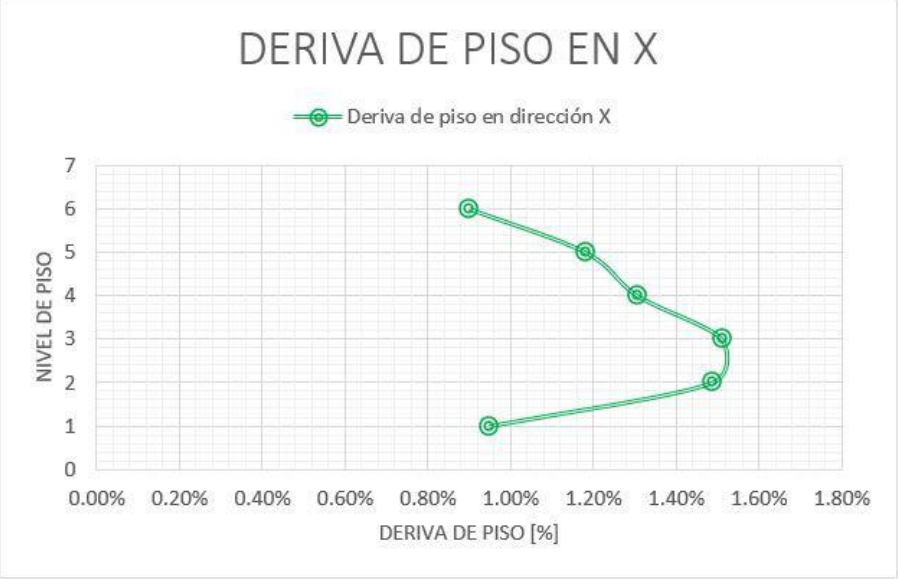
Figura 36

Desplazamiento máximo en sentido X estructura convencional.

Fuente: Elaboración propia

Figura 37

Derivas máximas en sentido X estructura convencional.



Fuente: Elaboración propia

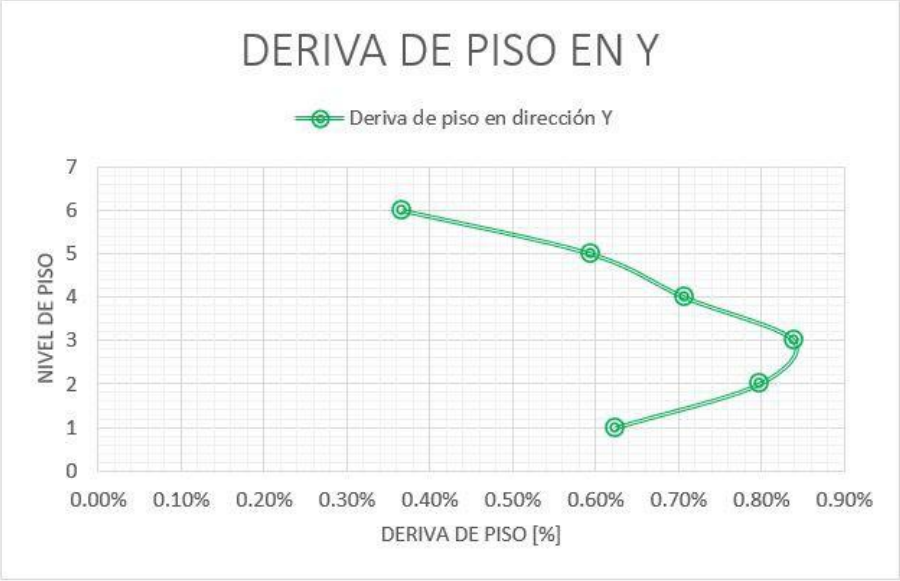
Figura 38

Desplazamiento máximo en sentido Y estructura convencional.

Fuente: Elaboración propia

Figura 39

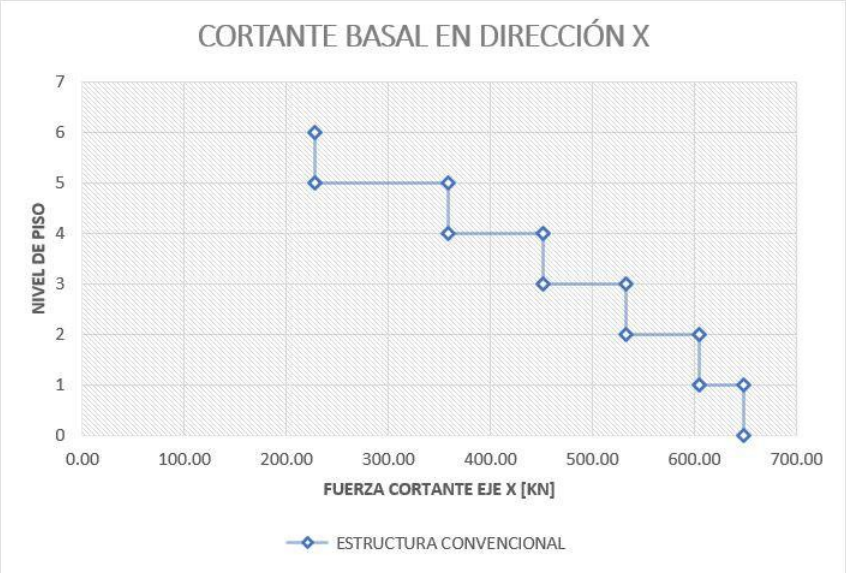
Derivas máximas en sentido Y estructura convencional.



Fuente: Elaboración propia

Figura 40

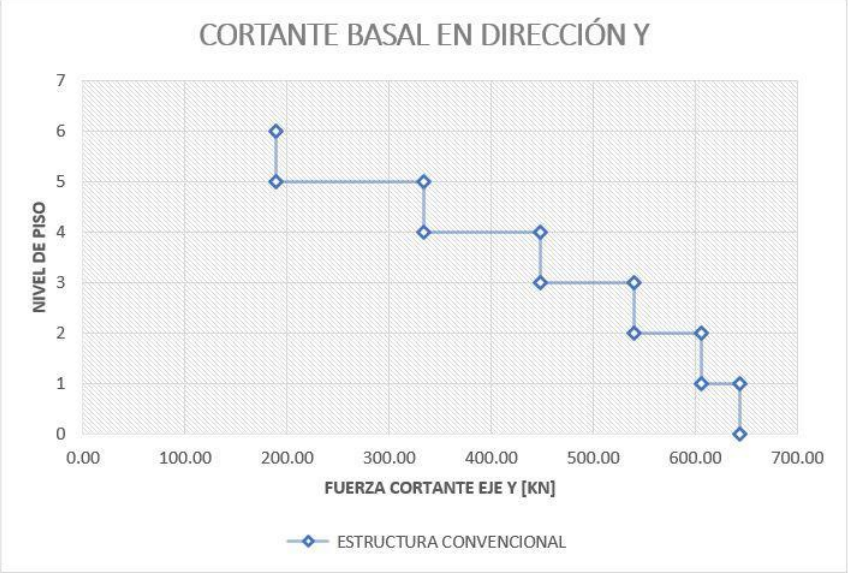
Cortante basal máximo en sentido X estructura convencional.



Fuente: Elaboración propia

Figura 41

Cortante basal máximo en sentido Y estructura convencional.



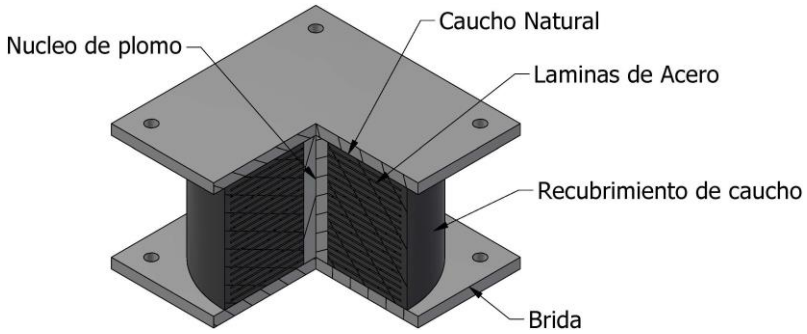
Fuente: Elaboración propia

4.1.9.1. Selección de alternativa de aislamiento sísmico.

Actualmente, existe una amplia variedad de sistemas de aislamiento; sin embargo, para los propósitos de este estudio, se seleccionó una unidad elastomérica con núcleo de plomo (LRB), ver figura 42. Tomando en cuenta que el dispositivo elastómero tiene una rigidez baja y cambia el período fundamental de la estructura, evitando así resonancias por excitaciones sísmicas.

Figura 42

Aisladores con núcleo de plomo (LRB).



Fuente: Elaboración propia

PROPIEDADES:

Los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo LRB constan de capas alternas de material elastomérico (caucho natural) y láminas de acero vulcanizado A36. Por lo tanto, gracias a la fuerte capacidad de absorción del material en el que está fabricado, puede proporcionar excelentes niveles de amortiguación de hasta el 30% para estructuras críticas o que deben permanecer en pie luego de fenómenos sísmicos. Dado que las placas de acero están completamente integradas en las placas de elastómero, quedan completamente selladas y, por lo tanto, protegidas contra la corrosión.

VENTAJAS:

- Es una solución económicamente viable con cuatro veces el valor en comparación con otros aisladores.

- El núcleo de plomo puede soportar hasta 100 ciclos de carga con deformaciones que oscilan entre el 25 % y el 200 %.
- La relación entre la deformación lateral y el espesor del caucho durante un terremoto de diseño puede alcanzar el 150%, y el terremoto máximo posible puede alcanzar el 250 %.
- A diferencia de los disipadores, los aisladores no interferirán con el diseño arquitectónico propuesto, ya que quedarán ocultos en la base.

DESVENTAJAS:

- Este tipo de aislamiento no se puede utilizar en edificios con relaciones altura/ancho muy elevadas, ya que provocaría aumentos excesivos de las tensiones de flexión.
- Instalar aisladores sísmicos en una estructura existente es un proceso muy complejo en comparación con la simplicidad de instalar disipadores en una estructura existente.
- El desarrollo de los sistemas LRB no ha avanzado significativamente en comparación con los aisladores de fricción, que han evolucionado significativamente desde su invención.
- El uso de este tipo de dispositivos puede retrasar significativamente el avance de la obra, ya que se estima que su fabricación y pruebas correspondientes demorarán de 3 a 6 meses.

4.1.9.2. Selección de alternativa de disipadores sísmicos.

Para este análisis se decidió seleccionar un dispositivo sísmico de desplazamiento por fricción, ya que este tipo de dispositivo tiene varias ventajas, las principales son las siguientes:

- En el proceso disipativo, la plastificación del metal, puede ocurrir bajo cualquier estado de tensión (flexión, torsión, cizallamiento, tensión, compresión).
- Previene la deformación permanente de la estructura.
- Los metales tienen un comportamiento predecible y estable bajo cargas alternas.

- El material es relativamente barato y fácilmente disponible.
- Los componentes del disipador requieren poco o nulo mantenimiento.
- Su eficiencia no se ve afectada por los cambios de temperatura.
- Reducción significativa de los costes de mantenimiento futuro de los edificios tras los sismos.

Estos dispositivos generalmente se conocen como frenos sísmicos y se forman cuando se instala al final de un contraviento normal, formando un contraviento de ductilidad restringida (CRD), que permite que un edificio se deforme elásticamente bajo tensión y compresión, disipando así la energía sísmica. Este rendimiento, a su vez, puede suponer un importante ahorro en los costes de construcción, ya que se pueden optimizar al máximo los elementos que soportan la estructura, reduciendo significativamente la cantidad de armadura, hormigón armado o acero estructural.

Otra gran ventaja de los frenos sísmicos es que son independientes de la velocidad, es decir, su funcionamiento en términos de disipación de energía no se ve afectado por los cambios de velocidad cuando se aplica la fuerza. Esta única propiedad lo convierte en un elemento fácil de introducir en casi cualquier diseño estructural, ya que solo se requieren desplazamientos y fuerzas de respuesta. En la figura 43 se puede observar este tipo de dispositivos.

Figura 43

Disipadores sísmicos a Fricción.

Fuente: FUJIENGINEERING, 2022

4.2. Simular en Autodesk Robot Structural el comportamiento de los aisladores y disipadores sísmicos en un edificio de 5 plantas para determinar el desempeño de los mismos.

4.2.1. Simulación de la edificación con aisladores sísmicos en ARSAP 2022.

En Ecuador no existe normativa específica para el diseño y construcción de estructuras aisladas, especialmente por la falta de inversión en el desarrollo y ejecución de este tipo de proyectos. Este tipo de estructuras se mencionan en la normativa NEC-SE-DS, pero no de forma explícita, sino que se establecen normas americanas que se mencionan como referencia para el diseño de estas estructuras.

Dado que las normas de construcción ecuatoriana NEC no estudian el aislamiento en estructuras, se tomaron en cuenta las normas vigentes de países como Chile (NCH 2745) y Estados Unidos (FEMA 450, ASCE 7-16), estas normas se consideran como base para diseñar el aislador sísmico utilizado en esta investigación.

El concepto tradicional de diseño sismorresistente es evitar víctimas evitando que la estructura colapse, en lugar de limitar el daño estructural causado por los terremotos; es decir, en las estructuras tradicionales pueden dañarse tanto elementos estructurales como no estructurales.

Actualmente, las tendencias globales se centran no solo en la protección de la vida en caso de fuertes terremotos, sino también en la funcionalidad y operatividad de las estructuras, la protección de los contenidos e incluso la protección de las inversiones de los proyectos; estos aspectos han llevado a estándares de diseño más estrictos, impulsando la adopción de nuevas tecnologías en todo tipo de estructuras. La estructura debe cumplir con los siguientes objetivos de desempeño:

- Resistir pequeños y medianos sismos sin dañar los elementos estructurales, no estructurales y contenidos del edificio.
- Al resistir terremotos severos, el sistema de aislamiento no fallará, no causando daños significativos a los elementos estructurales, ni daños a gran escala a los elementos no estructurales, ni interrupción de la operatividad de la estructura, sin importar la categoría de ocupación o el factor de importancia de la edificación.

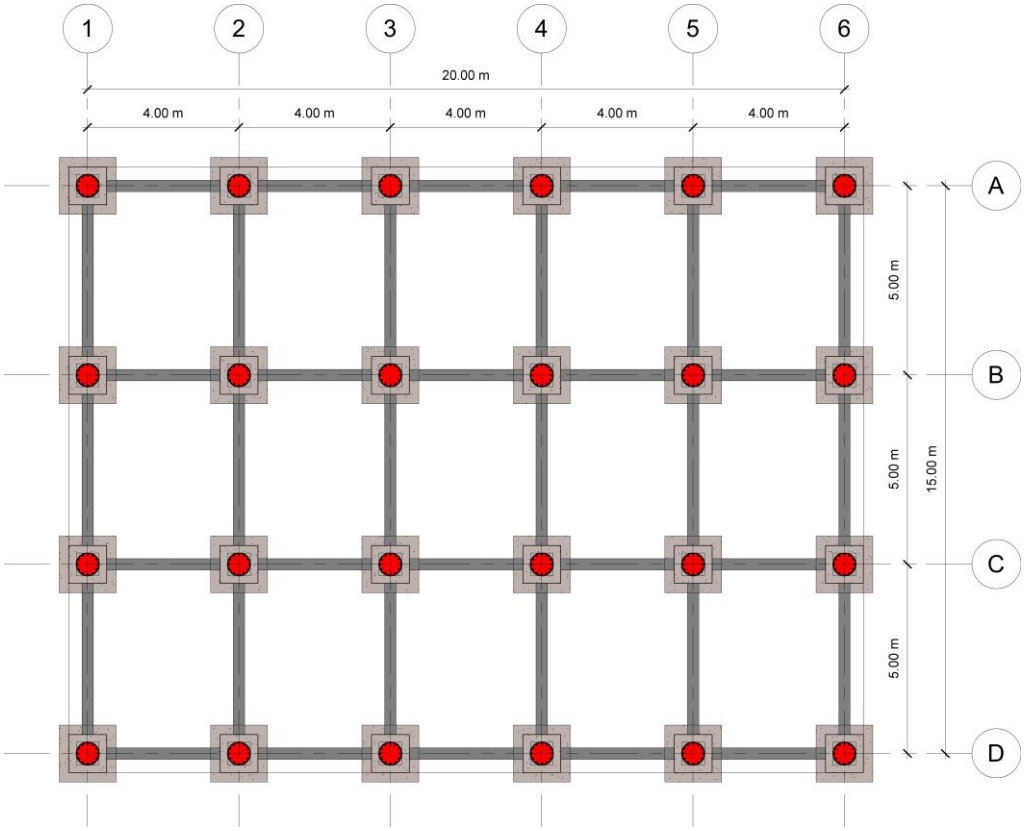
4.2.1.1. Caracterización del edificio con aislamiento sísmico.

El sistema de aislamiento consta de 24 aisladores de base, distribuidos como se observa en la figura 44; los cuales se disponen de tal manera que se sitúen en los elementos que transmiten la carga de la superestructura a la subestructura, conectados por vigas de amarre, con los correspondientes pedestales de tope, como muestra la figura 45.

La estructura con sistema de aislamiento, tiene las mismas características que la estructura convencional analizada en la sección 4.1.8, la única diferencia es el sistema de aislamiento, que requiere profundizar 1.0m más el nivel de cimentación, con el propósito de tener un sistema de acceso a los aisladores para su inspección y posible reemplazo apropiado.

Figura 44

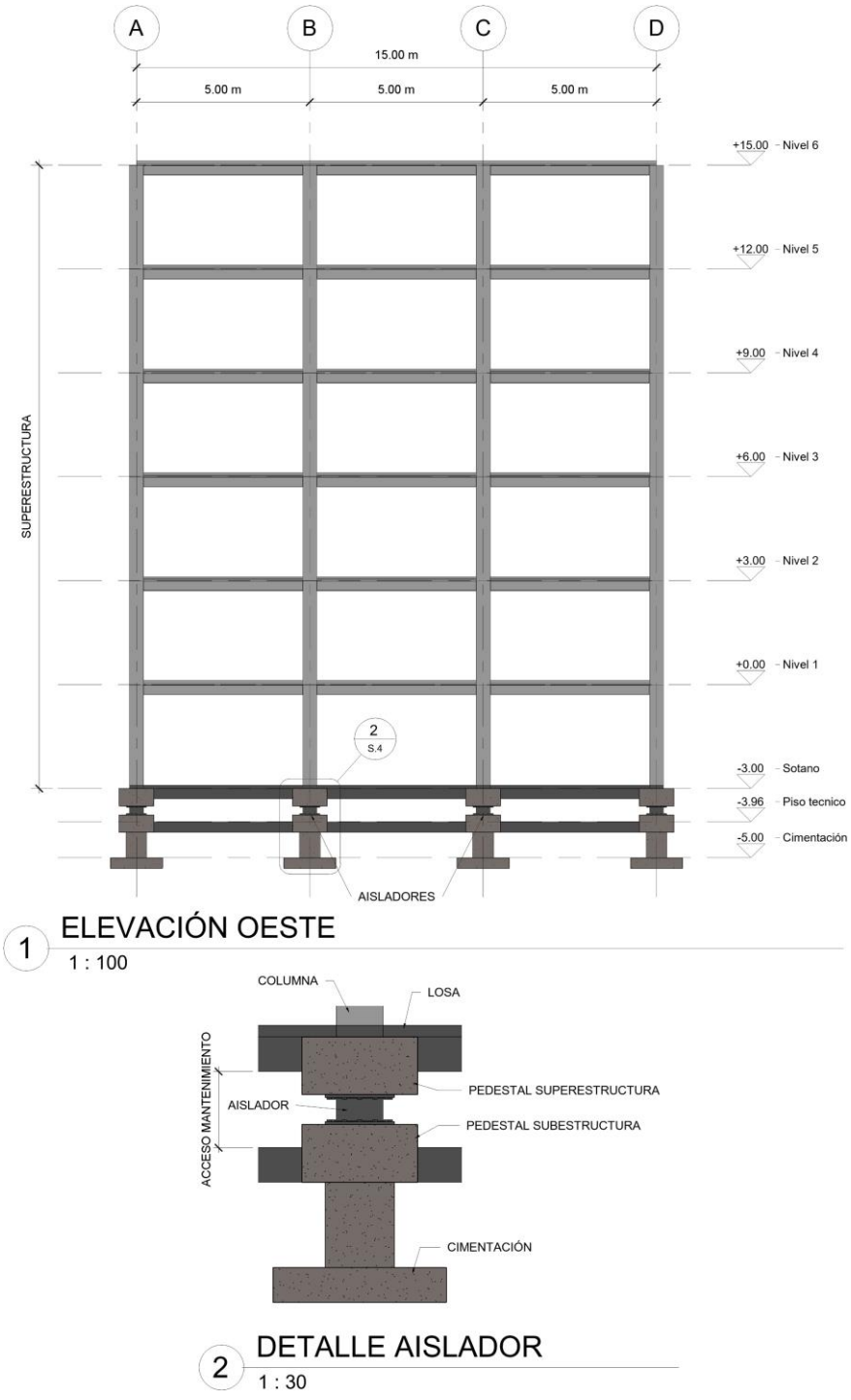
Ubicación de aisladores sísmicos en planta.



Fuente: Elaboración propia

Figura 45

Ubicación de aisladores sísmicos en elevación.



Fuente: Elaboración propia

4.2.1.2. Diseño del sistema de aislamiento para la edificación.

El dimensionamiento de los aisladores de base permite determinar los parámetros que requiere el programa ARSAP 2022 para modelar estos dispositivos. En la Tabla 24 se presenta los datos generales obtenidos en el análisis de la estructura convencional, necesarios para el dimensionamiento de los aisladores con núcleo de plomo (LRB).

Tabla 24

Datos de entrada para diseño de aisladores LRB.

DESCRIPCIÓN		VALOR	UNIDAD
Número de aisladores que utilizará el sistema	N_a	24.00	Aisladores
Peso sismico total de la estructura	W	863937.44	[Kg]
		863.94	[Ton]
Período objetivo deseado	T_D	2.40	[s]
Carga máxima bajo la cual actua el aislador Pmax	Pu_{max}	111953.66	[Kg]
		111.95	[Ton]

Fuente: Elaboración propia.

El diseño de un aislador sísmico es un proceso iterativo que implica imponer un período objetivo a la estructura, a partir del cual se calcula la rigidez lateral del sistema de aislamiento sísmico y el desplazamiento de diseño del centro de rigidez. La rigidez lateral total del sistema y el desplazamiento de diseño correspondiente al período objetivo de la estructura de aislamiento se calculan utilizando la fórmula establecida para el procedimiento de carga lateral equivalente en el Capítulo 17 del Código ASCE 7-16.

4.2.1.2.1. Parámetros y características para el modelado bilineal de un aislador sísmico elastomérico LRB.

Como primer paso en el predimensionamiento del aislador LRB, es necesario tener un desplazamiento mínimo de diseño, teniendo en cuenta la aceleración del espectro de diseño, el amortiguamiento objetivo y el período objetivo de la estructura analizada, según la fórmula obtenida en la especificación ASCE 7-16.

A continuación, se presenta los parámetros, las características y las fórmulas principales utilizadas para crear el modelado bilineal de los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo LRB, utilizando el capítulo 17 del código americano ASCE 7-16 y diferentes referencias en cuanto al diseño de estos dispositivos.

- Desplazamiento mínimo de diseño

$$D_d = \frac{g \cdot S_{M1} \cdot T_M}{4 \cdot \pi^2 \cdot B_M} \tag{7}$$

Donde:

D_d: Desplazamiento mínimo de diseño

g: aceleración de la gravedad

S_{M1}: aceleración del espectro de diseño con amortiguamiento de 5% en un período de 1s.

T_M : período objetivo de la estructura que se va a aislar

B_M : coeficiente en relación con el amortiguamiento efectivo (tabla 25)

Tabla 25

Coeficiente de amortiguamiento.

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

Fuente: (ASCE-7, 2016).

- Rigidez efectiva del sistema de aislamiento

$$K_{eff} = W \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{T_M}\right)^2 \quad (8)$$

Donde:

K_{eff} : Rigidez efectiva del sistema de aislamiento

W : es el peso de la estructura determinada conforme a la NEC 2015 6.1.7

T_M : período objetivo de la estructura que se va a aislar

- Energía de disipación

$$W_D = 2 \cdot \pi \cdot K_{eff} \cdot \beta_D \cdot D_d^2 \quad (9)$$

Donde:

β_D: Amortiguamiento de los aisladores LRB

- Fuerza característica

$$Q = \frac{W_D}{4 \cdot (D_d - D_y)} \quad (10)$$

Dado que la fuerza característica Q tiene varias incógnitas correspondientes al material aislante (especialmente el núcleo de plomo), se aproximará la fuerza característica Q_0 despreciando el desplazamiento de fluencia D_y en la primera iteración.

$$Q_0 = \frac{W_D}{4 \cdot D_d} \quad (11)$$

- Rigidez post-fluencia

Donde:

K_2: Rigidez post-fluencia

- Rigidez elástica

$$K_1 = 10 \cdot K_2 \tag{13}$$

Donde:
K_1: Rigidez elástica

- Desplazamiento de fluencia

$$D_y = \frac{Q_0}{K_1 - K_2}$$

Donde:
D_y: Desplazamiento de fluencia

Ahora, una vez que se tiene D_y, se puede aplicar la fórmula para la fuerza característica Q que se presentó en la ecuación 16.

- Fuerza de fluencia

$$V_y = Q + K_2 \cdot D_y \tag{15}$$

Donde:
V_y: Fuerza de fluencia

Una vez alcanzado este valor se realiza un proceso iterativo hasta alcanzar un valor de convergencia del orden 0.0001, lo que significa que se ha definido un modelo bilineal del aislante elástico para el periodo objetivo y el amortiguamiento.

Para calcular la aceleración para un espectro de diseño con 5% de amortiguación en 1 segundo S_{M1}, la norma estadounidense utiliza el sismo máximo considerado (MCE), que es 1,5 veces el espectro de diseño, como se muestra en la Figura 46.

El cálculo de las propiedades y características básicas del modelo bilineal del sistema de aislamiento, se observan en la tabla 26.

Figura 46

Espectro sísmico máximo considerado (MCE).

Fuente: Elaboración propia

Tabla 26

Características del sistema de aislamiento.

DESCRIPCIÓN		VALOR	UNIDAD
Aceleración del espectro de diseño	S_{M1}	0.79	[m/s^2]
Amortiguamiento de los aisladores	B_D	20	[%]
Coeficiente de amortiguamiento	B_M	1.50	[ul]
Periodo objetivo	T_M	2.40	[s]
Desplazamiento mínimo de diseño	D_d	0.313	[m]
Rigidez efectiva del sistema de aislación	K_{eff}	5921333.86	[N/m]
Energía de disipación del sistema de aislación	W_D	74106.92	[Kg.m]
Fuerza característica	Q	589098.53	[N]
Rigidez post-fluencia	K_2	4036648.99	[N/m]
Rigidez elástica	K_1	40366489.94	[N/m]
Desplazamiento de fluencia	D_y	0.0162	[m]

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se determinan las propiedades geométricas de cada unidad de aislamiento en función del número total de aisladores empleados en la estructura.

- Área de plomo

$$A_p = \frac{Q}{\tau_y}$$

Donde:
A_p: Área de plomo
τ_y: valor de tensión de fluencia del plomo, comúnmente es, 10 MPa.

- Diámetro del núcleo de plomo

$$D_{pb} = 2 \cdot \sqrt{\frac{A_p}{\pi \cdot n_{LRB}}} \tag{17}$$

Donde:
D_{pb}: Diámetro del núcleo de plomo
n_{LRB}: Número de aisladores.

- Altura del caucho del aislador

$$H_r = \frac{D_d}{\gamma_s} \tag{18}$$

Donde:
H_r: Altura del caucho
γ_s: deformación lateral por corte, comúnmente 150 %.

- Altura del aislador

$$H = h + 2 \cdot t_{ext} \tag{19}$$

$$n = \frac{H_r}{t_r} \tag{20}$$

$$h = n \cdot t_r + (n-1) \cdot t_s \tag{21}$$

Donde:

H: altura total del aislador

t_{ext}: placas externas de acero, comúnmente e = 0.025 m

h: altura de aislador de goma y acero

n: número de láminas de goma, debe ser número entero

t_r: espesor de la goma, comúnmente e = 0.006 m

t_s: espesor de la goma, comúnmente e = 0.003 m

- **Área del aislador (solo goma)**

$$A = \frac{P_{max}}{\sigma_{AC}} \tag{22}$$

Donde:

P_{max}: Carga máxima de un aislador

σ_{AC}: tensión admisible de la goma, comúnmente 8.8 MPa

- **Diámetro del aislador**

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{A + A_p}{\pi}} \tag{23}$$

Donde:

D: Diámetro del aislador

- **Módulo de corte del caucho**

$$G = \frac{K_{eff} \cdot H_r}{A} \tag{24}$$

Donde:

G: Módulo de corte del caucho

- **Factor de forma**

$$S = \frac{D^2 - D_{pb}^2}{4 \cdot D \cdot t_r} \tag{25}$$

Donde:

S: Factor de forma

Se recomienda que el aislador tenga un factor de forma superior a 10, ya que esto garantiza que la rigidez vertical sea suficiente y no dé como resultado valores indeseablemente bajos. Si no se cumple esta condición, se deberá cambiar el diámetro del aislador.

- **Rigidez del aislador con un núcleo de plomo**

$$K_p = 1.15 \cdot K_{eff} \tag{26}$$

Donde:

K_p: Rigidez del aislador con un núcleo de plomo

- **Rigidez post-fluencia del aislador con núcleo de plomo**

$$K_{2p} = K_p - \frac{Q}{D_d} \tag{27}$$

Donde:

K_{2p}: Rigidez post-fluencia del aislador con núcleo de plomo

- **Rigidez elástica del aislador con núcleo de plomo**

$$K_{1p} = 10 \cdot K_{2p} \tag{28}$$

Donde:

K_{1p}: Rigidez elástica del aislador con núcleo de plomo

- **Fuerza de fluencia del aislador**

$$F_y = Q + K_p \cdot D_y \tag{29}$$

Donde:
F_y: Fuerza de fluencia del aislador

- **Rigidez vertical**

$$K_v = \frac{E_v \cdot A}{H_r} + \frac{E_l \cdot A_p}{H_l} \tag{30}$$

$$E_v = \frac{1}{\frac{1}{6 \cdot G \cdot S^2} + \frac{4}{3 \cdot K}} \tag{31}$$

Donde:
K_v: Rigidez vertical
E_v: módulo de rigidez vertical
E_l: módulo de elasticidad del plomo es, 13729 MPa
K: módulo de comprensibilidad de la goma tiene un valor de 1961 MPa
H_l: altura de goma y acero del aislador

El cálculo de las propiedades y características geométricas del aislador para este sistema de aislamiento, se observan reflejados en la tabla 27.

Con la geometría y los parámetros mecánicos definidos, se escoge un aislador del catálogo DIS (DYNAMIC ISOLATION SYSTEMS), que se aproxime a los resultados obtenidos en la tabla 27, con estos datos se recalcula el sistema de aislamiento y se obtienen los resultados tabulados en la tabla 28.

Finalmente, en la figura 47 se presenta un esquema con las dimensiones y configuraciones finales del aislador definido para analizar esta estructura, cabe mencionar que todos los parámetros calculados y expuestos en dicho esquema están dentro de los rangos permisibles del catálogo DIS (DYNAMIC ISOLATION SYSTEMS), que se encuentra en el Anexo 3 de esta investigación.

Tabla 27

Características del aislador LRB.

DESCRIPCIÓN		VALOR	UNIDAD
Área de plomo	A_p	0.0025	[m^2]
Diámetro del núcleo de plomo	D_{pb}	0.0559	[m]
Altura del caucho del aislador	H_r	0.2084	[m]
Altura del aislador	H	0.3620	[m]
Área del aislador (solo goma)	A	0.1445	[m^2]
Diámetro del aislador	D	0.4325	[m]
Módulo de corte del caucho	G	0.36	[MPa]
Factor de forma	S	17.72	[ul]
Rigidez del aislador con un núcleo de plomo	K_p	283730.58	[N/m]
Rigidez post-fluencia del aislador con núcleo de plomo	K_{2p}	205202.04	[N/m]
Rigidez elástica del aislador con núcleo de plomo	K_{1p}	2052020.45	[N/m]
Fuerza de fluencia del aislador	F_y	29146.5	[N]
Rigidez vertical	K_v	43570.8	[T/m]

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28

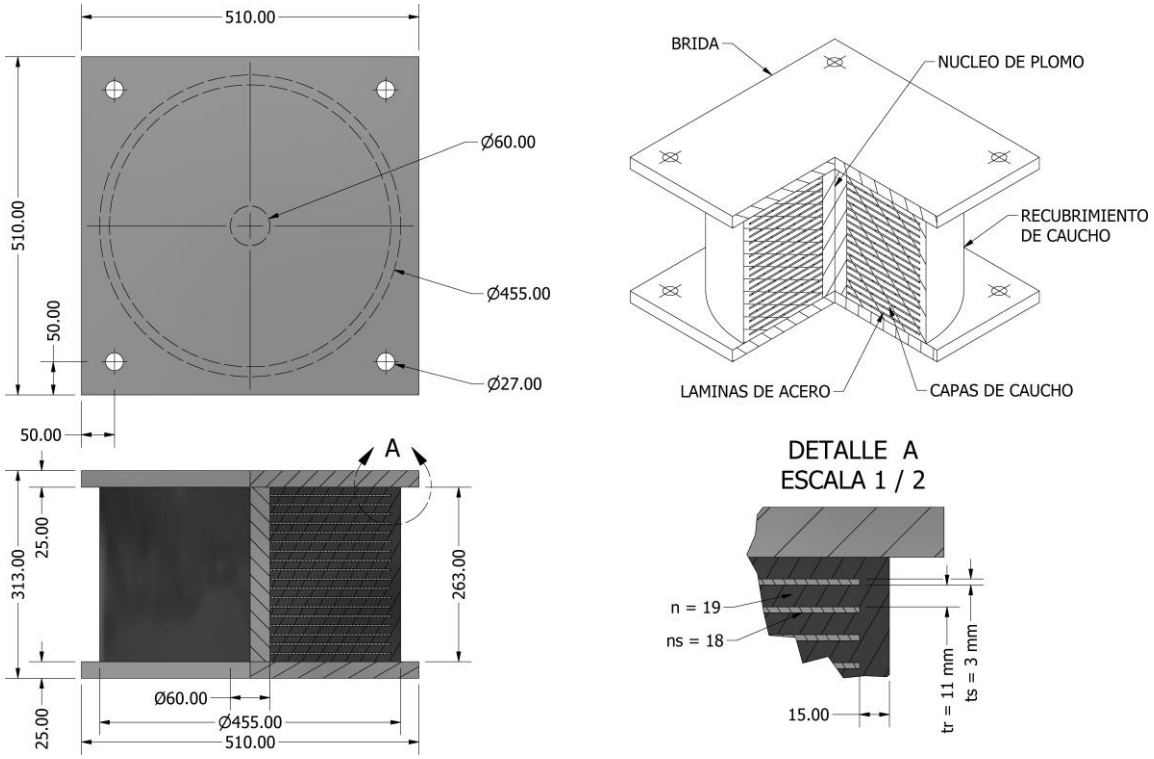
Características del aislador LRB propuesto del catálogo DIS.

DESCRIPCIÓN		VALOR	UNIDAD
Diámetro del núcleo de plomo	D_{pb}	0.0600	[m]
Área de plomo	A_p	0.0028	[m^2]
Diámetro del aislador	D	0.4550	[m]
Área del aislador (solo goma)	A	0.1598	[m^2]
Altura del caucho del aislador	H_r	0.2084	[m]
Altura del aislador	H	0.3130	[m]
Módulo de corte del caucho	G	0.40	[MPa]
Factor de forma	S	15.16	[ul]
Rigidez del aislador con un núcleo de plomo	K_p	352690.78	[N/m]
Rigidez post-fluencia del aislador con núcleo de plomo	K_{2p}	262233.57	[N/m]
Rigidez elástica del aislador con núcleo de plomo	K_{1p}	2622335.68	[N/m]
Fuerza de fluencia del aislador	F_y	35364.9	[N]
Rigidez vertical	K_v	31635.4	[T/m]

Fuente: Elaboración propia.

Figura 47

Dimensiones finales del aislador LRB.



Fuente: Elaboración propia

4.2.1.3. Simulación de aisladores sísmicos LRB en ARSAP.

Para continuar con el análisis de esta edificación es necesario que una vez modelado adecuadamente y diseñado el aislador sísmico, se debe crear un modelo en el software ARSAP para poder conocer el comportamiento del edificio implementando este sistema.

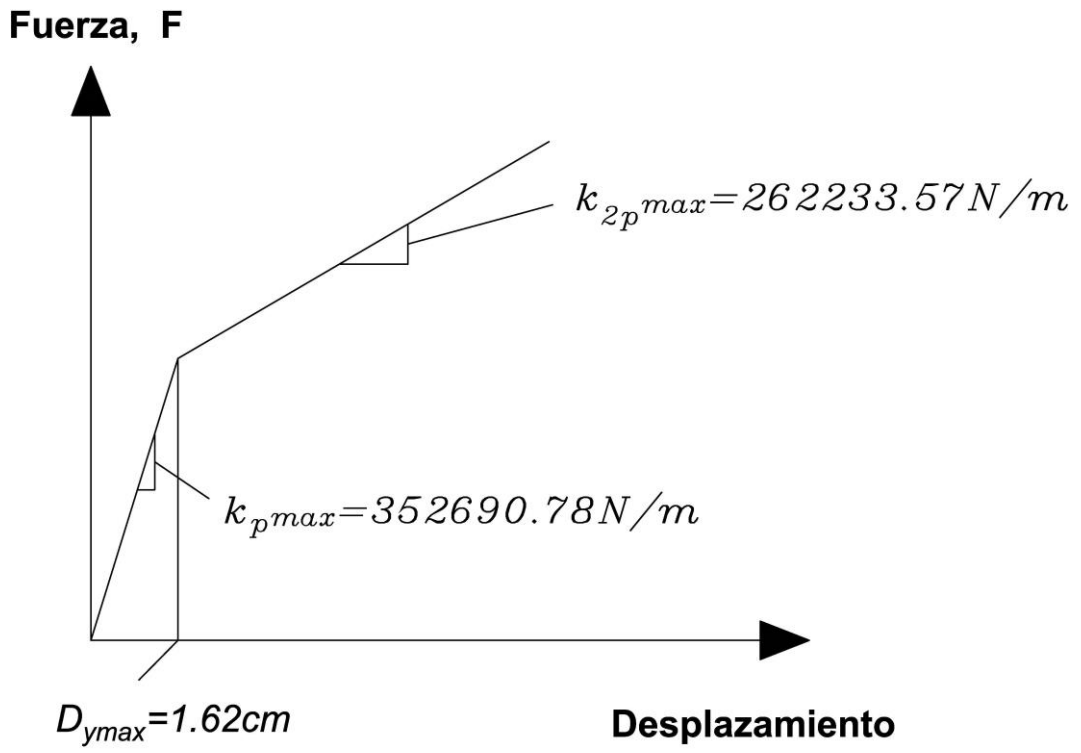
Dentro del modelado de las estructuras en paquetes computacionales, el software ARSAP, presenta dos métodos para crear este tipo de elementos: el primero es utilizando modelos bilineales de comportamiento y la segunda introduciendo una función con las características y propiedades del aislador.

Para el análisis de este edificio se modelarán los aisladores a través del primer método,

ya que simplemente es necesario calcular los parámetros del sistema bilineal que se analizaron en el punto anterior. Para esto, a partir de los resultados obtenidos en la tabla 28, se crea el modelo bilineal que se observa en la figura 48 y en donde están los valores que se necesitan introducir al ARSAP para crear el sistema de aislamiento sísmico.

Figura 48

Modelo bilineal de aislador LRB.

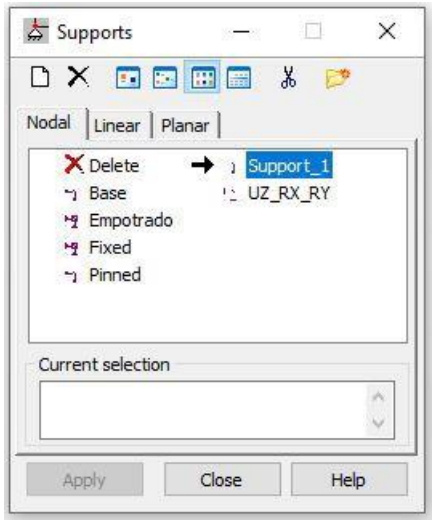


Fuente: Elaboración propia

Con los datos obtenidos de la figura 48, el paso siguiente es dirigirse al programa ARSAP e ingresamos a la opción geometría donde se selecciona la opción apoyos o "Supports", en esta ventana que se observa en la figura 49 es en donde se configura el aislador sísmico. En la figura 50 se observa la creación del aislador definiendo los parámetros de rigidez elástica, rigidez pos-fluencia y el desplazamiento pos-fluencia máximo del sistema.

Figura 49

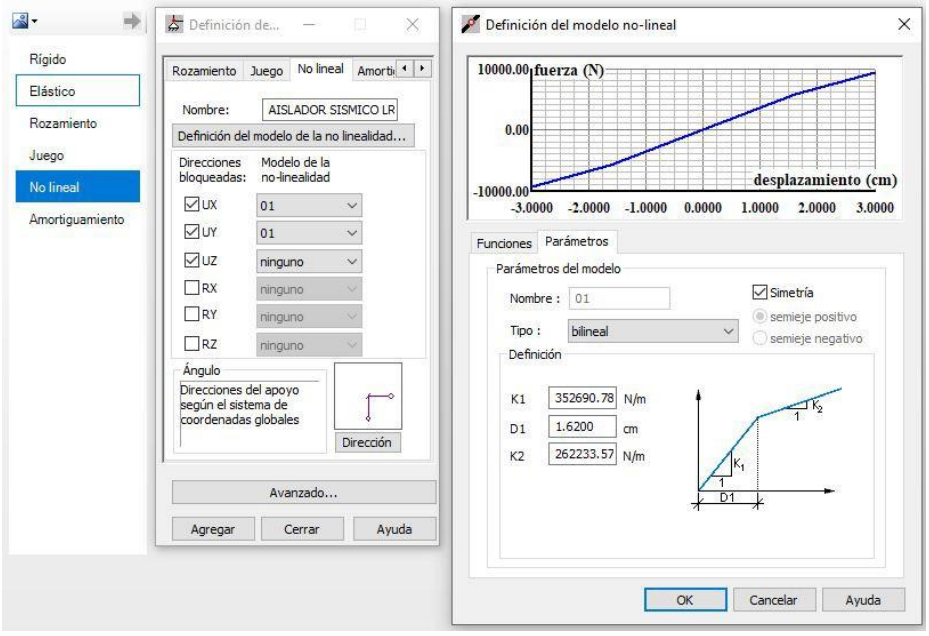
Interfaz de ARSAP para creación de aisladores sísmicos.



Fuente: ARSAP 2022

Figura 50

Creación de aislador sísmico en ARSAP.

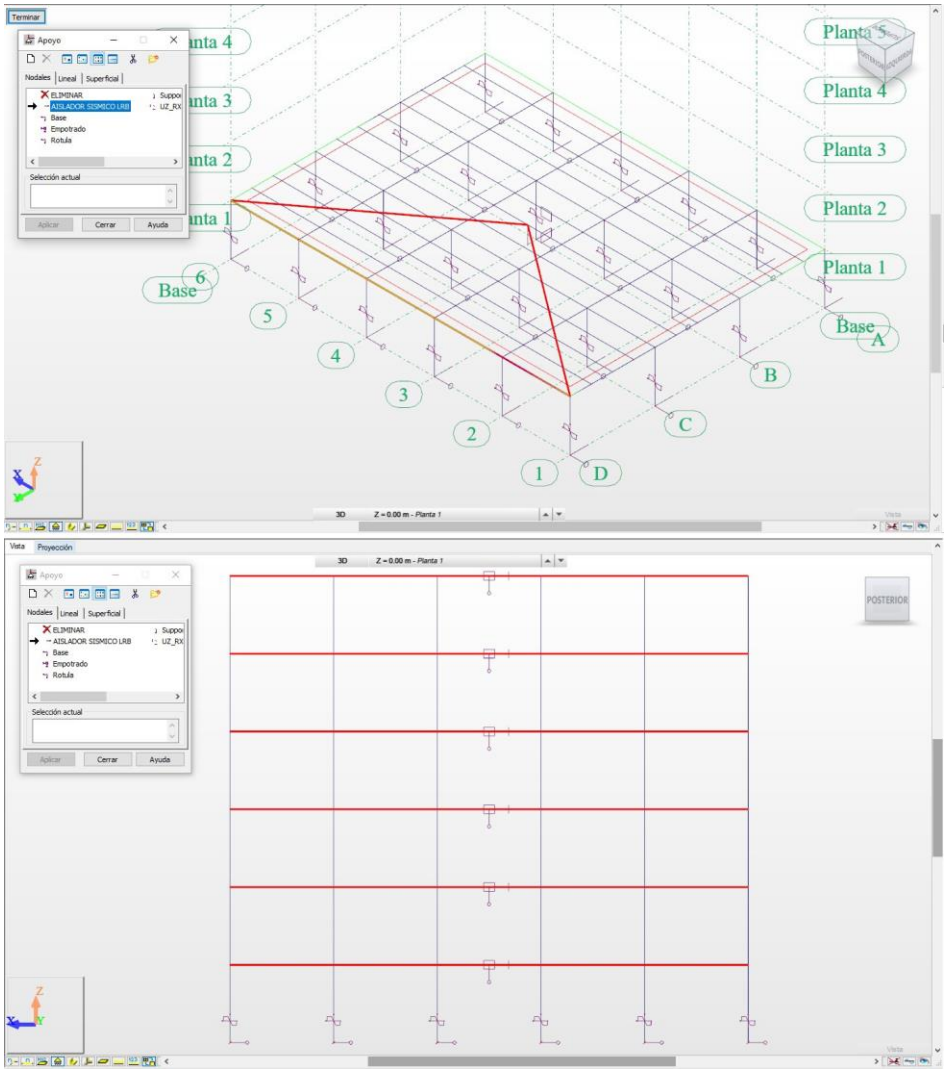


Fuente: ARSAP 2022

El último paso es asignar los aisladores creados a la estructura convencional, para esto, se seleccionan los apoyos fijos en la estructura actual y se asignan los nuevos apoyos creados como aisladores sísmicos, obteniendo como resultado la gráfica que se observa a continuación en la figura 51.

Figura 51

Asignación de aisladores sísmicos en el modelo estructural.



Fuente: ARSAP 2022

Finalmente, se realiza la simulación en el software ARSAP 2022, los datos obtenidos del análisis son presentados y analizados a continuación.

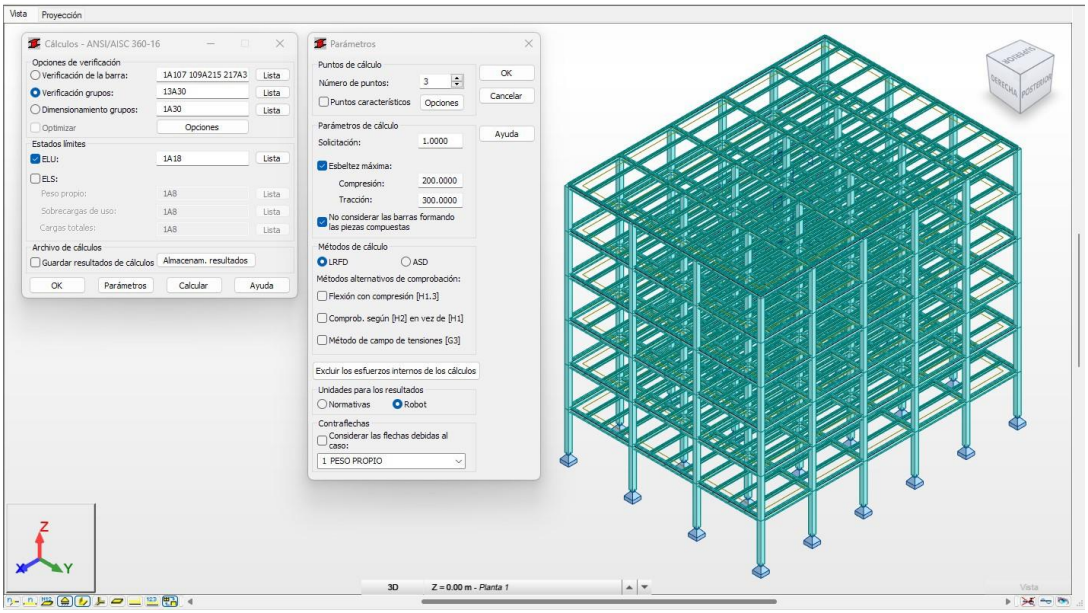
4.2.1.3.1. Cálculo y optimización del edificio con aisladores LRB.

Una vez finalizadas las configuraciones necesarias, el último paso es calcular las secciones y verificar si cumplen las solicitaciones de carga mínimas establecidas. Para esto se utiliza la norma ANSI/AISC 360-16, configurada previamente en el modelo de cálculo estructural.

En la figura 52 se observa la interfaz de configuración utilizada por el programa ARSAP para realizar el cálculo y validación estructural del edificio con aisladores elastoméricos LRB.

Figura 52

Configuración de cálculo de secciones con aisladores LRB en ARSAP.



Fuente: ARSAP 2022

Al utilizar aisladores sísmicos LRB se logra disminuir considerablemente la demanda sísmica en el edificio, por lo que podemos reducir el peso de la estructura modificando las secciones de las vigas y columnas. Esto se vuelve un proceso iterativo hasta conseguir las secciones adecuadas, siempre tomando en cuenta que debemos respetar que la relación demanda-capacidad se encuentre por debajo de 1. En la tabla 29 se observa las secciones de columnas finales optimizadas y empleadas en el diseño del edificio.

Tabla 29

Optimización de sección de columnas.

ANSI/AISC 360-16 - Verificación de grupos de barras (ELU) 1A6

Resultados | Mensajes

Barra		Perfil	Material	Lay	Laz	Solicit.	Caso
Grupo : 1 C PB							
10 Pilar_10	OK	C_300X8	ACERO A36	25.1566	25.1566	0.6049	11 1.2 (D1+D2) + L + SX
Grupo : 2 C P1							
115 Pilar_115	OK	C_300X6	ACERO A36	24.9896	24.9896	0.6383	11 1.2 (D1+D2) + L + SX
Grupo : 3 C P2							
223 Pilar_223	OK	C_300X5	ACERO A36	24.9065	24.9065	0.6971	11 1.2 (D1+D2) + L + SX
Grupo : 4 C P3							
331 Pilar_331	OK	C_300X5	ACERO A36	24.9065	24.9065	0.5593	11 1.2 (D1+D2) + L + SX
Grupo : 5 C P4							
440 Pilar_440	OK	C_300X4	ACERO A36	24.8236	24.8236	0.5742	11 1.2 (D1+D2) + L + SX
Grupo : 6 C P5							
548 Pilar_548	OK	C_300X4	ACERO A36	24.8236	24.8236	0.5856	11 1.2 (D1+D2) + L + SX

Fuente: ARSAP 2022.

En la tabla 30 se observa las secciones de vigas secundarias finales optimizadas y empleadas en el diseño del edificio.

Tabla 30

Optimización de sección de vigas secundarias.

ANSI/AISC 360-16 - Verificación de grupos de barras (ELU) 7A12

Resultados | Mensajes

Barra		Perfil	Material	Lay	Laz	Solicit.	Caso
Grupo : 7 VS PB							
102 Viga_102	OK	I-115X6-210X4	ACERO A36	45.2810	151.1097	0.8834	10 1.2 (D1+D2) + 1.6L
Grupo : 8 VS P1							
183 Viga_183	OK	I-115X6-210X4	ACERO A36	45.2810	151.1097	0.8833	10 1.2 (D1+D2) + 1.6L
Grupo : 9 VS P2							
291 Viga_291	OK	I-115X6-200X4	ACERO A36	47.3677	149.7145	0.9096	10 1.2 (D1+D2) + 1.6L
Grupo : 10 VS P3							
399 Viga_399	OK	I-115X6-200X4	ACERO A36	47.3677	149.7145	0.9097	10 1.2 (D1+D2) + 1.6L
Grupo : 11 VS P4							
512 Viga_512	OK	I-115X6-200X4	ACERO A36	47.3677	149.7145	0.9094	10 1.2 (D1+D2) + 1.6L
Grupo : 12 VS P5							
615 Viga_615	OK	I-105X6-200X3	ACERO A36	46.4600	158.7483	0.8883	10 1.2 (D1+D2) + 1.6L

Fuente: ARSAP 2022.

En la tabla 31 se observa las secciones de vigas principales finales optimizadas y empleadas en el diseño del edificio.

Tabla 31

Optimización de sección de vigas principales.

ANSI/AISC 360-16 - Verificación de grupos de barras (ELU) 13A30

Resultados | Mensajes

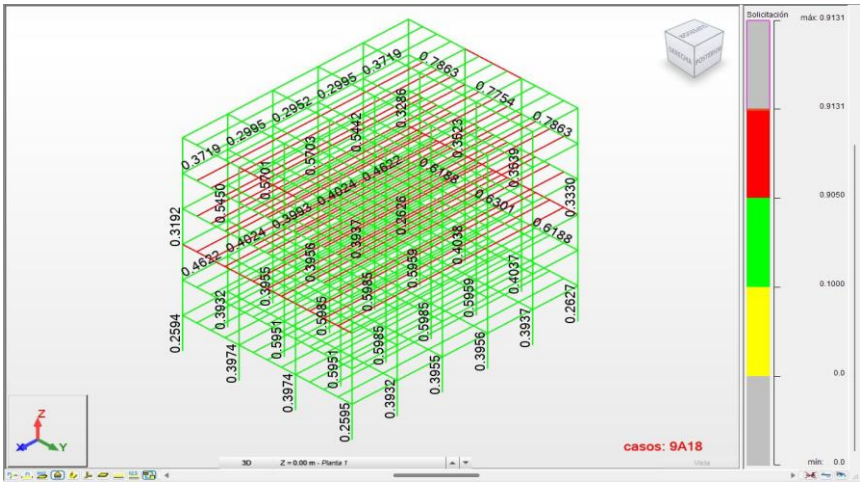
Barra	Perfil	Material	Lay	Laz	Solicit.	Caso
Grupo : 13 VP EXT PB						
25 Viga_25	OK I-160X8-340X6	ACERO A36	35.8599	143.5120	0.6838	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 14 VP EXT P1						
134 Viga_134	OK I-150X8-320X6	ACERO A36	38.1736	153.0953	0.6301	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 15 VP EXT P2						
242 Viga_242	OK I-130X8-290X5	ACERO A36	41.5602	171.5077	0.9105	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 16 VP EXT P3						
350 Viga_350	OK I-130X8-290X5	ACERO A36	41.5602	171.5077	0.8474	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 17 VP EXT P4						
457 Viga_457	OK I-130X8-290X5	ACERO A36	41.5602	171.5077	0.7863	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 18 VP EXT P5						
566 Viga_566	OK I-130X6-260X5	ACERO A36	47.1245	178.3934	0.9104	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 19 VP INT PB						
41 Viga_41	OK I-170X10-360X6	ACERO A36	33.1436	128.8278	0.7017	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 20 VP INT P1						
142 Viga_142	OK I-160X8-340X6	ACERO A36	35.8599	143.5120	0.8462	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 21 VP INT P2						
250 Viga_250	OK I-160X8-340X6	ACERO A36	35.8599	143.5120	0.7957	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 22 VP INT P3						
358 Viga_358	OK I-160X8-340X6	ACERO A36	35.8599	143.5120	0.7524	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 23 VP INT P4						
466 Viga_466	OK I-160X8-340X6	ACERO A36	35.8599	143.5120	0.7320	10 1.2 (D1+D2) + 1.6L
Grupo : 24 VP INT P5						
574 Viga_574	OK I-150X8-320X6	ACERO A36	38.1736	153.0953	0.6902	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 25 VP INT2 PB						
53 Viga_53	OK I-125X8-290X5	ACERO A36	33.3968	143.8145	0.8316	11 1.2 (D1+D2) + L + SX
Grupo : 26 VP INT2 P1						
156 Viga_156	OK I-120X6-260X4	ACERO A36	37.0713	150.0043	0.8982	11 1.2 (D1+D2) + L + SX
Grupo : 27 VP INT2 P2						
268 Viga_268	OK I-120X6-260X4	ACERO A36	37.0713	150.0043	0.8900	11 1.2 (D1+D2) + L + SX
Grupo : 28 VP INT2 P3						
376 Viga_376	OK I-120X6-260X4	ACERO A36	37.0713	150.0043	0.8373	11 1.2 (D1+D2) + L + SX
Grupo : 29 VP INT2 P4						
480 Viga_480	OK I-110X6-200X4	ACERO A36	47.5886	157.7620	0.9131	11 1.2 (D1+D2) + L + SX
Grupo : 30 VP INT2 P5						
592 Viga_592	OK I-100X6-200X3	ACERO A36	46.6746	167.9645	0.8818	11 1.2 (D1+D2) + L + SX

Fuente: ARSAP 2022.

En la figura 53 se observa las solicitaciones o ratios finales del sistema estructural optimizado. En la tabla 32 se observa el peso total de las secciones de vigas y columnas finales empleadas en el diseño del edificio.

Figura 53

Relación demanda-capacidad de la estructura con aisladores LRB.



Fuente: ARSAP 2022

Tabla 32

Peso de la estructura con aisladores LRB.

Tipo	Número	Longitud (m)	Peso por unidad (kG/m)	Peso de la barra (kG)	Peso total (kG)	Superficie pintada (m2)
ACERO A36						
C 300X4	48	3.00	37.18	111.53	5354	172.80
C 300X5	48	3.00	46.32	138.95	6669	172.80
C 300X6	24	3.00	55.39	166.17	3988	86.40
C 300X8	24	3.00	73.35	220.05	5281	86.40
I-100X6-200X3	10	4.00	13.85	55.39	554	31.76
I-105X6-200X3	45	4.00	14.32	57.27	2577	146.52
I-110X6-200X4	10	4.00	16.27	65.06	651	33.28
I-115X6-200X4	135	4.00	16.74	66.94	9038	460.08
I-115X6-210X4	90	4.00	17.05	68.20	6138	313.92
I-120X6-260X4	30	4.00	19.09	76.36	2291	119.04
I-125X8-290X5	10	4.00	26.45	105.82	1058	42.80
I-130X6-260X5	10	4.00	21.98	87.92	879	41.20
I-130X6-260X5	6	5.00	21.98	109.90	659	30.90
I-130X8-290X5	30	4.00	27.08	108.33	3250	130.80
I-130X8-290X5	18	5.00	27.08	135.41	2437	98.10
I-150X8-320X6	10	4.00	33.16	132.63	1326	49.12
I-150X8-320X6	18	5.00	33.16	165.79	2984	110.52
I-160X8-340X6	10	4.00	35.36	141.43	1414	52.32
I-160X8-340X6	54	5.00	35.36	176.78	9546	353.16
I-170X10-360X6	12	5.00	42.70	213.52	2562	83.28
Total						
C 300X4	48	144.00	37.18	5353.57	5354	172.80
C 300X5	48	144.00	46.32	6669.36	6669	172.80
C 300X6	24	72.00	55.39	3988.05	3988	86.40
C 300X8	24	72.00	73.35	5281.23	5281	86.40
I-100X6-200X3	10	40.00	13.85	553.90	554	31.76
I-105X6-200X3	45	180.00	14.32	2577.31	2577	146.52
I-110X6-200X4	10	40.00	16.27	650.61	651	33.28
I-115X6-200X4	135	540.00	16.74	9037.55	9038	460.08
I-115X6-210X4	90	360.00	17.05	6138.07	6138	313.92
I-120X6-260X4	30	120.00	19.09	2290.94	2291	119.04
I-125X8-290X5	10	40.00	26.45	1058.18	1058	42.80
I-130X6-260X5	16	70.00	21.98	1538.60	1539	72.10
I-130X8-290X5	48	210.00	27.08	5687.32	5687	228.90
I-150X8-320X6	28	130.00	33.16	4310.59	4311	159.64
I-160X8-340X6	64	310.00	35.36	10960.48	10960	405.48
I-170X10-360X6	12	60.00	42.70	2562.24	2562	83.28
Total:					68658	2615.20

Fuente: ARSAP 2022.

4.2.1.3.2. Comportamiento sísmico del Edificio con aisladores LRB.

Se efectuó el correspondiente análisis del edificio con aisladores elastoméricos con núcleo de plomo LRB mediante un análisis dinámico utilizando el espectro de diseño máximo esperado del suelo tipo D con ubicación en la ciudad de Cuenca, logrando obtener el desplazamiento máximo de cada piso, la distorsión máxima de cada piso y la fuerza cortante basal en cada dirección.

En las figuras 54 y 55 se puede observar que el desplazamiento máximo en el sentido X de los aisladores es igual a 4.75 cm, el último nivel llega a un desplazamiento de 6.88 cm, obteniéndose un desplazamiento máximo de 2.12 cm del edificio en X. La deriva máxima en el sentido X es igual a 1.2% la cual ocurre en el segundo nivel y está muy por debajo de la deriva límite del 2%. En las figuras 56 y 57 se puede ver que el desplazamiento máximo del aislador en el sentido Y es igual a 4.18 cm, en el último nivel el edificio llega a un desplazamiento de 4.77 cm, obteniéndose un desplazamiento máximo de 0.54 cm del edificio en Y. La deriva máxima es igual a 0.42% la cual también ocurre en el segundo nivel del edificio y está debajo de la deriva límite del 2 % que establece la norma NEC. El cortante basal máximo se puede observar en las figuras 58 y 59; en sentido X es igual a 337.88 KN y en sentido Y es igual a 247.2 KN.

Figura 54

Desplazamiento máximo en sentido X estructura con aisladores sísmicos.

Fuente: Elaboración propia

Figura 55

Derivas máximas en sentido X estructura con aisladores sísmicos.

Fuente: Elaboración propia

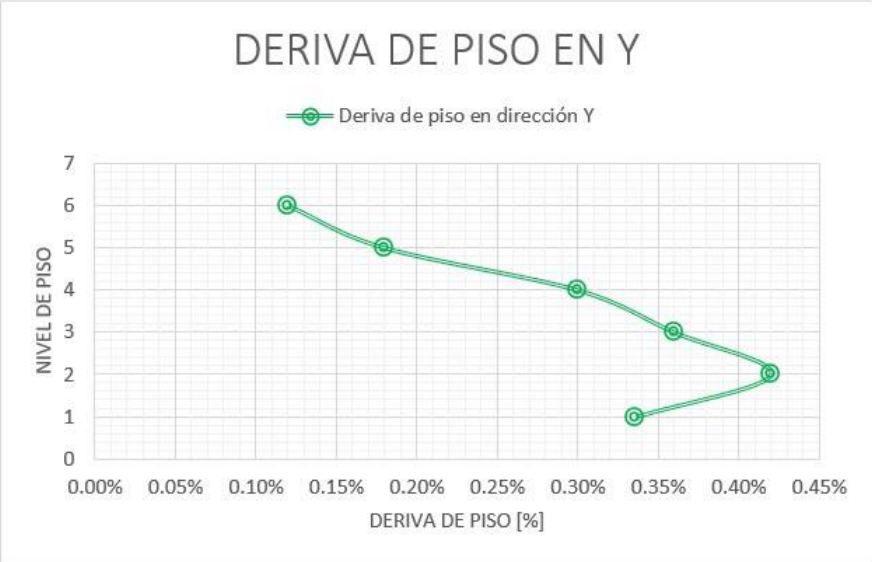
Figura 56

Desplazamiento máximo en sentido Y estructura con aisladores sísmicos.

Fuente: Elaboración propia

Figura 57

Derivas máximas en sentido Y estructura con aisladores sísmicos.



Fuente: Elaboración propia

Figura 58

Cortante basal máximo en sentido X estructura con aisladores sísmicos.

Fuente: Elaboración propia

Figura 59

Cortante basal máximo en sentido Y estructura con aisladores sísmicos.

Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Simulación de la edificación con disipadores sísmicos en ARSAP 2022.

En este apartado de la investigación se realiza el análisis y la simulación del edificio utilizando los disipadores sísmicos de fricción restringidos a la ductilidad CRD, para lo cual se definirán las características y parámetros de diseño necesarios para realizar el dimensionamiento de estos elementos en la edificación y su posterior cálculo y resultados de desempeño sísmico.

4.2.2.1. Parámetros de diseño de los disipadores sísmicos de fricción.

Los disipadores sísmicos de fricción se modelan como contravientos bilineales "Link" comunes. Por tanto, se modela como un brazo metálico siguiendo un modelo de material elástico-plástico, al igual que cualquier elemento metálico (por ejemplo barras, perfiles U, I o perfil tubular). Este modelo se llama modelo de Wen y no es más que una linealización de la curva fuerza-deformación. La mayor diferencia con este modelo ficticio es que no llega a romperse en el rango plástico y absorbe energía durante múltiples ciclos de carga, simulando el comportamiento del freno sísmico.

Independientemente del tipo de análisis estructural (estático, dinámico o espectral), el disipador siempre se comporta como cualquier otro elemento de la estructura (vigas o columnas), es decir, es parte integral de la estructura.

En caso de terremoto, el contraviento no se deforma, sino que activa el disipador de energía antes de que el brazo alcance su límite elástico, absorbiendo la energía sísmica en la fricción de sus componentes. Por ello, una vez pasado el terremoto, los disipadores y contravientos volverán a su posición original. A continuación, se presentan los parámetros de diseño de este tipo de dispositivos que serán utilizados para el análisis de la edificación.

- Localización de los disipadores

Los disipadores tienen las mismas propiedades en tensión y compresión, por lo que pueden ubicarse prácticamente en cualquier lugar de la estructura, independientemente de su orientación con respecto a las fuerzas laterales. Los disipadores pueden ser colocados y orientados donde se le requieran o donde las restricciones arquitectónicas lo permitan. No es necesario que tengan continuidad vertical ni horizontal.

Pero técnicamente hablando, cuanto más simétrica sea su distribución alrededor del centro rígido del modelo, menos complejo será el comportamiento de la estructura.

- Cantidad de disipadores por piso

Según criterio del diseñador estructural, el número de disipadores por piso varía según la distribución de la resistencia lateral de la estructura. Entonces, hay 2 opciones:

1. El número de disipadores en cada piso es el mismo, aunque la resistencia de un arriostramiento en una estructura disminuye proporcionalmente con la altura del piso sobre el que se instala, al igual que el cortante basal sísmico en un edificio.
2. La cantidad de disipadores varía según el piso y el diseñador puede reducir proporcionalmente la cantidad de soportes de un piso a otro en función de la fuerza cortante sísmica de cada piso. Los disipadores tienen una resistencia similar en todos los niveles, pero en general añaden menos resistencia a medida que aumenta la elevación del suelo donde se instalan.

- Fuerza de respuesta óptima

Lo que se hace, es buscar una fuerza óptima que reparta eficientemente la cortante sísmica del piso entre los frenos sísmicos y la estructura. Esto garantiza que la máxima cantidad de energía es absorbida por los aparatos y al mismo tiempo que se transmita la menor cantidad de energía posible a la estructura. Se ha encontrado que esta fuerza es siempre menor al 50% del cortante plástico del piso, pero variará de acuerdo con las restricciones que el diseñador encuentre en su proyecto y a otros criterios de desempeño que este desee cumplir.

- Área de la sección transversal

El área de la sección transversal del link determina en gran medida su rigidez lateral y axial inicial. Por lo tanto, la fuerza cortante se obtiene dividiendo la fuerza cortante transferida al CRD por el coseno del ángulo que forma el CRD con el piso. El ARSAP permite conocer la fuerza directa en cada barra de los contravientos. Luego simplemente se encuentra el área que, según las recomendaciones de estándares internacionales, es 1,3 veces la fuerza de accionamiento.

$$A_t = \frac{1.3 \cdot F_{CRD}}{\sigma} \tag{32}$$

Donde:

A_t: Área de la sección transversal del link

F_{CRD}: Fuerza de respuesta de CRD

σ: Esfuerzo último = 250000 KN/m^2

- Rigidez Axial

La rigidez inicial axial es la que se le introduce al software como la rigidez del "link" y está dada por:

$$K = \frac{A \cdot E}{L} \tag{33}$$

Donde:

K: Rigidez axial del link

E: Módulo de elasticidad = 200 GPa

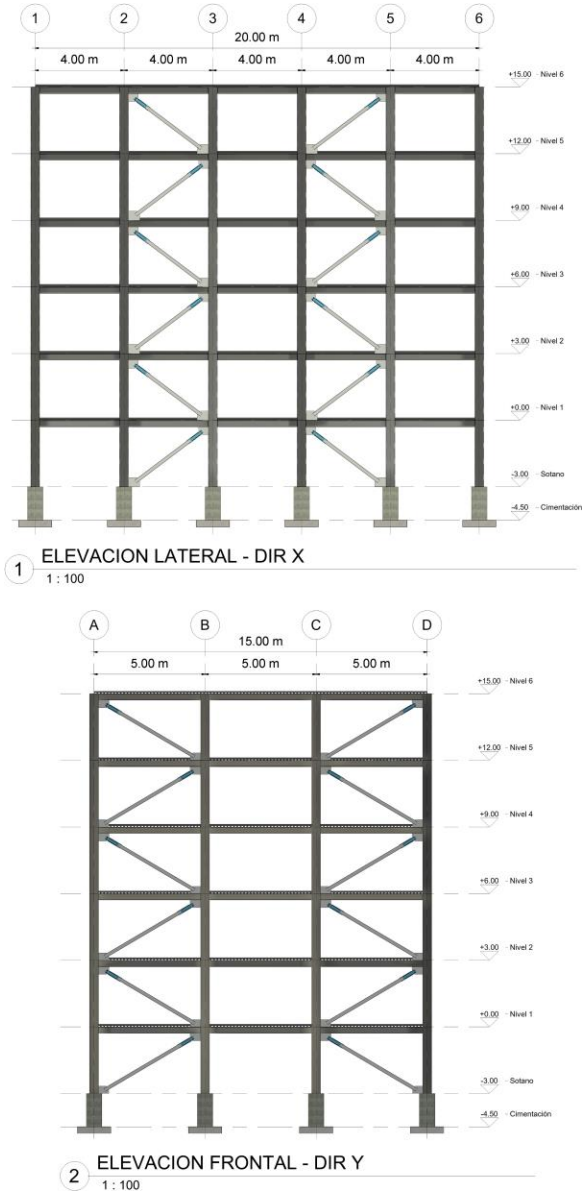
L: Longitud del link

4.2.2.2. Caracterización del edificio con disipadores sísmicos de fricción CRD.

Con los parámetros y características conocidas se procede a realizar la configuración de los disipadores que se utilizaran en la edificación. En la figura 60 se puede observar que la disposición final asignada al modelo fue la configuración en diagonal y el número total de disipadores tanto para la dirección X e Y es de 4 en cada nivel del edificio.

Figura 60

Configuración de disipadores utilizados en la edificación.

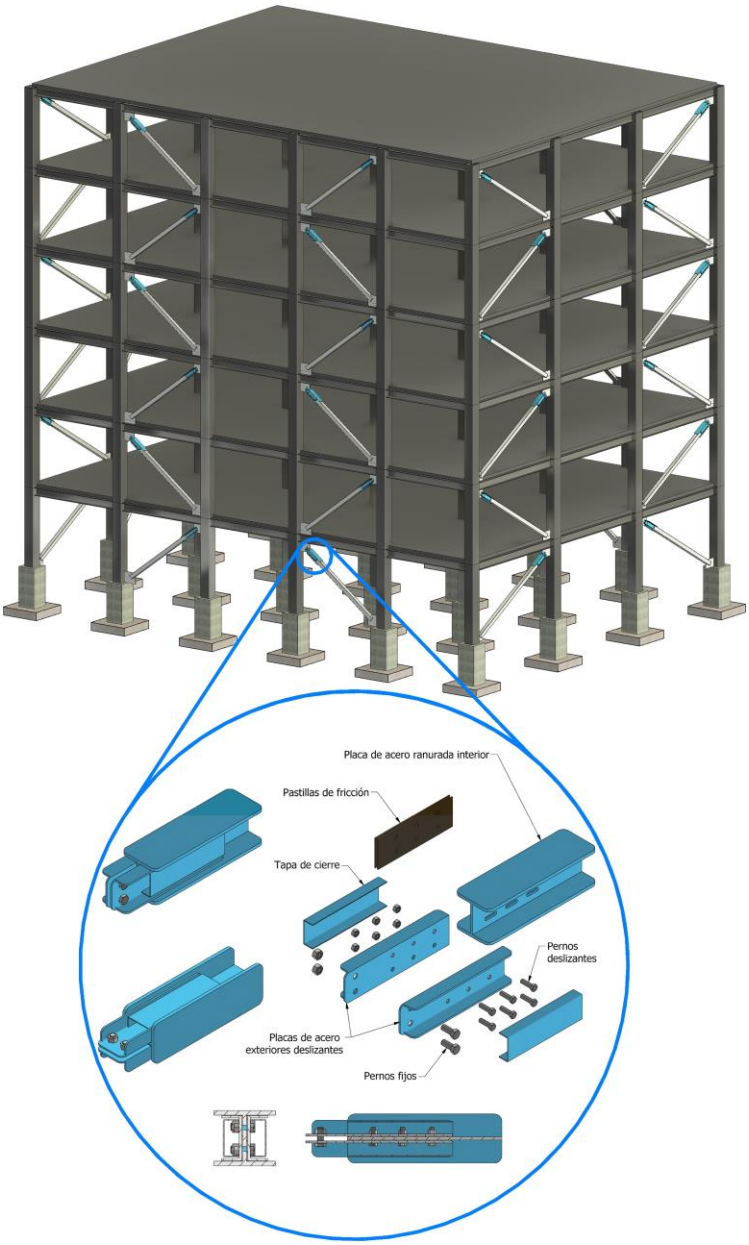


Fuente: Elaboración propia

En la figura 61 se observa la distribución final en perspectiva de los disipadores sísmicos empleados en la edificación y un detalle constructivo de los componentes que utilizan estos dispositivos.

Figura 61

Perspectiva y detalle de disipadores sísmicos de fricción CRD en la edificación.



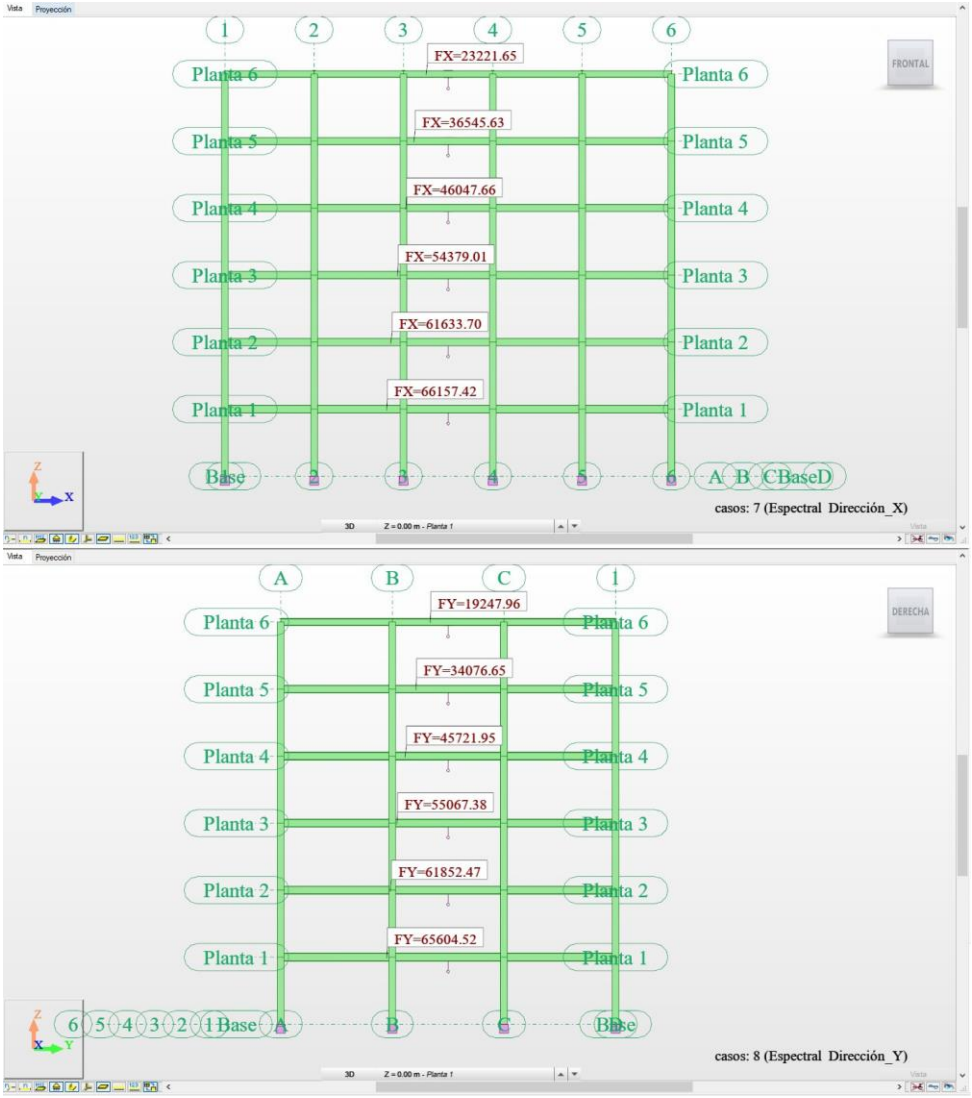
Fuente: Elaboración propia

4.2.2.3. Cálculo de los disipadores de fricción CRD para la edificación.

Los resultados obtenidos del modelo convencional de la estructura del edificio, se utilizan para determinar los parámetros necesarios que se deben introducir en el modelo matemático de la estructura con los disipadores sísmicos de fricción. La figura 62 presenta los datos de los cortantes basales por piso obtenidos del modelo estructural convencional optimizado a través del análisis dinámico en el programa ARSAP 2022.

Figura 62

Datos obtenidos del modelo convencional en ARSAP 2022.



Fuente: ARSAP 2022

Se recomienda que la fuerza dé respuesta óptima máxima para garantizar la absorción de energía para una configuración de marco determinada y una fuerza lateral determinada, está por debajo del 50% de la fuerza cortante del piso, pero queda a criterio del diseñador estructural la selección de estas fuerzas dependiendo de sus limitaciones y objetivos.

La Tabla 33 presenta los datos preliminares obtenidos del modelo convencional y las fuerzas de respuesta esperadas para los disipadores sísmicos que, en este caso, se ha considerado en un 40% de las fuerzas de cortante basal obtenidas del análisis dinámico.

Tabla 33

Fuerzas de respuesta esperadas por nivel para los disipadores de fricción CRD.

NIVEL	CASO DE CARGA	CORTANTE BASAL DINAMICO		FUERZAS DE RESPUESTA ESPERADA POR CRD	
		VX [Kgf]	VY [Kgf]	40%VX [Kgf]	40%VY [Kgf]
PB	*Espectral sismico Cuenca suelo D*	66157.42	65604.52	26462.968	26241.81
1	*Espectral sismico Cuenca suelo D*	61633.70	61852.47	24653.48	24740.99
2	*Espectral sismico Cuenca suelo D*	54379.01	55067.38	21751.604	22026.95
3	*Espectral sismico Cuenca suelo D*	46047.66	45721.95	18419.064	18288.78
4	*Espectral sismico Cuenca suelo D*	36545.63	34076.65	14618.252	13630.66
5	*Espectral sismico Cuenca suelo D*	23221.65	19247.96	9288.66	7699.18

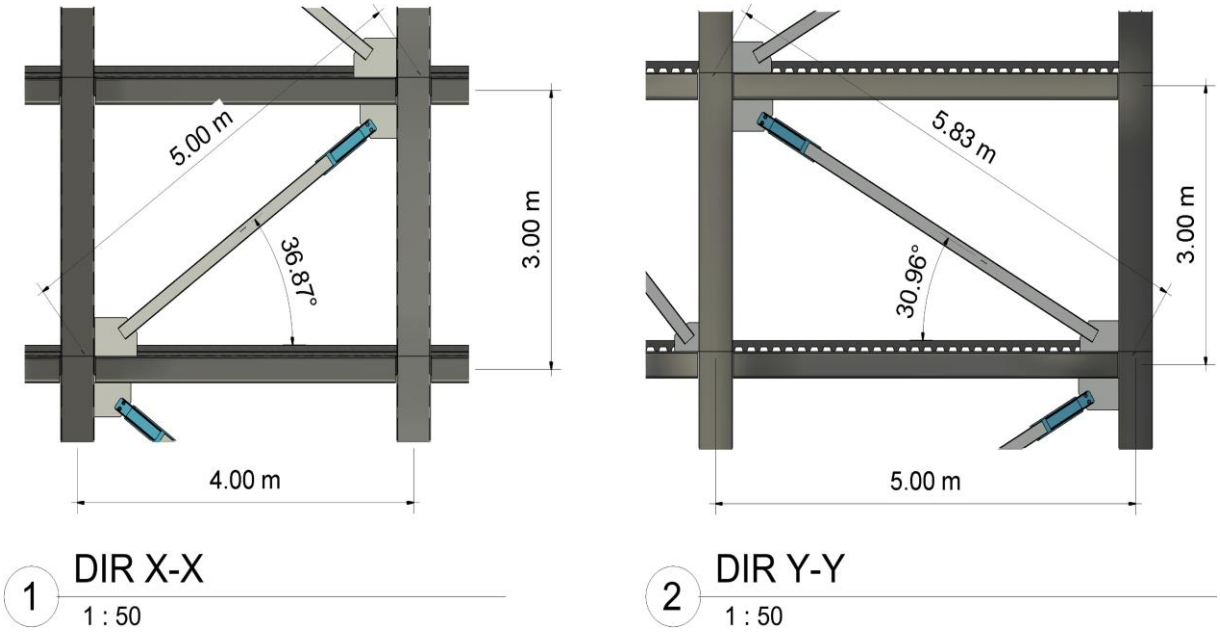
Fuente: Elaboración propia.

Para edificios de gran altura, la fuerza de respuesta o accionamiento deberá ser modificada si no resulta ser al menos 30% mayor que otras cargas de servicio (viento regular). Esto porque no se desea que los disipadores se activen en la estructura con fuerzas de servicio normal cuando no es necesario.

La figura 63 presenta las características y dimensiones geométricas de los contravientos en ambas direcciones de la estructura, estos datos nos servirán para calcular los parámetros finales de los disipadores que serán utilizados en el software ARSAP para realizar el análisis estructural.

Figura 63

Dimensiones de contravientos en ejes X e Y.



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 34 se muestra el cálculo del número de disipadores y área de la sección transversal mínima de los contravientos necesarios para cada nivel y dirección del edificio. El cálculo se basa en un 40% de corte del piso para obtener los máximos beneficios.

Tabla 34

Parámetros de diseño de disipadores de fricción.

NIVEL	FUERZA DE RESPUESTA CALCULADA POR PISO [KN]		CANTIDAD DISIPADORES EN X	CANTIDAD DISIPADORES EN Y	FUERZA DE RESPUESTA CALCULADA POR DISIPADOR [KN]		AREA TRANSVERSAL [cm^2]	
	X	Y			X	Y	X	Y
PB	259.6	257.4	*4*	*4*	96.07	71.68	4.996	3.727
1	241.9	242.7	*4*	*4*	89.50	67.58	4.654	3.514
2	213.4	216.1	*4*	*4*	78.97	60.17	4.106	3.129
3	180.7	179.4	*4*	*4*	66.87	49.96	3.477	2.598
4	143.4	133.7	*4*	*4*	53.07	37.23	2.760	1.936
5	91.1	75.5	*4*	*4*	33.72	21.03	1.754	1.094

Fuente: Elaboración propia.

Con base en los parámetros previamente calculados y la longitud de cada contraviento o arriostramiento, se calcula y agrupa la rigidez, obteniéndose finalmente 6 tipos de disipadores de energía que pueden soportar fuerza de corte en cada piso, los parámetros finales de estos disipadores de energía se dan en la Tabla 35.

La distribución de los disipadores de fricción en este edificio está relacionada con la arquitectura y la forma en que se espera que se distribuya la resistencia. Esta estructura no presenta ningún tipo de irregularidad en planta o elevación, por tal motivo los disipadores fueron distribuidos en cada piso en los ejes 2-3 y 4-5 en dirección X y A-B y C-D en dirección Y, para obtener las mayores prestaciones del sistema de disipación de energía.

Tabla 35

Rigidez de disipadores de fricción.

NIVEL	FUERZA DE RESPUESTA POR DISIPADOR [KN]		RIGIDEZ EN X [KN/m]	RIGIDEZ EN Y [KN/m]
	X	Y		
PB	96.07	71.68	*19983.2*	*12786.8*
1	89.50	67.58	*18616.8*	*12055.5*
2	78.97	60.17	*16425.5*	*10733.0*
3	66.87	49.96	*13909.0*	*8911.5*
4	53.07	37.23	*11038.8*	*6641.8*
5	33.72	21.03	*7014.2*	*3751.6*

Fuente: Elaboración propia.

Si se analizan los datos que presenta la tabla 35 se observa que para cada piso se necesita un disipador diferente; sin embargo, por cuestiones económicas y constructivas de este tipo de dispositivos no se recomiendan dichas configuraciones, por lo que los disipadores se seleccionaran de un catálogo de la empresa canadiense QUAKETEK Inc, con base en la fuerza de accionamiento que se necesita aproximando a los valores calculados, este catálogo se encuentra en el Anexo 4. En la tabla 36 se observan los valores finales seleccionados del catálogo y que servirán para este análisis de la estructura.

Tabla 36

Parámetros finales para modelación de disipadores en ARSAP 2022.

NIVEL	FUERZA DE RESPUESTA POR DISIPADOR [KN]		RIGIDEZ EN X [KN/m]	RIGIDEZ EN Y [KN/m]
	X	Y		
PB	100.00	100.00	*20800.0*	*17838.8*
1	100.00	100.00	*20800.0*	*17838.8*
2	100.00	100.00	*20800.0*	*17838.8*
3	75.00	75.00	*15600.0*	*13379.1*
4	75.00	75.00	*15600.0*	*13379.1*
5	75.00	75.00	*15600.0*	*13379.1*

Fuente: Elaboración propia.

En el software, el disipador de energía se modela como un soporte metálico común que sufre una deformación inelástica cuando la tensión o compresión excede su límite elástico. Después de un terremoto, se deben reemplazar los cortavientos. En cambio, lo que realmente sucede es que los disipadores evitan que los brazos del soporte real se deformen; en cambio, los disipadores se activan antes de que el soporte alcance su límite elástico, absorbiendo la energía sísmica de la fricción de sus componentes. Por lo tanto, una vez pasado el terremoto, los disipadores y contravientos se restablecen a sus posiciones originales sin necesidad de sustitución, protegiendo así la estructura de cualquier daño.

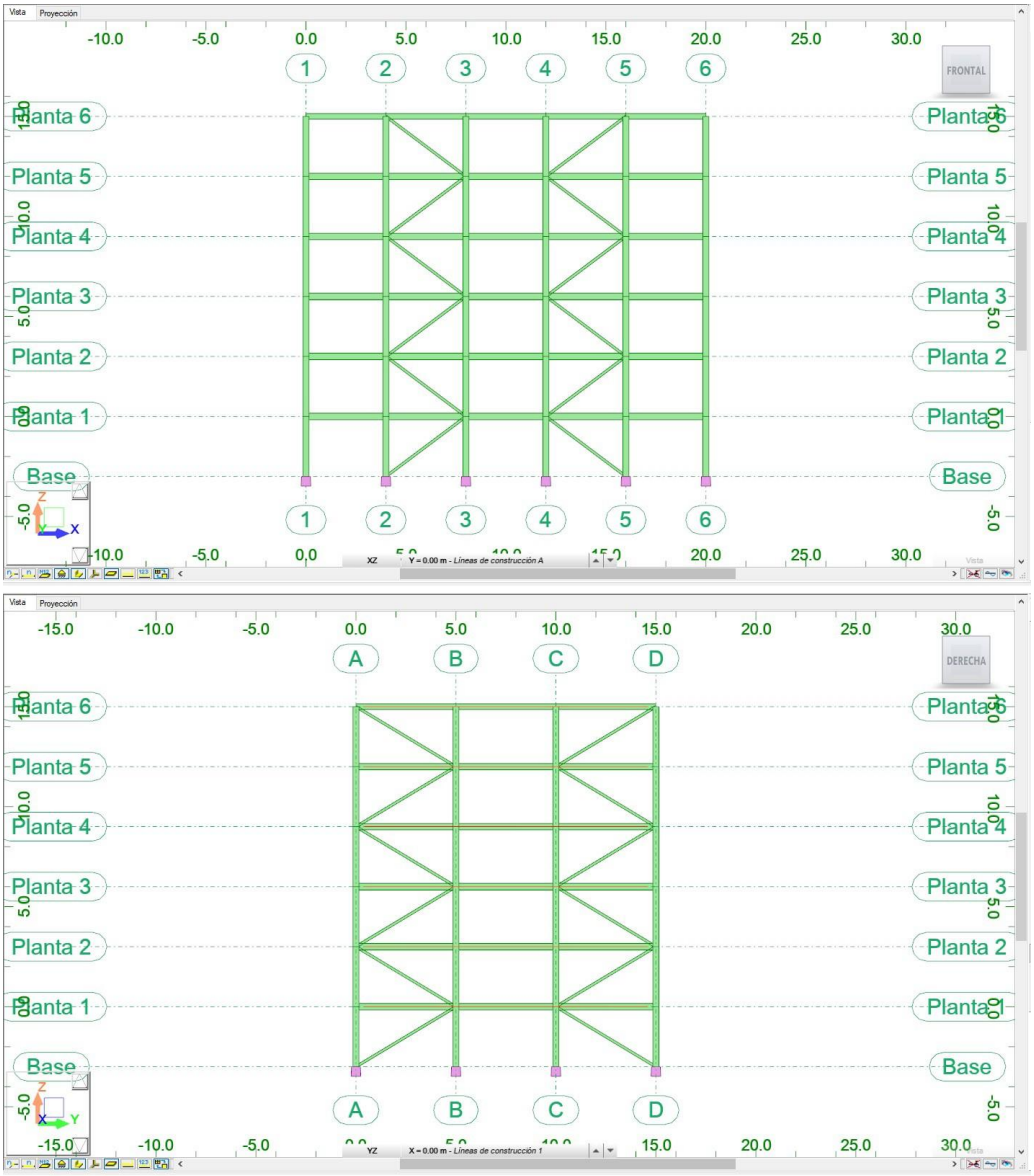
4.2.2.4. Simulación de disipadores sísmicos CRD en ARSAP.

Con todos los parámetros calculados, el primer paso es introducir los links en el modelo. Sin importar que software usemos para el análisis de la estructura, los parámetros son siempre los mismos que se tienen en la tabla 36.

En la figura 64 se pueden observar los elementos links introducidos en el modelo como simples contravientos, que después serán configurados con los parámetros respectivos para poder realizar el análisis estructural del edificio.

Figura 64

Creación de elementos Links en ARSAP 2022.

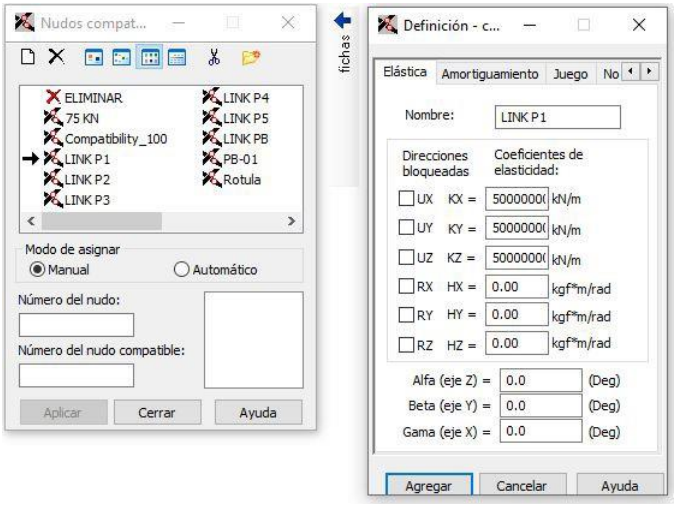


Fuente: ARSAP 2022

Una vez los Contravientos "Link" han sido integrados en el modelo, se introduce los parámetros de la tabla 36 en los elementos correspondientes, quedando el edificio listo para correr el análisis. Los parámetros que se han introducido hasta este paso y que se observan en la figura 65, son suficientes para realizar cualquier tipo de análisis: estático, lineal y no lineal o dinámico, Lineal y no lineal.

Figura 65

Creación de parámetros para disipadores en ARSAP 2022.

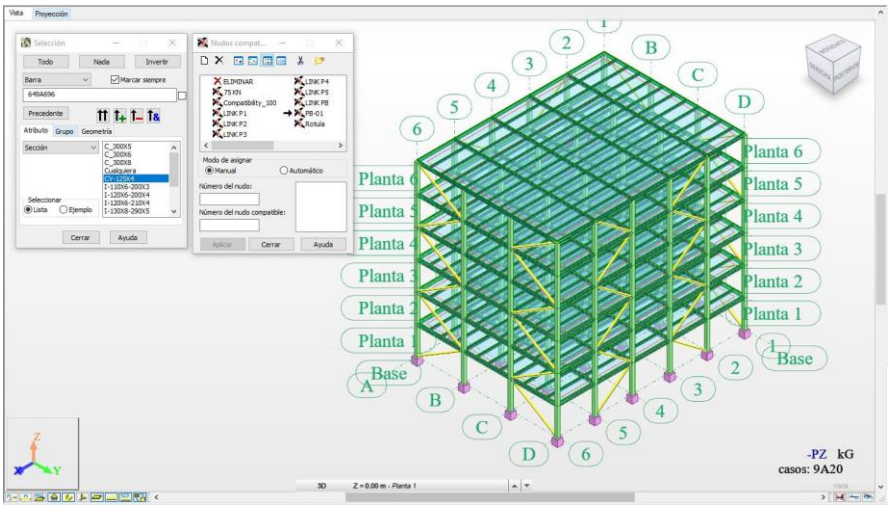


Fuente: ARSAP 2022

Finalmente, se asignan las propiedades creadas a cada disipador correspondiente en ambas direcciones, como se observa en la figura 66. El modelo está listo para iniciar el análisis, cuyos resultados se detallan a continuación.

Figura 66

Asignación y disposición final de disipadores en el edificio.



Fuente: ARSAP 2022

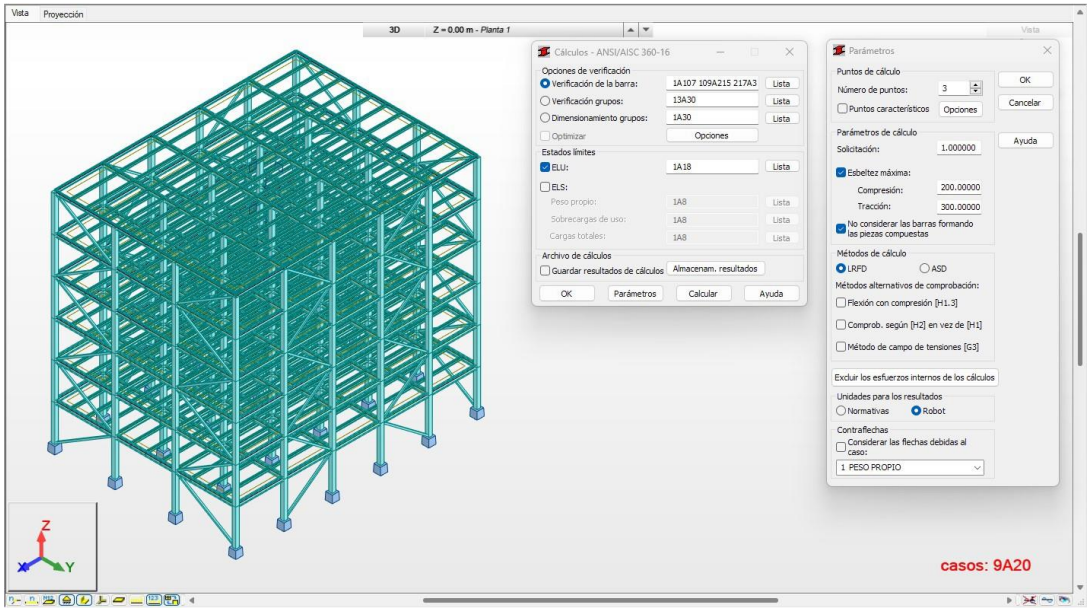
4.2.2.4.1. Cálculo y optimización del edificio con disipadores CRD.

Una vez finalizadas las configuraciones necesarias, el último paso es calcular las secciones y verificar si cumplen las solicitaciones de carga mínimas establecidas. Para esto se utiliza la norma ANSI/AISC 360-16, configurada previamente en el modelo de cálculo estructural.

En la figura 67 se observa la interfaz de configuración utilizada por el programa ARSAP para realizar el cálculo y validación estructural del edificio con disipadores de fricción CRD.

Figura 67

Configuración de cálculo de secciones con disipadores CRD en ARSAP.



Fuente: ARSAP 2022

Al utilizar disipadores sísmicos CRD se logra disminuir considerablemente la demanda sísmica en el edificio, por lo que podemos reducir el peso de la estructura modificando las secciones de las vigas y columnas. Esto se vuelve un proceso iterativo hasta conseguir las secciones adecuadas, siempre tomando en cuenta que debemos respetar que la relación demanda-capacidad se encuentre por debajo de 1. En la tabla 37 se observa las secciones de columnas finales optimizadas y empleadas en el diseño del edificio.

Tabla 37

Optimización de sección de columnas.

ANSI/AISC 360-16 - Verificación de grupos de barras (ELU) 1A6

Resultados | Mensajes

Barra		Perfil	Material	Lay	Laz	Solicit.	Caso
Grupo : 1 C PB							
15 Pilar_15	OK	C_300X6	ACERO A36	24.9896	24.9896	0.7068	11 1.2 (D1+D2) + L + SX
Grupo : 2 C P1							
115 Pilar_115	OK	C_300X6	ACERO A36	24.9896	24.9896	0.6105	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 3 C P2							
223 Pilar_223	OK	C_300X5	ACERO A36	24.9065	24.9065	0.6916	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 4 C P3							
331 Pilar_331	OK	C_300X4	ACERO A36	24.8236	24.8236	0.7974	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 5 C P4							
444 Pilar_444	OK	C_300X4	ACERO A36	24.8236	24.8236	0.6266	11 1.2 (D1+D2) + L + SX
Grupo : 6 C P5							
548 Pilar_548	OK	C_300X4	ACERO A36	24.8236	24.8236	0.5935	11 1.2 (D1+D2) + L + SX

Fuente: ARSAP 2022.

En la tabla 38 se observa las secciones de vigas secundarias finales optimizadas y empleadas en el diseño del edificio.

Tabla 38

Optimización de sección de vigas secundarias.

ANSI/AISC 360-16 - Verificación de grupos de barras (ELU) 7A12

Resultados | Mensajes

Barra		Perfil	Material	Lay	Laz	Solicit.	Caso
Grupo : 7 VS PB							
75 Viga_75	OK	I-115X6-210X4	ACERO A36	45.2810	151.1097	0.8833	10 1.2 (D1+D2) + 1.6L
Grupo : 8 VS P1							
183 Viga_183	OK	I-115X6-210X4	ACERO A36	45.2810	151.1097	0.8834	10 1.2 (D1+D2) + 1.6L
Grupo : 9 VS P2							
291 Viga_291	OK	I-120X6-200X4	ACERO A36	47.1617	142.4238	0.8350	10 1.2 (D1+D2) + 1.6L
Grupo : 10 VS P3							
399 Viga_399	OK	I-115X6-200X4	ACERO A36	47.3677	149.7145	0.9099	10 1.2 (D1+D2) + 1.6L
Grupo : 11 VS P4							
507 Viga_507	OK	I-115X6-200X4	ACERO A36	47.3677	149.7145	0.9094	10 1.2 (D1+D2) + 1.6L
Grupo : 12 VS P5							
615 Viga_615	OK	I-105X6-200X3	ACERO A36	46.4600	158.7483	0.8884	10 1.2 (D1+D2) + 1.6L

Fuente: ARSAP 2022.

En la tabla 39 se observa las secciones de vigas principales finales optimizadas y empleadas en el diseño del edificio.

Tabla 39

Optimización de sección de vigas principales.

ANSI/AISC 360-16 - Verificación de grupos de barras (ELU) 13A30

Resultados | Mensajes

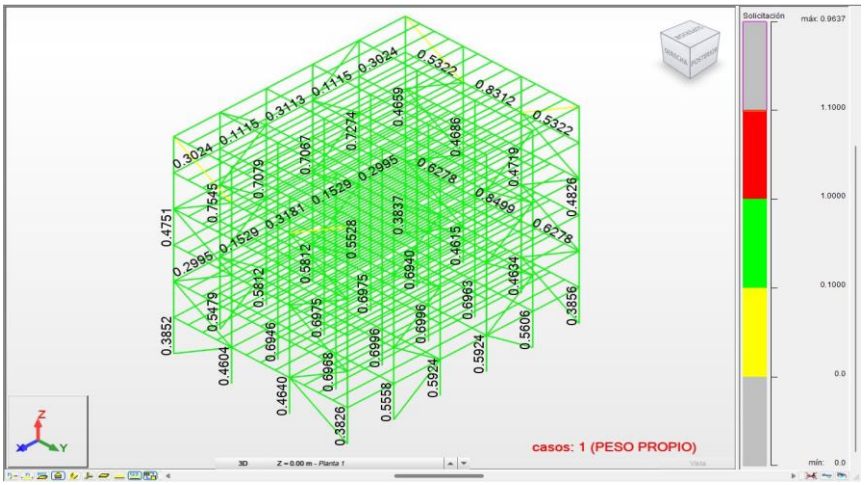
Barra	Perfil	Material	Lay	Laz	Solicit.	Caso
Grupo : 13 VP EXT PB						
26 Viga_26	OK I-140X8-320X6	ACERO A36	38.4923	166.5179	0.8137	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 14 VP EXT P1						
134 Viga_134	OK I-140X8-320X6	ACERO A36	38.4923	166.5179	0.8499	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 15 VP EXT P2						
242 Viga_242	OK I-140X8-320X6	ACERO A36	38.4923	166.5179	0.8701	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 16 VP EXT P3						
350 Viga_350	OK I-140X8-320X6	ACERO A36	38.4923	166.5179	0.8566	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 17 VP EXT P4						
458 Viga_458	OK I-140X8-320X6	ACERO A36	38.4923	166.5179	0.8312	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 18 VP EXT P5						
566 Viga_566	OK I-130X8-290X5	ACERO A36	41.5602	171.5077	0.8344	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 19 VP INT PB						
44 Viga_44	OK I-160X8-340X6	ACERO A36	35.8599	143.5120	0.8440	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 20 VP INT P1						
142 Viga_142	OK I-160X8-340X6	ACERO A36	35.8599	143.5120	0.8140	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 21 VP INT P2						
250 Viga_250	OK I-160X8-340X6	ACERO A36	35.8599	143.5120	0.7850	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 22 VP INT P3						
358 Viga_358	OK I-150X8-320X6	ACERO A36	38.1736	153.0953	0.9451	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 23 VP INT P4						
471 Viga_471	OK I-150X8-320X6	ACERO A36	38.1736	153.0953	0.9637	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 24 VP INT P5						
574 Viga_574	OK I-140X8-320X6	ACERO A36	38.4923	166.5179	0.8483	12 1.2 (D1+D2) + L + SY
Grupo : 25 VP INT2 PB						
52 Viga_52	OK I-110X6-200X4	ACERO A36	47.5886	157.7620	0.7589	11 1.2 (D1+D2) + L + SX
Grupo : 26 VP INT2 P1						
160 Viga_160	OK I-110X6-200X4	ACERO A36	47.5886	157.7620	0.8010	11 1.2 (D1+D2) + L + SX
Grupo : 27 VP INT2 P2						
264 Viga_264	OK I-110X6-200X4	ACERO A36	47.5886	157.7620	0.8351	11 1.2 (D1+D2) + L + SX
Grupo : 28 VP INT2 P3						
372 Viga_372	OK I-110X6-200X4	ACERO A36	47.5886	157.7620	0.8540	11 1.2 (D1+D2) + L + SX
Grupo : 29 VP INT2 P4						
480 Viga_480	OK I-110X6-200X4	ACERO A36	47.5886	157.7620	0.8670	11 1.2 (D1+D2) + L + SX
Grupo : 30 VP INT2 P5						
588 Viga_588	OK I-100X6-200X3	ACERO A36	46.6746	167.9645	0.8772	11 1.2 (D1+D2) + L + SX

Fuente: ARSAP 2022.

En la figura 68 se observa las solicitaciones o ratios finales del sistema estructural optimizado. En la tabla 40 se observa el peso total de las secciones de vigas y columnas finales empleadas en el diseño del edificio.

Figura 68

Relación demanda-capacidad de la estructura con disipadores CRD.



Fuente: ARSAP 2022

Tabla 40

Peso de la estructura con disipadores CRD.

Tipo	Número	Longitud (m)	Peso por unidad (kG/m)	Peso de la barra (kG)	Peso total (kG)	Superficie pintada (m2)
ACERO A36						
CV-125X4	24	5.00	15.20	75.99	1824	60.00
CV-125X4	24	5.83	15.20	88.60	2126	69.96
C_300X4	72	3.00	37.18	111.53	8030	259.20
C_300X5	24	3.00	46.32	138.95	3335	86.40
C_300X6	48	3.00	55.39	166.17	7976	172.80
I-100X6-200X3	10	4.00	13.85	55.39	554	31.76
I-105X6-200X3	45	4.00	14.32	57.27	2577	146.52
I-110X6-200X4	50	4.00	16.27	65.06	3253	166.40
I-115X6-200X4	90	4.00	16.74	66.94	6025	306.72
I-115X6-210X4	90	4.00	17.05	68.20	6138	313.92
I-120X6-200X4	45	4.00	17.21	68.83	3097	156.96
I-130X8-290X5	10	4.00	27.08	108.33	1083	43.60
I-130X8-290X5	6	5.00	27.08	135.41	812	32.70
I-140X8-320X6	50	4.00	31.90	127.61	6380	237.60
I-140X8-320X6	42	5.00	31.90	159.51	6700	249.48
I-150X8-320X6	24	5.00	33.16	165.79	3979	147.36
I-160X8-340X6	36	5.00	35.36	176.78	6364	235.44
Total						
CV-125X4	48	259.92	15.20	3950.16	3950	129.96
C_300X4	72	216.00	37.18	8030.36	8030	259.20
C_300X5	24	72.00	46.32	3334.68	3335	86.40
C_300X6	48	144.00	55.39	7976.10	7976	172.80
I-100X6-200X3	10	40.00	13.85	553.90	554	31.76
I-105X6-200X3	45	180.00	14.32	2577.31	2577	146.52
I-110X6-200X4	50	200.00	16.27	3253.04	3253	166.40
I-115X6-200X4	90	360.00	16.74	6025.03	6025	306.72
I-115X6-210X4	90	360.00	17.05	6138.07	6138	313.92
I-120X6-200X4	45	180.00	17.21	3097.30	3097	156.96
I-130X8-290X5	16	70.00	27.08	1895.78	1896	76.30
I-140X8-320X6	92	410.00	31.90	13079.98	13080	487.08
I-150X8-320X6	24	120.00	33.16	3979.01	3979	147.36
I-160X8-340X6	36	180.00	35.36	6364.15	6364	235.44
Total:					70255	2716.82

Fuente: ARSAP 2022.

4.2.2.4.2. Comportamiento del Edificio con disipadores sísmicos CRD.

Se efectuó el análisis del edificio con disipadores sísmicos de fricción CRD mediante un análisis dinámico utilizando el espectro de diseño máximo esperado del suelo tipo D con ubicación en la ciudad de Cuenca, logrando obtener el desplazamiento máximo de cada piso, la distorsión máxima de cada piso y la fuerza cortante basal en cada dirección.

En las figuras 69 y 70 se puede observar que el desplazamiento máximo en el sentido X es igual a 2.08 cm y la deriva máxima en el sentido X es igual a 0.8% la cual ocurre en el tercer nivel y está muy por debajo de la deriva límite del 2%.

En las figuras 71 y 72 se puede observar que el desplazamiento máximo en el sentido Y es igual a 1.54 cm y la deriva máxima es igual a 0.59% la cual también ocurre en el tercer nivel del edificio y está debajo de la deriva límite del 2% que establece la norma NEC.

El cortante basal máximo se puede observar en las figuras 73 y 74; en sentido X es igual a 439.21 KN y en sentido Y es igual a 429.97 KN.

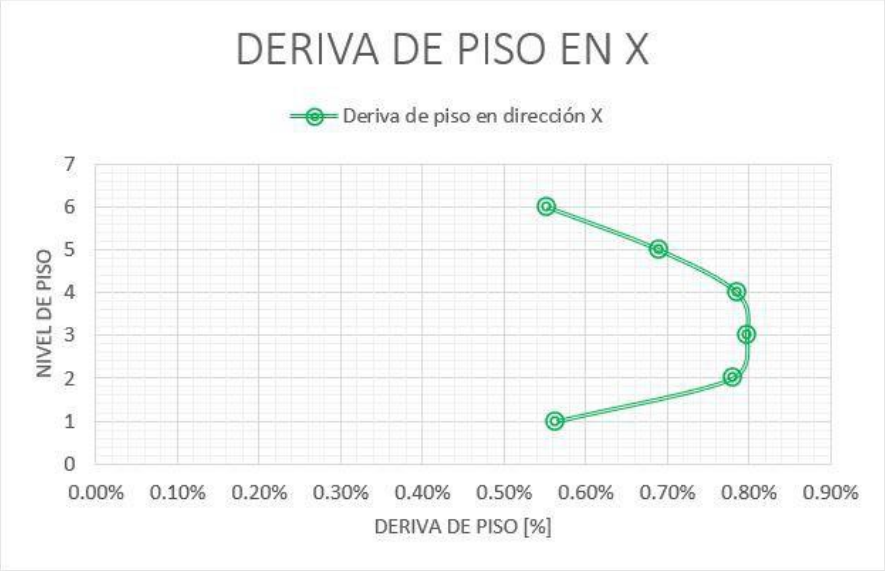
Figura 69

Desplazamiento máximo en sentido X estructura con disipadores sísmicos.

Fuente: Elaboración propia

Figura 70

Derivas máximas en sentido X estructura con disipadores sísmicos.



Fuente: Elaboración propia

Figura 71

Desplazamiento máximo en sentido Y estructura con disipadores sísmicos.

Fuente: Elaboración propia

Figura 72

Derivas máximas en sentido Y estructura con disipadores sísmicos.

Fuente: Elaboración propia

Figura 73

Cortante basal máximo en sentido X estructura con disipadores sísmicos.

Fuente: Elaboración propia

Figura 74

Cortante basal máximo en sentido Y estructura con disipadores sísmicos.

Fuente: Elaboración propia

4.3. Evaluar los resultados de la simulación de aisladores y disipadores sísmicos en un edificio de 5 plantas para determinar el desempeño de los mismos.

El objetivo principal de esta investigación consiste en Analizar el comportamiento de dispositivos aisladores y disipadores sísmicos empleados en un edificio de 5 plantas ubicado en la ciudad de Cuenca, con el fin de determinar su desempeño y ventajas frente a un diseño convencional.

Luego de realizar el cálculo estructural del edificio utilizando las tres configuraciones estructurales mediante el software ARSAP 2022 y tras cumplir con todos los requisitos y normativas vigentes, se procede a evaluar los resultados obtenidos de las simulaciones, considerando algunas respuestas objetivas, entre las que destacamos el análisis modal, las derivas de piso, los cortantes basales, el desplazamiento, el peso de la estructura y un análisis de costos, que nos permiten sacar las conclusiones y recomendaciones del desempeño sísmico de los dispositivos utilizados en esta investigación.

4.3.1. Comparación y verificación de resultados obtenidos de la simulación.

A continuación, se proporcionarán cuadros comparativos y figuras entre los tres diseños propuestos para sacar conclusiones sobre qué tipo de protección sísmica es más adecuada para nuestro caso de estudio.

- ANÁLISIS MODAL

Para que la estructura del edificio se comporte correctamente debemos garantizar que el modo 1 y el modo 2 de vibración de la estructura sean traslacionales y no presenten torsiones superiores al 5 % como indica la norma NEC. A continuación, se observa en la tabla 41 que efectivamente la estructura en las tres configuraciones de análisis, tanto convencional, con aisladores sísmicos y con disipadores sísmicos respectivamente, presenta traslación en el eje X en el modo 1 y una traslación en el eje Y en el modo 2.

Tabla 41

Comparación de modos de vibración de la estructura.

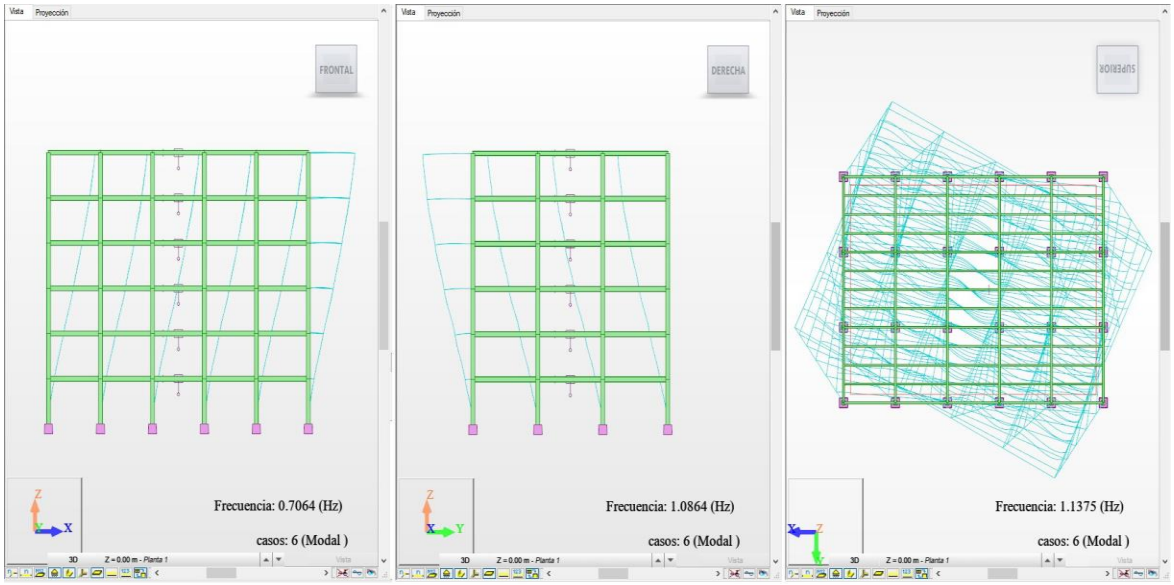
MODO	ESTRUCTURA CONVENCIONAL			ESTRUCTURA CON AISLADORES SISMICOS			ESTRUCTURA CON DISIPADORES SISMICOS		
	PERIODO [s]	.UX [%]	.UY [%]	PERIODO [s]	.UX [%]	.UY [%]	PERIODO [s]	.UX [%]	.UY [%]
1	1.42	79.04	0.00	3.13	98.48	0.00	0.95	78.95	0.00
2	0.92	79.04	81.33	2.82	98.48	99.74	0.71	78.95	80.41
3	0.88	79.04	81.33	2.40	98.48	99.74	0.51	78.95	80.41
4	0.49	90.39	81.33	0.81	99.85	99.74	0.30	93.19	80.41
5	0.32	90.39	92.44	0.51	99.85	99.98	0.23	93.19	93.98
6	0.30	90.39	92.44	0.49	99.85	99.98	0.17	93.19	93.98

Fuente: Elaboración propia.

Para la estructura convencional, en el primer modo se observa un periodo de 1.42 segundos con una participación de masa del 79.04% a lo largo del eje X. El segundo modo presenta un periodo de 0.92 segundos con una participación de masa del 81.33% a lo largo del eje Y. En el tercer modo, la estructura presenta un efecto de torsión y un periodo de 0.88 segundos, tal como se observa en la figura 75. A partir del sexto modo se cumple la participación de la masa modal acumulada de al menos el 90% de la masa total de la estructura para cada dirección, como establece la norma NEC.

Figura 75

Modos de vibración de estructura convencional.



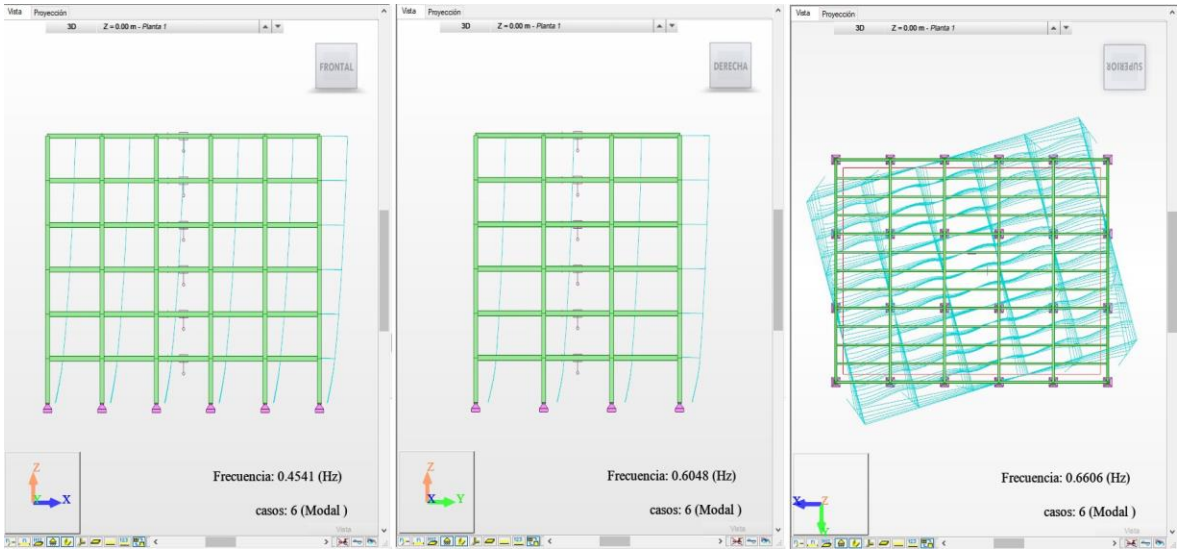
Fuente: ARSAP 2022

Para la estructura con aisladores sísmicos, en el primer modo se observa un periodo de 3.13 segundos con una participación de masa del 98.48 % a lo largo del eje X. El segundo modo presenta un periodo de 2.82 segundos con una participación de masa del 99.74 % a lo largo del eje Y. En el tercer modo, la estructura presenta un efecto de torsión y un periodo de 2.4 segundos, tal como se observa en la figura 76. Como observamos para el primer y segundo modo se cumple la participación de la masa modal superior el 90 % de la masa total cuando se utiliza aisladores sísmicos.

Finalmente, para la estructura con disipadores sísmicos, en el primer modo se observa un periodo de 0.95 segundos con una participación de masa del 78.95% a lo largo del eje X. El segundo modo presenta un periodo de 0.71 segundos con una participación de masa del 80.41% a lo largo del eje Y. En el tercer modo, la estructura presenta un efecto de torsión y un periodo de 0.51 segundos, tal como se observa en la figura 77. A partir del quinto modo se cumple la participación de la masa modal acumulada de al menos el 90 % de la masa total de la estructura para cada dirección, como establece la norma NEC. Los demás modos y sus respectivos periodos se pueden observar en el anexo 5.

Figura 76

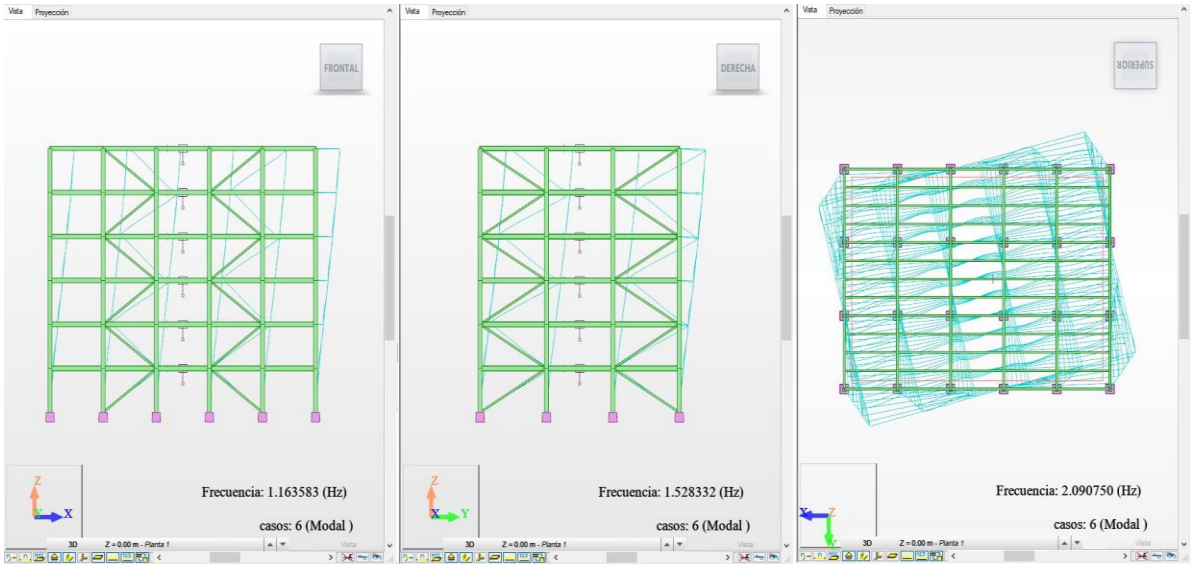
Modos de vibración de estructura con aisladores sísmicos.



Fuente: ARSAP 2022

Figura 77

Modos de vibración de estructura con disipadores sísmicos.

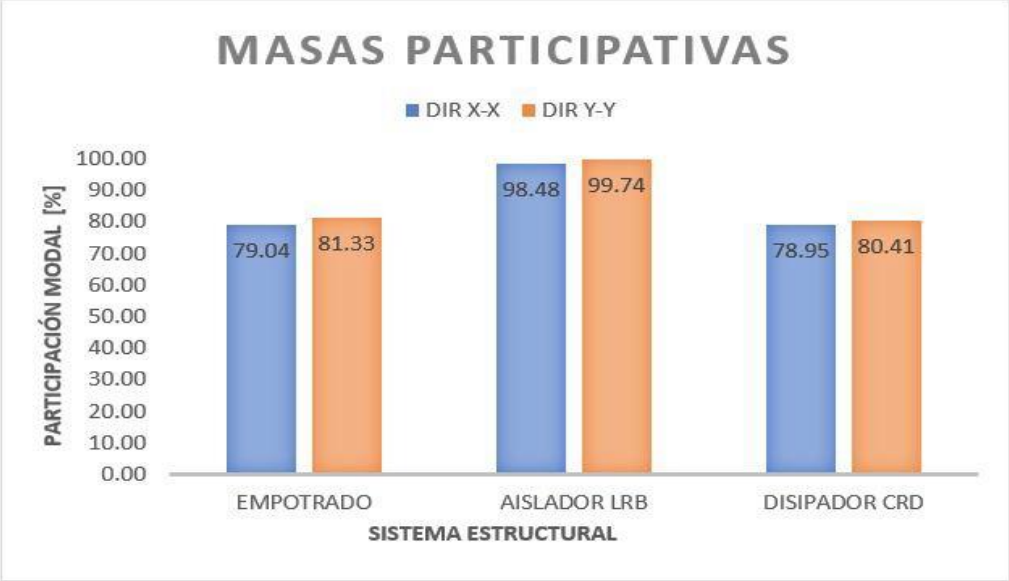


Fuente: ARSAP 2022

Para facilitar la interpretación de los datos presentados en la Tabla 41, se representa gráficamente la importancia de cada modo de vibración para cada dirección de análisis, donde es evidente que con el uso de aisladores sísmicos las vibraciones del edificio se concentran en un modo de vibración para cada dirección. La Figura 78 muestra las diferencias significativas en la participación modal para los 3 diseños analizados en esta investigación.

Figura 78

Comparación de masas participativas.



Fuente: Elaboración propia

Al comparar las proporciones modales del sistema convencional con el sistema de aislamiento tipo LRB, encontramos que las proporciones modales con el aislador LRB aumentaron un 19.44% en la dirección X y un 18.41% en la dirección Y. Si comparamos el sistema convencional con el sistema de disipadores CRD, vemos una disminución del 0.09 % en la dirección X y 0.92 % en la dirección Y.

Del análisis realizado se puede decir que el sistema de aislamiento LBR reduce significativamente posibles problemas de torsión que puedan presentarse en la edificación, ya que presenta la mayor participación modal y el periodo se aumenta considerablemente en esta configuración.

- ANÁLISIS DE TORSIÓN

La segunda comprobación que se realizó es el análisis de porcentaje de excentricidad máxima que existe entre en centro de masa y el centro de rigidez de la edificación, lo que provocara torsión. Según la NEC este valor debe ser menor o igual al 5%. En la tabla 42 se observan los resultados obtenidos en la edificación, con las tres configuraciones de análisis propuestas.

Tabla 42

Porcentaje máximo de torsión presente en la edificación.

PISO	LX	LY	G (X,Y,Z)	R (X,Y,Z)	ESTRUCTURA CONVENCIONAL		ESTRUCTURA CON AISLADORES		ESTRUCTURA CON DISIPADORES	
	[m]	[m]	[m]	[m]	EX [%]	EY [%]	EX [%]	EY [%]	EX [%]	EY [%]
PB	20	15	10-7.5-0.600	9.99-7.49-0.59	0.05	0.07	0.05	0.07	0.05	0.07
1	20	15	10-7.5-2.940	9.99-7.49-2.41	0.05	0.07	0.05	0.07	0.05	0.07
2	20	15	10-7.5-5.950	9.99-7.49-5.50	0.05	0.07	0.05	0.07	0.05	0.07
3	20	15	10-7.5-8.950	9.99-7.49-8.49	0.05	0.07	0.05	0.07	0.05	0.07
4	20	15	10-7.5-11.96	9.99-7.49-11.5	0.05	0.07	0.05	0.07	0.05	0.07
5	20	15	10-7.5-14.96	9.99-7.49-14.4	0.05	0.07	0.05	0.07	0.05	0.07

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en los resultados obtenidos, al tratarse de un edificio regular tanto en planta como en elevación, el porcentaje máximo de excentricidad entre en centro de masa y el centro de rigidez es prácticamente despreciable o igual a cero en ambas direcciones, por lo que se cumple con lo establecido en la norma NEC. Cabe mencionar que esta condición se presenta por la forma y la simplificación de la edificación utilizada para el análisis, en el caso de considerar las escaleras y los ascensores en el edificio esta condición cambiaría significativamente el comportamiento de la edificación.

- CORTANTE BASAL

En la tabla 43 y en las figuras 79 y 80 se pueden observar las diferencias entre el cortante basal obtenido para los tres diseños analizados, con lo cual se podrá tener una idea del nivel de daño que tendrá cada diseño al ocurrir un evento sísmico.

Tabla 43

Cortante basal por piso.

PISO	ESTRUCTURA CONVENCIONAL		ESTRUCTURA CON AISLADORES SISMICOS		ESTRUCTURA CON DISIPADORES SISMICOS	
	VX [KN]	VY [KN]	VX [KN]	VY [KN]	VX [KN]	VY [KN]
PB	648.78	643.36	337.88	247.20	439.21	429.97
1	604.42	606.57	291.41	208.05	413.16	406.71
2	533.28	540.03	244.23	169.17	367.68	363.39
3	451.57	448.38	194.05	129.37	310.08	303.54
4	358.39	334.18	138.31	87.91	237.15	225.50
5	227.73	188.76	74.17	44.50	137.86	125.02

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 44, se pueden observar que usando aisladores sísmicos se reducen los cortantes basales en sentido X a un 56.62% y en sentido Y a un 69.53% con respecto al diseño convencional y usando disipadores sísmicos se reduce en sentido X a un 33.27% y en sentido Y a un 32.9 % con respecto al diseño convencional.

Tabla 44

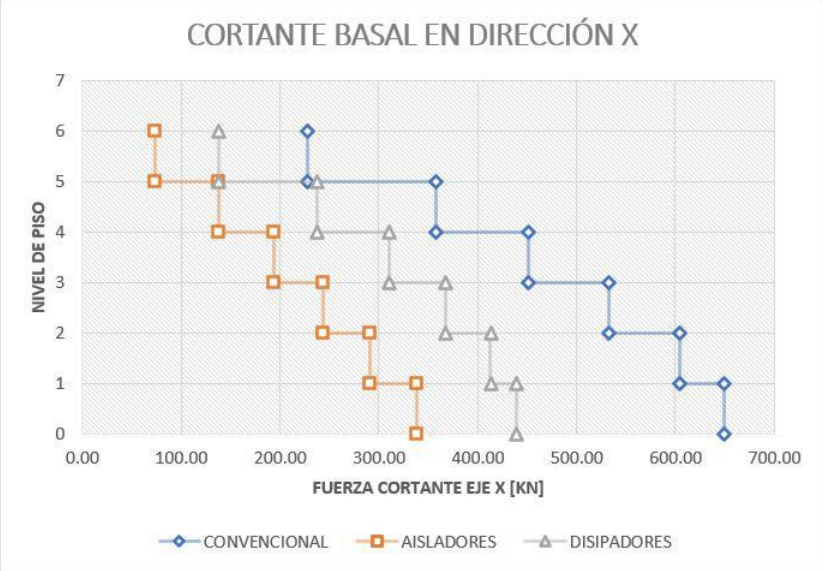
Porcentaje de reducción de cortante basal por piso.

PISO	ESTRUCTURA CON AISLADORES SISMICOS		ESTRUCTURA CON DISIPADORES SISMICOS	
	VX [%]	VY [%]	VX [%]	VY [%]
PB	47.92	61.58	32.30	33.17
1	51.79	65.70	31.64	32.95
2	54.20	68.67	31.05	32.71
3	57.03	71.15	31.33	32.30
4	61.41	73.69	33.83	32.52
5	67.43	76.43	39.46	33.77

Fuente: Elaboración propia.

Figura 79

Cortantes basales de piso en dirección "X".



Fuente: Elaboración propia.

Figura 80

Cortantes basales de piso en dirección "Y".

Fuente: Elaboración propia.

- DERIVAS O DISTORSIONES DE PISO

En las tablas 45 y 46, se pueden observar que usando aisladores sísmicos se reducen las derivas de piso en sentido X a un 30.74% y en sentido Y a un 57.53% con respecto al diseño convencional y usando disipadores sísmicos se reduce en sentido X a un 42.58% y en sentido Y a un 19.35 % con respecto al diseño convencional.

Tabla 45

Derivas máximas de los distintos diseños analizados.

PISO	ESTRUCTURA CONVENCIONAL		ESTRUCTURA CON AISLADORES SISMICOS		ESTRUCTURA CON DISIPADORES SISMICOS	
	d UX [%]	d UY [%]	d UX [%]	d UY [%]	d UX [%]	d UY [%]
PB	0.948	0.624	0.800	0.336	0.564	0.474
1	1.488	0.798	1.200	0.420	0.780	0.582
2	1.512	0.840	1.020	0.360	0.798	0.588
3	1.308	0.708	0.900	0.300	0.786	0.582
4	1.182	0.594	0.720	0.180	0.690	0.492
5	0.900	0.366	0.480	0.120	0.552	0.366

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 46

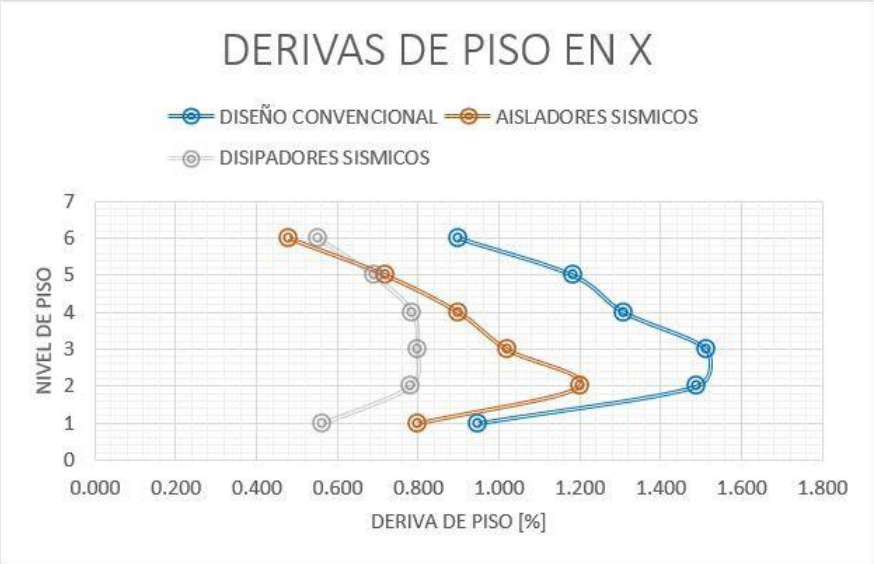
Porcentaje de reducción de las derivas en la edificación.

PISO	ESTRUCTURA CON AISLADORES SISMICOS		ESTRUCTURA CON DISIPADORES SISMICOS	
	VX [%]	VY [%]	VX [%]	VY [%]
PB	15.61	46.15	40.51	24.04
1	19.35	47.37	47.58	27.07
2	32.54	57.14	47.22	30.00
3	31.19	57.63	39.91	17.80
4	39.09	69.70	41.62	17.17
5	46.67	67.21	38.67	0.00

Fuente: Elaboración propia.

Figura 81

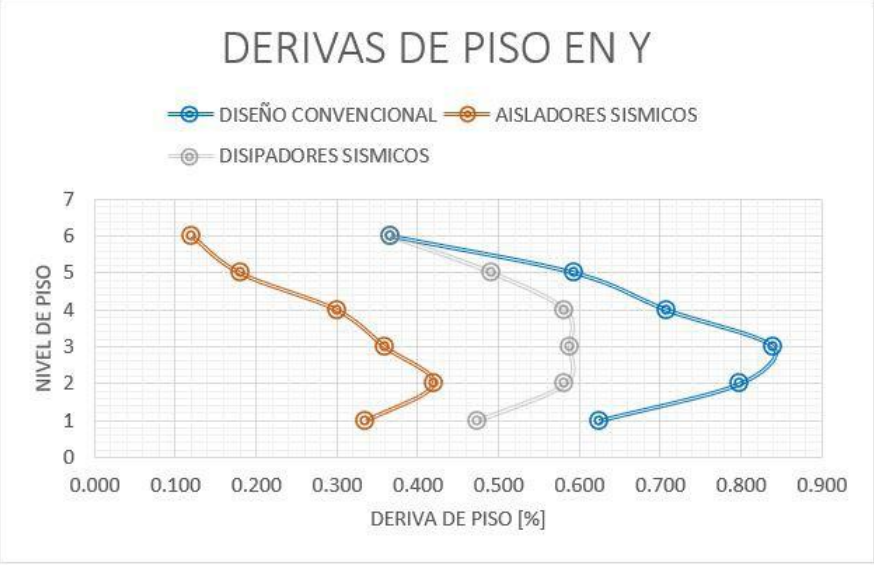
Comparación de derivas de piso en dirección "X".



Fuente: Elaboración propia.

Figura 82

Comparación de derivas de piso en dirección "Y".



Fuente: Elaboración propia.

- DESPLAZAMIENTOS

En las tablas 47 y 48, se pueden observar que usando aisladores sísmicos se reducen los desplazamientos de piso en sentido X a un 76.37% y en sentido Y a un 85.21% con respecto al diseño convencional y usando disipadores sísmicos se reduce en sentido X a un 43.81 % y en sentido Y a un 24.53% con respecto al diseño convencional.

Tabla 47

Desplazamientos máximos de los distintos diseños analizados.

PISO	ESTRUCTURA CONVENCIONAL		ESTRUCTURA CON AISLADORES SISMICOS		ESTRUCTURA CON DISIPADORES SISMICOS	
	UX [cm]	UY [cm]	UX [cm]	UY [cm]	UX [cm]	UY [cm]
PB	0.474	0.311	4.758	4.187	0.281	0.236
1	1.218	0.711	5.348	4.385	0.670	0.527
2	1.975	1.131	5.867	4.555	1.070	0.822
3	2.628	1.483	6.302	4.690	1.461	1.113
4	3.218	1.781	6.649	4.794	1.808	1.359
5	3.667	1.964	6.883	4.852	2.085	1.544

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 48

Porcentaje de reducción de los Desplazamientos en la edificación.

PISO	ESTRUCTURA CON AISLADORES SISMICOS		ESTRUCTURA CON DISIPADORES SISMICOS	
	UX [%]	UY [%]	UX [%]	UY [%]
PB	66.63	72.02	40.76	24.08
1	51.60	72.18	44.94	25.81
2	73.70	84.94	45.83	27.26
3	83.44	90.90	44.39	24.97
4	89.22	94.17	43.82	23.67
5	93.62	97.04	43.14	21.40

Fuente: Elaboración propia.

Figura 83

Comparación de Desplazamientos de piso en dirección "X".

Fuente: Elaboración propia.

Figura 84

Comparación de Desplazamientos de piso en dirección "Y".

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2. Análisis comparativo de peso estructural.

En la tabla 49, se pueden observar que luego del análisis estructural y cumpliendo todas las normas mínimas de resistencia establecidas en le NEC, la estructura convencional tiene un peso de 77405 Kg, usando aisladores sísmicos el peso de la estructura se logra reducir a 68658 Kg y usando disipadores sísmicos el peso de la estructura se logra reducir a 70255 Kg.

Utilizando aisladores sísmicos se reduce el peso en 8747 Kg lo que representa un 11.3% del peso total de la estructura, mientras que utilizando disipadores sísmicos se reduce el peso en 7150 Kg lo que representa un 9.24% del peso total de la estructura con respecto al diseño convencional.

Tabla 49

Peso estructural de las 3 configuraciones de análisis.

TIPO DE EDIFICACIÓN	*PESO [Kg]*
ESTRUCTURA CONVENCIONAL	77 405.00
ESTRUCTURA CON AISLADORES SISMICOS	68 658.00
ESTRUCTURA CON DISIPADORES SISMICOS	70 255.00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 50

Porcentaje de reducción del peso con dispositivos sísmicos.

TIPO DE EDIFICACIÓN	*REDUCCIÓN DE PESO*	
	[Kg]	*[%]*
ESTRUCTURA CON AISLADORES SISMICOS	8 747.00	11.30
ESTRUCTURA CON DISIPADORES SISMICOS	7 150.00	9.24

Fuente: Elaboración propia.

4.3.3. Análisis comparativo de costos del edificio.

- DISEÑO CONVENCIONAL

En la tabla 51 se presenta el presupuesto referencial para la construcción del edificio utilizando el diseño convencional sismorresistente.

Tabla 51

Presupuesto referencial diseño convencional del edificio.

RUBROS EDIFICIO CONVENCIONAL					
ITEM	***RUBRO / DESCRIPCIÓN***	***UNIDAD***	***CANTIDAD***	***COSTO U.***	***COSTO TOTAL***
1	DESBROCE Y LIMPIEZA	[m^2]	325.00	1.52	494.00
2	REPLANTEO Y NIVELACION	[m^2]	300.00	0.97	291.00
3	EXCAVACIÓN	[m^3]	900.00	3.05	2 745.00
4	DESALOJO	[m^3]	900.00	4.89	4 401.00
5	RELLENO COMPACTADO	[m^3]	90.00	3.71	333.90
6	REPLANTILLO (F´C 140)	[m^3]	9.60	131.14	1 258.94
7	HORMIGÓN SIMPLE F´C 240 KG/CM2 EN ZAPATAS	[m^3]	28.80	168.18	4 843.58
8	HORMIGÓN SIMPLE F´C 240 KG/CM2 EN CADENAS	[m^3]	20.40	225.81	4 606.52
9	HORMIGÓN SIMPLE F´C 240 KG/CM2 EN PLINTOS	[m^3]	8.64	131.84	1 139.10
10	ACERO ESTRUCTURAL A36 VIGAS Y COLUMNAS	[Kg]	77405.00	2.25	174 161.25
11	ACERO DE REFUERZO VARILLAS FY=4200 KG/CM2	[Kg]	3 000.00	2.63	7 890.00
12	LOSA CON PLACA COLABORANTE	[m^2]	1 800.00	78.91	142 038.00
				SUBTOTAL	344 202.30
			DIRECCIÓN TÉCNICA	**10%**	34 420.23
					378 622.53
				IVA	**12%** 45 434.70
					TOTAL **424 057.23**

Fuente: Elaboración propia.

DISEÑO CON AISLADORES SÍSMICOS

En la tabla 52 se presenta el presupuesto referencial para la construcción del edificio utilizando el diseño con aisladores sísmicos tipo LRB.

Tabla 52

Presupuesto referencial diseño con aisladores sísmicos.

RUBROS EDIFICIO CON AISLADORES SISMICOS					
ITEM	***RUBRO / DESCRIPCIÓN***	***UNIDAD***	***CANTIDAD***	***COSTO U.***	***COSTO TOTAL***
1	DESBROCE Y LIMPIEZA	[m^2]	325.00	1.52	494.00
2	REPLANTEO Y NIVELACION	[m^2]	300.00	0.97	291.00
3	EXCAVACIÓN	[m^3]	900.00	3.05	2 745.00
4	DESALOJO	[m^3]	900.00	4.89	4 401.00
5	RELLENO COMPACTADO	[m^3]	90.00	3.71	333.90
6	REPLANTILLO (F´C 140)	[m^3]	9.60	131.14	1 258.94
7	HORMIGÓN SIMPLE F´C 240 KG/CM2 EN ZAPATAS	[m^3]	28.80	168.18	4 843.58
8	HORMIGÓN 240 KG/CM^2 EN INFRA-SUPERESTRUCTURA	[m^3]	250.00	225.81	56 452.50
9	HORMIGÓN SIMPLE F´C 240 KG/CM2 EN PLINTOS	[m^3]	75.00	131.84	9 888.00
10	ACERO ESTRUCTURAL A36 VIGAS Y COLUMNAS	[Kg]	68658.00	2.25	154 480.50
11	ACERO DE REFUERZO VARILLAS FY=4200 KG/CM^2	[Kg]	15 000.00	2.63	39 450.00
12	LOSA CON PLACA COLABORANTE	[m^2]	1 800.00	78.91	142 038.00
13	DISPOSITIVOS AISLADORES LRB	[u]	24.00	5000.00	120 000.00
				SUBTOTAL	536 676.43
			DIRECCIÓN TÉCNICA	**10%**	53 667.64
					590 344.07
				IVA	**12%** 70 841.29
					TOTAL **661 185.36**

Fuente: Elaboración propia.

- DISEÑO CON DISIPADORES SÍSMICOS

En la tabla 53 se presenta el presupuesto referencial para la construcción del edificio utilizando el diseño con disipadores sísmicos de fricción tipo CRD.

Tabla 53

Presupuesto referencial diseño con disipadores sísmicos.

RUBROS EDIFICIO CON DISIPADORES SISMICOS					
ITEM	***RUBRO / DESCRIPCIÓN***	***UNIDAD***	***CANTIDAD***	***COSTO U.***	***COSTO TOTAL***
1	DESBROCE Y LIMPIEZA	[m^2]	325.00	1.52	494.00
2	REPLANTEO Y NIVELACION	[m^2]	300.00	0.97	291.00
3	EXCAVACIÓN	[m^3]	900.00	3.05	2 745.00
4	DESALOJO	[m^3]	900.00	4.89	4 401.00
5	RELLENO COMPACTADO	[m^3]	90.00	3.71	333.90
6	REPLANTILLO (F´C 140)	[m^3]	9.60	131.14	1 258.94
7	HORMIGÓN SIMPLE F´C 240 KG/CM2 EN ZAPATAS	[m^3]	28.80	168.18	4 843.58
8	HORMIGÓN SIMPLE F´C 240 KG/CM2 EN CADENAS	[m^3]	20.40	225.81	4 606.52
9	HORMIGÓN SIMPLE F´C 240 KG/CM2 EN PLINTOS	[m^3]	8.64	131.84	1 139.10
10	ACERO ESTRUCTURAL A36 VIGAS Y COLUMNAS	[Kg]	70255.00	2.25	158 073.75
11	ACERO DE REFUERZO VARILLAS FY=4200 KG/CM2	[Kg]	3 000.00	2.63	7 890.00
12	LOSA CON PLACA COLABORANTE	[m^2]	1 800.00	78.91	142 038.00
13	DISPOSITIVOS CRD 75 KN	[u]	24.00	2500.00	60 000.00
14	DISPOSITIVOS CRD 100 KN	[u]	24.00	3000.00	72 000.00
				SUBTOTAL	460 114.80
			DIRECCIÓN TÉCNICA	**10%**	46 011.48
					506 126.28
				IVA	**12%** 60 735.15
					TOTAL **566 861.43**

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 85, se pueden observar que usando aisladores sísmicos se aumentan los costos del edificio en un 55.92% con respecto al diseño convencional y usando disipadores sísmicos se incrementan los costos un 33.68% con respecto al diseño convencional. Los disipadores sísmicos presentan una ventaja en costos del 22.24% en comparación con los aisladores sísmicos.

Figura 85

Comparación de costos de los diseños propuestos.

Fuente: Elaboración propia.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

El presente trabajo hace referencia al análisis de la estructura de un edificio residencial ubicado en la ciudad de Cuenca, cuyo diseño original consistió en un sistema de pórticos de acero estructural ASTM A-36 resistentes a momentos, a este modelo se le incorporó dos sistemas de protección sísmica, generando así, junto con el modelo convencional 3 modelos de análisis, un modelo incluyó un sistema de aislación sísmica conformado por aisladores elastoméricos con núcleo de plomo LRB y el otro sistema incluyo disipadores sísmicos de fricción CRD. De acuerdo a los resultados obtenidos se concluye que:

- Para implementar un sistema de aislamiento sísmico con aisladores elastoméricos con núcleo de plomo LRB, la estructura a aislar necesita tener una cierta simetría entre su tamaño, largo y ancho, para que el sistema de aisladores pueda funcionar de manera óptima en ambas direcciones.

- Para implementar un sistema con disipadores sísmicos de fricción restringidos a la ductilidad CRD en una edificación, su número y distribución varía de acuerdo al diseño arquitectónico, es decir, cuáles son los lugares donde se quiere exponerlos a la vista o, en caso de que no sean exhibidos, cuáles son los lugares libres para colocarlos. También varía de acuerdo con el criterio del diseñador estructural en cuanto a que tan repartida se quiere tener la resistencia lateral de la estructura.

- En el análisis modal se observó una reducción del periodo debido a la rigidez adicional proporcionada por el sistema de disipación de energía; por el contrario, se observó un aumento significativo a 3.13 segundos en el caso del sistema de aislamiento con aisladores elastoméricos.

- Las derivas o distorsiones de piso se redujeron considerablemente con los sistemas de protección sísmica, con el sistema de aislación sísmica se lograron valores máximos de 1.2% en la dirección "X", mientras que con el sistema de disipadores sísmicos se obtuvieron derivas máximas de 0.79 % en la dirección "X".

- Los momentos flectores y esfuerzos cortantes presentan reducciones en las vigas y columnas al comparar el modelo convencional con los modelos que incluyen los aisladores y disipadores sísmicos; demostrando que los sistemas de protección

sísmica absorben gran parte de la energía que se produce durante un evento sísmico.

- El sistema de disipadores de fricción redujo el cortante basal en la estructura en un 33.27% para la dirección "X" y 32.9% para la dirección "Y". Para el sistema de aislación sísmica se obtuvo reducción de cortante basal de 56.62% en la dirección "X" y 69.53% en la dirección "Y". Por lo tanto, se concluye que, desde el punto de vista del esfuerzo cortante basal, el edificio con un sistema de protección sísmica, ya sea este con disipadores o aisladores sísmicos, presenta una respuesta más favorable que el diseño convencional sismorresistente, ya que este parámetro se reduce significativamente en cada nivel del edificio y en ambas direcciones del análisis.

- En cuanto a los costos de la edificación con los sistemas de protección sísmica, se observa que el sistema de aislación es 22.24% más costoso que el sistema de disipación de Energía. En comparación con el diseño convencional, el sistema de aislación es 55.92% más costoso y el sistema de disipación de Energía es 33.68% más costoso.

- Como reseña final, cuando se implementa un sistema de protección sísmico en la estructura del edificio en estudio, en comparación con su versión convencional, se logra un desempeño estructural superior, con un alto nivel de seguridad estructural, pero también representa una opción bastante competitiva financieramente, desde una perspectiva de inversión inmediata, el edificio con sistema de protección sísmica significa un aumento en los costos, pero cuando se tienen en cuenta los efectos a largo plazo, los costos resultan ser mucho menores.

5.2. Recomendaciones

Este trabajo muestra la importancia de implementar sistemas de protección sísmica en estructuras ubicadas en zonas de alto riesgo sísmico, ya que estos sistemas absorben la mayor parte de las fuentes de energía y, por lo tanto, se debe tener en cuenta su uso en el diseño de estructuras con coeficientes de importancia superiores a 1 donde el mobiliario es más caro que la estructura, como en hospitales, donde el objetivo es reducir las aceleraciones del suelo. El propósito del diseño no solo debe centrarse en proteger la vida de las personas, sino también en garantizar la integridad de la estructura.

Referencias

Abdel-Kareem, M. (2009). *An innovative isolation devicefor aseismic design* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad Politécnica de Cataluña.

Aguiar, R., Almazán, J., Dechent, P., y Suárez, V. (2016). *Aisladores de base elastoméricos y fps*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

ANSI/AISC-360. (2016). *Specification for structural steel buildings*. AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION.

ASCE-7. (2016). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*. AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS.

Burgos, E., y Prado, G. (2018). *Análisis costo-beneficio de la implementación de sistema de aislamiento sísmico vs sistema de disipación sísmica en edificio torre médica.* (B.S. thesis). Universidad de Guayaquil. Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas.

Cando Cando, F. A., Monrroy Rocano, C. M., Ortega Sarmiento, J. C., y Puerres Guilcazo, O. A. (2012). Aislación sísmica de un edificio (análisis comparativo de comportamiento y costos con un edificio tradicional).

Castro, G. V., y Sarmiento, R. O. (2009). *Edificaciones con disipadores de energía*. Asamblea Nacional de Rectores.

Dunn, K. (2021). *Comportamiento de estructuras con dispositivos antisísmicos* (Tesis de Master no publicada). Universitat Politécnica de Catalunya.

Estructurando. (2022). *Aisladores y disipadores sísmicos)*. [Disponible en: https://estructurando.net/2014/10/14/aisladores-y-disipadores-sismicos/; Accedido el: 17 de diciembre del 2022].

FOPAE. (2010). *Informe técnico - sismo de chile 2010. concepción - chile: Fondo de prevención y atención de emergencias.* [Disponible en: https://docplayer.es/4541826-Visita-tecnica-comision-de-direccion-de-prevencion-y-atencion-de-emergencias-fopae-san-pedro-de-la-paz-concepcion-chile-informe-tecnico.html; Accedido el: 11 de octubre del 2023].

Genatios, C., y Lafuente, M. (2016). *Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras*. Venezuela: CAF-Banco de Desarrollo de América Latina Pp. 712-721.

Gutiérrez, O. (2016). *Estudio comparativo para determinar la eficiencia y aplicabilidad de aisladores sísmicos de base y diagonales con amortiguadores, como sistemas de protección sísmica de edificios de acero en la ciudad de quito* (B.S. thesis). PUCE.

Jurado, M. (2015). Análisis de la aplicación de disipadores de fricción para el mejoramiento del desempeño sísmico de estructuras de hormigón armado en la ciudad de guayaquil.

Lama, W. (2013). Análisis y diseño de estructuras de acero con disipadores viscoelásticos para la ciudad de guayaquil. *Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Recuperado de: http://repositorio. ucsg. edu. ec/handle/3317/1244* .

Mayes, R., y Naeim, F. (2000). *Design of structures with seismic isolation* (Tesis de Master no publicada). -.

Meza Blandón, R., y Sánchez García, E. (2010). Guía de diseño sismico de aisladores elastoméricos y de fricción para la republica de nicaragua.

Mullo Pilamunga, C. L. (2014). Análisis y diseño de un edificio con aisladores sísmicos, modelamiento en etabs.

NEC-SE-CG. (2015). *Cargas no sísmicas*. Ministerio de desarrollo urbano y vivienda.

NEC-SE-DS. (2015). *Peligro sísmico diseño sismo resistente*. Ministerio de desarrollo urbano y vivienda.

Oviedo, Ricardo. (2004). *Control de la respuesta sísmica de edificios utilizando disipadores de energía)*. [Disponible en: https://oviedos.tripod.com/contro.htm; Accedido el: 11 de octubre del 2023].

Skinner, I., Robinson, W., y McVerry, G. (1993). *An introduction to seismic isolation*. England: Wiley Pp. 1-190.

Villarroel, E. (2016). *Análisis y diseño de estructuras con autodesk robot structural analysis 2016* (SENAPI, Ed.).

Villavicencio, E. (2015). *Análisis sísmico estructural comparativo para edificios con aisladores de base tipo elastoméricos y friccionantes, para los diferentes tipos de suelos del ecuador* (Tesis de Master no publicada). Escuela Politécnica Nacional.