



**ANÁLISIS SÍSMICO ESTRUCTURAL COMPARATIVO ENTRE EDIFICIOS
EMPOTRADOS EN SU BASE Y CON AISLADORES DE BASE TIPO
ELASTOMÉRICOS Y FRICCIONANTES, PARA LAS MICROZONAS LACUSTRE
Y PIEDEMONTE DE BOGOTÁ.**

TRABAJO DE GRADO

Presentado por

HUGO ALREDO SILVA RIBÓN

Presentado como requisito parcial para optar al título de

MAGISTER EN INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

Bogotá D.C., Colombia

(Junio de 2022)

**ANÁLISIS SÍSMICO ESTRUCTURAL COMPARATIVO ENTRE EDIFICIOS
EMPOTRADOS EN SU BASE Y CON AISLADORES DE BASE TIPO
ELASTOMÉRICOS Y FRICCIONANTES, PARA LAS MICROZONAS LACUSTRE
Y PIEDEMONTES DE BOGOTÁ.**

HUGO ALFREDO SILVA RIBÓN

APROBADO:

Juan Manuel Sandoval Leal

Tutor

Nombres del primer jurado

Firma

Nombres del segundo jurado

Firma

Bogotá D.C. 09 de JUNIO de 2022

NOTA DE ADVERTENCIA

“La universidad no se hace responsable de los conceptos emitidos por sus estudiantes en sus proyectos de trabajo de grado, sólo velará por la calidad académica de los mismos, en procura de garantizar su desarrollo de acuerdo a la actualidad del área disciplinar respectiva. En el caso de presentarse cualquier reclamación o acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión, el estudiante – autor asumirá toda la responsabilidad y saldrá en defensa de los derechos. Para todos los derechos la universidad actúa como un tercero de buena fe”. (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995)

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi tutor del proyecto Ing. Juan Manuel Sandoval Leal por su colaboración y aportes a este proyecto.

Agradezco a todo el cuerpo docente de la Maestría en Ingeniería Civil por compartir sus conocimientos y experiencias durante el desarrollo de este proceso.

Agradezco a mi familia por su apoyo incondicional.

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mi familia y las personas que han sido claves para alcanzar este propósito en mi vida.

Tabla de Contenido

Capítulo 1 Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Justificación	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo General	3
1.3.2. Objetivos Específicos	4
Capítulo 2 Antecedentes y Estado del Arte	5
2.1 Antecedentes del proyecto.	5
2.2 Marco conceptual	6
2.2.1 Ingeniería Sísmica en Colombia.	6
2.2.2 Aislación Sísmica.	21
2.3 Estado del arte	27
Capítulo 3 Marco Teórico	31
3.1 NEHRP RECOMMENDED PROVISIONS FOR SEISMIC REGULATIONS FOR NEW BUILDINGS — PROVISIONS AND COMMENTARY.	31
3.2 ANÁLISIS POR DESEMPEÑO.	40
Capítulo 4 (Metodología/Desarrollo/Materiales Y Métodos/Diseño Experimental)	47
4.1 Desarrollo de objetivos	47
4.1.1 Modelos Grados de Libertad	47
4.1.2 Metodologías de Diseño Sistemas de Aislación	68
4.1.3 Selección y tratamiento de señales para análisis no lineal tiempo - historia.	147
4.1.4 Análisis dinámico y diseño sísmico según lo establecido en la NSR – 10 para estructuras empotradas en la base (análisis modal espectral).	160
Capítulo 5 RESULTADOS	187
5.1 Configuración Sistema de Aislación.	187
5.2 Parámetros comparativos edificaciones con base fija y con sistemas aislados.	191
5.3 Diseño de la estructura con base aislada.	220
5.4 Desempeño Edificaciones con Base Fija.	224
5.5 Desempeño Edificaciones con Base Aislada.	237
Capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones	258
Bibliografía	263
Apéndice	280
Anexos	285

Lista de Tablas

- Tabla 1. Descripción de las zonas geotécnicas. Fuente: Decreto 523 de diciembre 16 de 2010 "Por el cual se adopta la Microzonificación Sísmica de Bogotá D.C." 9*
- Tabla 2. Descripción de las zonas de respuesta sísmica. Fuente: Decreto 523 de diciembre 16 de 2010 "Por el cual se adopta la Microzonificación Sísmica de Bogotá D.C." 10*
- Tabla 3. Coeficientes de diseño. Fuente: Decreto 523 de diciembre 16 de 2010 "Por el cual se adopta la Microzonificación Sísmica de Bogotá D.C." 12*
- Tabla 4. Aplicación de aislamiento sísmico de base en edificaciones. Fuente: Consecuencias de la posible aplicación a Colombia de las normas más actuales sobre aislamiento sísmico de edificios. (Piscal & Almansa, 2016) 22*
- Tabla 5. Coeficiente de amortiguamiento B_D o B_M . Fuente: (Building Seismic Safety Council, 2003). 33*
- Tabla 6. Masas del sistema 3gdl fijo. Fuente: Propia. 49*
- Tabla 7. Modos de Vibración y Porcentajes de Participación de Masas. Fuente: Propia con Análisis en ETABS. 73*
- Tabla 8. Centros de Masas y Rigideces por Piso. Fuente: Propia con Análisis en ETABS. 73*
- Tabla 9. Periodos y Porcentaje de Participación de Masas. Fuente: Propia con Análisis en ETABS. 74*
- Tabla 10. Carga axial en los nodos de la base debido a la combinación Pservicio (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia con Análisis en ETABS. 78*
- Tabla 11. Centros de Masa y Rigidez - Cálculo de excentricidades (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia con Análisis en ETABS. 78*
- Tabla 12. Valores de cargas axiales para diseño de Aisladores (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia con Análisis en ETABS. 79*
- Tabla 13. Áreas paramétricas del aislador LRB (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia. 83*
- Tabla 14. Propiedades calculadas para el aislador FPS Simple para 3 tipos diferentes (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia. 104*
- Tabla 15. . Propiedades calculadas para el aislador DFP para 3 tipos diferentes (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia. 110*
- Tabla 16. . Propiedades calculadas para el aislador TFP para 3 tipos diferentes (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia. 117*
- Tabla 17. Carga axial en los nodos de la base debido a la combinación Pservicio Taislado = 3 s (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia con Análisis en ETABS. 121*
- Tabla 18. Carga axial en los nodos de la base debido a la combinación Pservicio Taislado = 4 s (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia con Análisis en ETABS. 122*
- Tabla 19. Centros de Masa y Rigidez - Cálculo de excentricidades Taislado = 3s y 4s (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia con Análisis en ETABS. 123*
- Tabla 20. Valores de cargas axiales para diseño de Aisladores (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia con Análisis en ETABS. 123*
- Tabla 21. Áreas paramétricas del aislador LRB (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia. 127*
- Tabla 22. Propiedades calculadas para el aislador FPS Simple para 3 tipos diferentes (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia. 138*
- Tabla 23. . Propiedades calculadas para el aislador DFP para 3 tipos diferentes (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia. 141*
- Tabla 24. Propiedades calculadas para el aislador TFP para 3 tipos diferentes (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia. 145*
- Tabla 25. Parámetros de entrada Análisis Sísmico Edificación Base Fija. Fuente: Propia. 161*
- Tabla 26. Parámetros resultantes del análisis dinámico. Fuente: Propia. 161*
- Tabla 27. Parámetros definitivos modelo matemático. Fuente: Propia. 161*
- Tabla 28. Factores de participación modal. Fuente: Propia con análisis en ETABS. 162*
- Tabla 29. Fuerzas dinámicas por piso. Fuente: Propia con análisis en ETABS. 163*
- Tabla 30. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Vigas Perimetrales Plantas 5 y 6. Fuente: Propia con análisis en Sap2000. 165*
- Tabla 31. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Vigas Interiores Plantas 5 y 6. Fuente: Propia con análisis en Sap2000. 166*

- Tabla 32. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Vigas Perimetrales Plantas 1, 2, 3, y 4. Fuente: Propia con análisis en Sap2000. 167*
- Tabla 33. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Vigas Interiores Plantas 1, 2, 3, y 4. Fuente: Propia con análisis en Sap2000. 168*
- Tabla 34. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Columna Tipo sin Carga Axial. Fuente: Propia con análisis en Sap2000. 169*
- Tabla 35. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Columna Tipo con Carga Axial de 11.1 ton. Fuente: Propia con análisis en Sap2000. 170*
- Tabla 36. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Columna Tipo con Carga Axial de 114.3 ton. Fuente: Propia con análisis en Sap2000. 171*
- Tabla 37. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Columna Tipo con Carga Axial de 289.0 ton. Fuente: Propia con análisis en Sap2000. 172*
- Tabla 38. Parámetros de entrada Análisis Sísmico Edificación Base Fija. Fuente: Propia. 174*
- Tabla 39. Parámetros resultantes del análisis dinámico 174*
- Tabla 40. Parámetros definitivos modelo matemático 174*
- Tabla 41. Factores de participación modal. Fuente: Propia con análisis en ETABS. 175*
- Tabla 42. Fuerzas dinámicas por piso. Fuente: Propia con análisis en ETABS. 176*
- Tabla 43. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Vigas Perimetrales Plantas 5 y 6. Fuente: Propia con análisis en Sap2000. 179*
- Tabla 44. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Vigas Interiores Plantas 5 y 6. Fuente: Propia con análisis en Sap2000. 180*
- Tabla 45. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Vigas Perimetrales Plantas 1, 2, 3, y 4. Fuente: Propia con análisis en Sap2000. 181*
- Tabla 46. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Vigas Interiores Plantas 1, 2, 3, y 4. Fuente: Propia con análisis en Sap2000. 182*
- Tabla 47. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Columna Tipo sin Carga Axial. Fuente: Propia con análisis en Sap2000. 183*
- Tabla 48. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Columna Tipo con Carga Axial de 5.2 ton. Fuente: Propia con análisis en Sap2000. 184*
- Tabla 49. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Columna Tipo con Carga Axial de 82.6 ton. Fuente: Propia con análisis en Sap2000. 185*
- Tabla 50. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Columna Tipo con Carga Axial de 290.7 ton. Fuente: Propia con análisis en Sap2000. 186*
- Tabla 51. Parámetros finales para modelación del sistema de Aislación LRB + SL. Fuente: Propia. 188*
- Tabla 52. Distribución en planta del sistema de Aislación LRB + SL. Fuente: Propia. 189*
- Tabla 53. Parámetros finales según configuración del sistema de aislación Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia. 190*
- Tabla 54. Parámetros finales según configuración del sistema de aislación Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia. 190*
- Tabla 55. Formación de Rótulas Plásticas Consolidado R1-R7 – Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia. 251*
- Tabla 56. Cálculo de derivas en el modelo aislado por análisis de desempeño para el registro R1 – Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia. 252*
- Tabla 57. Cálculo de derivas en el modelo aislado por análisis de desempeño para el registro R4 – Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia. 252*

Lista de abreviaturas

NSR: Norma Sismo Resistente.
FPS: Friction Pendulum Simple.
DFP: Double Friction Pendulum.
TFP: Triple Friction Pendulum.
LRB: Lead Rubber Bearing.
HDR: High Damping Rubber Bearing.
THNLA: Time History NonLinear Analysis.
ELF: Equivalent Lateral Force Analysis.
RSA: Response Spectrum Analysis.
GDL: Grados de libertad.

Resumen

Resumen del trabajo. Este estudio contempló la revisión de la literatura y antecedentes sobre los principios del aislamiento sísmico en la base, para la comprensión de los objetivos de este tipo de medida de protección contra los efectos adversos de los terremotos. Se estableció una propuesta de metodología que con miras a definir un procedimiento de diseño por cada tipo de dispositivo según el material y naturaleza del mecanismo de trabajo. Se desarrollaron en total 18 modelos matemáticos, usando cuatro tipos de análisis sísmicos, ELF, RSA, NLSP, THNLA, en las etapas de predimensionamiento, análisis, diseño y verificación de desempeño estructural, se definieron parámetros de comparación o control, para cotejar la eficiencia de los sistemas de aislamiento en 18 modelos matemáticos entre ellos mismos y estructuras empotradas en la base en dos microzonas sísmicas de la ciudad de Bogotá D.C.

Los sistemas de aislación reducen efectivamente en comparación a una estructura en base fija, aceleraciones, desplazamientos relativos, cortantes y fuerzas sísmicas por piso y en la base, gracias al aumento del periodo de la edificación y del amortiguamiento, sin embargo, es más efectivo en la microzona Piedemonte C por los efectos locales del tipo de suelo. Luego de la selección del sistema de aislación más conveniente según los resultados y valores de los parámetros de comparación, se realizó el diseño estructural, donde se definieron secciones y refuerzos definitivos de los elementos estructurales y posterior a ello la generación de las propiedades de las rótulas a asignarse para la verificación del desempeño sísmico y comportamiento del diseño estructural, tanto de los modelos con base fija mediante el NLSP, como de los modelos aislados a través de THNLA para ambas microzonas.

El desempeño sísmico fue satisfactorio para la microzona Piedemonte C para modelos aislados y con base fija, teniendo presente que el aislado se encuentra en un nivel IO para sismo máximo considerado mientras que el fijo en la base en LS. En la microzona Lacustre 200 el diseño del modelo con base fija no fue satisfactorio para los requisitos de desempeño de la normativa, el modelo en base aislada presenta también un incremento en el desempeño, pero se encontraron alrededor del 0.4% de formación de rótulas en columnas en nivel >CP, lo que indica que hay que ser cuidadosos con las propiedades de los suelos locales, porque los aisladores en suelos blandos tienden a amplificar los efectos de los movimientos del terreno.

Palabras clave: aislación basal, aisladores fricción, aisladores elastoméricos, desempeño sísmico sistema de aislación.

Abstract

Abstract. This study took a look at the state of the art on the principles of seismic isolation in the base, for the understanding of the principles of this type of protection measure against the adverse effects of earthquakes. A methodology proposal was established that contemplated the design procedure for each type of device according to the material and nature of the work mechanism. A total of 18 mathematical models were developed, using four types of seismic analysis, ELF, RSA, NLSP, THNLA, in predetermination's stage, analysis, design and verification of structural performance, control parameters were defined, to compare the efficiency of the isolation systems in 18 mathematical models between themselves and structures embedded in the base in two seismic microzones of the city of Bogotá D.C.

Compared to a fixed base structure, the isolation systems effectively reduce accelerations, relative displacements, shears and seismic forces per floor and at the base, thanks to the increase in the period of the building and the damping, however, it is more effective in the Piedemonte C microzone due to the local effects of soil type. After the selection of the most convenient isolation system according to the results and values of the comparison parameters, the structural design was developed, where definitive sections and reinforcements of the structural elements were defined and after that, the generation of the properties of the hinges. to be assigned for the verification of the seismic performance and behavior of the structural design, both of the fixed base models through the NLSP, and in the isolated models through THNLA for both microzones.

The seismic performance was satisfactory for the Piedemonte C microzone for isolated and fixed base models, considering in mind that the isolated model is at an IO level for the maximum considered earthquake while the fixed base is at LS. In the Lacustre 200 microzone, the design of the model with a fixed base was not satisfactory for the performance requirements of the regulations, the model with an isolated base also presented an increase in performance, but around 0.4% formation of hinges in columns was found in level >CP, which indicates that the structural engineer must be proceed carefully with the properties of local soils, because isolators in soft soils tend to amplify the effects of ground movements.

Key words: base isolation, friction isolators, elastomeric isolators, isolation system seismic performance.

Capítulo 1 Introducción

A través del paso de los años se ha convertido en prioridad para el diseñador estructural poder proporcionar una estructura resistente ante las acciones de eventos naturales, preservando la vida de las personas y en segundo plano los bienes económicos. Las cargas sísmicas y el análisis de las mismas desde el punto de vista dinámico regulan el diseño, controlando los daños esperados y prediciendo el comportamiento en el momento de ocurrencia del evento.

Aun cuando el estudio de los sismos en la actualidad es más riguroso, amplio y se cuenta con tecnología y aparatos que permiten el conocimiento con más detalle de las características de los mismos, comparado con las décadas anteriores, su aleatoriedad y capacidad de liberación instantánea de energía y su consecuente acción destructiva, hacen que los sismos permanezcan entre los fenómenos más impredecibles y como factor crítico a considerar en el diseño de estructuras.

Los sistemas de aislación en la base de edificaciones se pueden remontar al año 550 después de Cristo aproximadamente, cuando se construyó la tumba de Cyrus el Grande en Irán, este sistema consistente prácticamente de dos cimentaciones, una a nivel inferior o base con piedras cementadas con materiales de la época y completamente pulidas generando una superficie suave, seguido de un nivel superior sin cementar a la base, compuesto de rocas pulidas unidas entre sí por barras de metal conformando una placa. Ante la ocurrencia del terremoto, cuando la tierra se mueve, la base se mueve, y la parte superior se desliza libremente sobre su base, constituyéndose así en el primer sistema de aislamiento para una estructura que hasta el día de hoy está en pie sin daños significativos en una de las zonas con significativa actividad sísmica del mundo.

Otro registro de propuesta de aislamiento en la base para edificaciones la realizó el doctor inglés J.A. Calantariens en el año 1909, consistía en construir la estructura sobre una capa de arena, mica o talco, al presentarse el sismo se esperaba que la estructura se deslizara sobre esta “Articulación libre lubricada”.

En épocas recientes la primera estructura moderna aislada en su base fue la Escuela Pestalozzi en Skopje, Macedonia, en 1969, el aislamiento consistió en un sistema de 16 cojinetes de goma, cada uno hecho de 7 capas de caucho no reforzado, pegados entre sí con un tipo de adhesivo. Tuvo como desventaja la generación de movimientos verticales. Para contrarrestar este suceso se desarrollaron luego, aisladores tipo goma reforzados con placas de acero, además con un núcleo de plomo que proporciona rigidez en la dirección vertical.

Este tipo de aisladores han presentado según su diseño el comportamiento esperado, una gran flexibilidad en cuanto a movimientos horizontales y una rigidez suficientemente fuerte al movimiento vertical ante la presencia de sismos, como se evidenció en los eventos de Northridge (1994) and Kobe (1995).

Existen también otro tipo de aisladores, los deslizantes, donde la fricción generada a través del contacto entre dos superficies (comúnmente teflón o acero inoxidable como material) proporciona la disipación de la energía sísmica. Algunas ventajas de estos sistemas radican en la mínima

generación de torsión adicional al excluirse la excentricidad entre el centro de masa de la superestructura y del centro de rigidez, la capacidad de disipación de energía sísmica dentro de un amplio rango de frecuencias naturales de vibración, disminuyéndose el riesgo de entrar en resonancia con la frecuencia natural del suelo; además los materiales usados en este sistema de aislamiento sísmico son más duraderos y resistentes.

El diseño estructural tradicional basado en fuerzas, por lo general, para el cumplimiento de derivas, implica rigidizar la estructura, buscando hacer los elementos más resistentes aumentando el tamaño de sus secciones transversales, con ello, en concordancia con la segunda ley de Newton, se generan fuerzas inerciales internas más grandes en dichos elementos ante la ocurrencia del sismo y amplificación de los niveles de daño. Ahora el comportamiento y desempeño de una estructura depende de muchos factores que influyen directamente y controlan el diseño, la naturaleza del suelo de fundación, el espectro de diseño o aceleración del suelo esperado según su posicionamiento geográfico, la configuración en planta y altura de la edificación, el sistema estructural principal de resistencia sísmica escogido y las condiciones de apoyo en su base.

Se plantea un estudio comparativo del comportamiento y desempeño de una estructura regular en planta y altura, considerando condiciones de apoyo diferentes en la base (aisladas y empotradas), con sistemas de resistencia sísmica de pórticos resistentes a momentos, y variando su ubicación geográfica dentro de la ciudad de Bogotá D.C.

Con la inclusión de aisladores en la base, se pretende que este sistema absorba las sollicitaciones o demandas de aceleración provenientes del suelo en una gran proporción, analizando la repercusión en el desempeño y diseño de la estructura y los niveles de daño esperados tanto en los elementos estructurales como no estructurales.

1.1. Planteamiento del problema

¿Hay reducción de las variables que controlan el diseño y por ende se comportan y desempeñan las estructuras aisladas en la base mejor que las empotradas ante la ocurrencia de un evento sísmico teniendo en cuenta los efectos de amplificación relativos al tipo de suelo de apoyo?

¿De los sistemas de aislación sísmica a estudiar (tipo fricción o elastoméricos) cuál presenta en términos de desempeño y comportamiento estructural más ventajas que el otro, reflejado en los resultados del análisis lineal y no lineal?

¿Cuál es la incidencia de las condiciones del tipo de suelo de las dos microzonas a estudiar Lacustre 200 y Piedemonte C establecidas en el Decreto 523 de 2010 Microzonificación Sísmica de Bogotá en los sistemas de aislación sísmica en la base a estudiar?

1.2. Justificación

Las pérdidas de vidas y económicas al ocurrir un evento sísmico de magnitud considerable son catastróficas para el desarrollo de una ciudad, la respuesta ante la emergencia se ve obstaculizada

en gran medida por los daños y afectación de las edificaciones. De las experiencias vividas alrededor del mundo, se ha evidenciado que los desplazamientos relativos de las estructuras ocasionan los principales perjuicios, comenzando con la lluvia de elementos no estructurales y posteriormente de los elementos estructurales.

Las estructuras empotradas en su base permiten la amplificación de la aceleración sísmica proveniente del suelo en las partes altas de la edificación, lo que conlleva a la generación de los desplazamientos relativos piso a piso, responsables de la mayor destrucción y presencia de daños en las mismas. Esa misma edificación si se considerara sobre aisladores presentaría una amplificación sísmica menor y evitaría en gran parte los movimientos relativos, ya que se mueve como un bloque completo.

Es importante observar y discutir la comparación de los resultados del análisis estructural de los edificios aislados con respecto a los empotrados, porque en gran medida es un indicador del comportamiento y desempeño esperado de la edificación ante el evento sísmico. Asimismo, representa una oportunidad de realizar diseños más eficientes y seguros, que conlleven a la protección de los bienes materiales de las personas y su propia vida.

El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, en su CAPÍTULO A.3. REQUISITOS GENERALES DE DISEÑO SISMO RESISTENTE, establece las condiciones de diseño que deben cumplirse para las edificaciones según la clasificación del sistema principal de resistencia sísmica y los demás criterios allí señalados. Específicamente en el artículo A.3.8 — ESTRUCTURAS AISLADAS SÍSMICAMENTE EN SU BASE establece que se permite el uso de empleo de estructuras aisladas sísmicamente en su base, siempre y cuando se cumplan en su totalidad los requisitos al respecto de uno de los dos documentos siguientes:

- (a) “NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings — Provisions and Commentary”, 2003 Edition, Federal Emergency Management Agency, FEMA 450, Building Seismic Safety Council, National Institute of Buildings Sciences, Washington, D.C., USA, 2004,
- (b) “Minimum Design Loads for Building and Other Structures”, ASCE/SEI 7- 10, Structural Engineering Institute of the American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA, 2006.

Por tanto, no se cuenta en el país con un método de diseño propio que se ajuste a las condiciones particulares del sitio. Se deben realizar investigaciones y proyectos referidos a estudiar este tipo de sistemas estructurales aislados sísmicamente en su base y la subsecuente comparación con los sistemas tradicionales, que conlleven en un futuro al planteamiento de una metodología de diseño propia y acorde a los suelos característicos de nuestras regiones.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- Desarrollar un análisis comparativo en cuanto al comportamiento y desempeño de edificaciones mediante la modelación matemática usando aisladores (elastoméricos,

friccionantes) y condiciones de empotramiento, para las microzonas Piedemonte y Lacustre según el Decreto 523 de 2010 Microzonificación Sísmica de Bogotá.

1.3.2.Objetivos Específicos

- Investigar el estado de arte actual de los aisladores sísmicos usados en Colombia, sus propiedades, clasificación, comportamiento esperado, utilidad, ventajas y desventajas.
- Determinar los parámetros de diseño que controlan el óptimo desempeño de los aisladores según su tipología.
- Adoptar la metodología de diseño para edificaciones con sistemas de aisladores con base en los requisitos dispuestos en “NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings — Provisions and Commentary”, 2003 Edition, Federal Emergency Management Agency, FEMA 450, Building Seismic Safety Council, National Institute of Buildings Sciences, Washington, D.C., USA, 2004, a las condiciones locales de la norma vigente.
- Modelar edificaciones regulares con sistema principal de resistencia sísmica PRM y condiciones de apoyo usando los tipos de aisladores considerados en el estudio y comparar su desempeño y comportamiento versus las estructuras modeladas en forma empotrada, para los espectros de diseño y señales que proponen los diferentes tipos de suelos encontrados en la Microzonificación Sísmica de Bogotá.

Capítulo 2 Antecedentes y Estado del Arte

2.1 Antecedentes del proyecto.

Se han desarrollado varios trabajos de investigación referentes al uso de aislación sísmica en la base, entre estos proyectos destacamos a nivel regional los siguientes:

(Auqui Parra, 2010) Análisis de aisladores sísmicos elastoméricos construidos en el Ecuador.

(Villavicencio Cedeño, 2015) Análisis sísmico estructural comparativo para edificios con aisladores de base tipo elastoméricos y friccionantes, para los diferentes tipos de suelos del Ecuador.

(Pastora Estrada & Ríos Novoa, 2016). Análisis del efecto de aisladores sísmicos en la respuesta dinámica de un edificio aporticado de 4 niveles, según las condiciones de suelo de la zona noroeste de la ciudad de Managua, Nicaragua.

(Trujillo Benito, 2017) Diseño integral de estructuras con sistema de aislación sísmica aplicado a un edificio de concreto armado.

En Colombia se han desarrollado los siguientes trabajos de investigación referentes al tema:

(Montoya Vallecilla, 2010) Análisis sísmico de un edificio con aislamiento en la base.

(Castilla Romero & Montes Flórez, 2011) Análisis estructural y económico de edificios de 30 pisos en la ciudad de Cartagena, mediante análisis estático y empleando aisladores sísmicos.

(Melo Bojacá, 2013) Aisladores sísmicos elastoméricos en centros de salud, caso Clínica Comfandi.

(Galindo Gómez, 2014) Comparación del comportamiento dinámico del edificio Park Way 41 con y sin aisladores pasivos en Bogotá usando el programa de elementos finitos- SAP 2000.

(Piscal & Almansa, 2016) Consecuencias de la posible aplicación a Colombia de las normas más actuales sobre aislamiento sísmico de edificios.

(Piscal Arévalo & López Almansa, 2018) Propuesta para la futura norma de aislamiento sísmico de edificaciones en Colombia.

(Correa Ávila, 2019) Apoyo para la elaboración y organización del documento correspondiente a la futura norma de aislamiento sísmico en Colombia.

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Ingeniería Sísmica en Colombia.

La ingeniería sísmica nació a partir de la necesidad de estudiar y comprender el comportamiento de uno de los eventos de mayor capacidad destructiva a los que se puede enfrentar el ser humano y la corteza terrestre en general, el sismo. La gran cantidad de liberación súbita de energía elástica producida por los movimientos de las placas tectónicas, es de interés particular por su repentina ocurrencia y la incapacidad hasta ahora de predecirla. No obstante, se han desarrollado a lo largo de décadas equipos y estudios que han ayudado a caracterizar el impacto y medir niveles de magnitud, así como escalar el nivel de daño y afectación de los sismos y acercarse un poco a la comprensión del fenómeno. Las experiencias vividas son por tanto la materia prima principal para adentrarse en el estudio del evento.

Colombia se encuentra posicionada entre tres placas, la placa de Nazca, la placa Suramericana y la placa Caribe, lo que la convierte en una zona con tectónica compleja. Los esfuerzos y diferentes estudios con grados de detalles que han identificado las principales fallas del territorio nacional, han nacido no por una necesidad puntual del gobierno en cuanto a un componente social sino más por datos aportados por las industrias mineras y petroleras que estudian el suelo para sus proyectos puntuales de inversión y aprovechamiento de recursos.

Es así como en el reglamento colombiano de diseño sismorresistente se obtienen los datos para la elaboración de los espectros de diseño para cada una de las zonas de amenaza sísmicas detectadas en el país y sus subsecuentes variaciones según el tipo de suelo que se presente. Estas aceleraciones y parámetros de diseño no reflejan con precisión y exactitud las condiciones específicas de tipo zonal, sino que hace una tipificación general. En ciudades como Bogotá, Cali, se cuenta en la actualidad con el estudio de microzonificación sísmica, el cual tiene en cuenta los efectos locales y la respuesta dinámica de los suelos por la actividad sísmica regional. A continuación, se hace una breve descripción del Decreto Distrital 523 de 2010 por el cual se adopta la Microzonificación Sísmica de Bogotá D.C., dónde se han definido los parámetros de sismo resistencia para el diseño y análisis de edificaciones.

DECRETO DISTRITAL 523 DE 2010 POR EL CUAL SE ADOPTA LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE BOGOTÁ D.C.

Como se mencionó anteriormente, el decreto 523 de 2010 establece los parámetros de diseño sismorresistente para el diseño y construcción de las edificaciones cubiertas por el alcance establecido en la sección A.1.2.3 de la NSR 10 ubicadas en la zona urbana de Bogotá D.C. Este estudio que resultó del esfuerzo mancomunado de distintos actores (Ingeominas, FOPAE, Sociedad Colombiana de Geotecnia SGC, la Universidad de los Andes, la Asociación de Ingeniería Sísmica AIS, Red de Acelerógrafos de Bogotá) y que tuvo como base la información del proyecto de Microzonificación Sísmica de Bogotá (Ingeominas y Uniandes, 1997) tiene carácter obligatorio y es substitutivo de las secciones A.2.4 y A.2.6 del Reglamento NSR-10, contemplando el decreto en su Artículo 2 las diferentes microzonas geotécnicas y de respuesta sísmica que se describen a continuación.

Nombre	Geotecnia	Geología	Geomorfología	Composición principal	Comportamiento geotécnico general
Cerros A	Roca de arenisca	Formaciones de arenisca	Cerros de alta pendiente	Areniscas duras	Rocas competentes y resistentes a la meteorización, eventuales problemas de estabilidad de taludes en excavaciones a ciclo abierto, principalmente cuando estén fracturadas o con intercalaciones de arcillolitas blandas
Cerros B	Roca de arcillolita	Formaciones de arcillolita	Cerros de moderada a alta pendiente	Arcillolitas blandas	Rocas de moderada competencia y susceptibles a la meteorización, problemas de estabilidad de taludes en excavaciones a ciclo abierto, principalmente cuando estén fracturadas
Piedemonte A	Suelo coluvial y aluvial norte	Coluviones y complejos de conos coluviales	Piedemonte	Gravas arcillo arenosas compactas	Suelos de alta capacidad portante, pero pueden presentar problemas de inestabilidad en excavaciones abiertas
Piedemonte B	Suelo coluvial y aluvial centro			Gravas areno arcillosas compactas	
Piedemonte C	Suelo coluvial y aluvial sur			Gravas areno arcillosas compactas	
Lacustre A	Suelo lacustre muy blando	Terraza Alta - Lacustre	Planicie	Arcillas limosas muy blandas	Suelos de muy baja a media capacidad portante y muy compresibles
Lacustre B	Suelo lacustre blando			Arcillas limosas blandas	
Lacustre C	Suelo lacustre - aluvial			Arcillas arenosas firmes	
Aluvial	Suelo aluvial grueso a medio	Terraza Baja – Aluvial y Complejo de	Planicie	Arenas arcillosas	Suelos de mediana a alta capacidad

Nombre	Geotecnia	Geología	Geomorfología	Composición principal	Comportamiento geotécnico general
		conos aluviales		sueltas a compactas	portante poco compresibles, susceptibles a licuación e inestables en excavaciones a suelo abierto
Llanura A	Suelo de llanura - lacustre	Llanura de inundación	Llanura	Arenas sueltas y arcillas limosas blandas	Suelos de moderada capacidad portante y compresibles, susceptibles a licuación
Llanura B	Suelo de llanura - aluvial			Arenas sueltas y arcillas arenosas duras	
Cauce	Cauce activo o antiguo	Cauces activos	Piedemonte y Planicie	Gravas arenosas sueltas a compactas	Suelos de baja a mediana capacidad portante, susceptibles a licuación y problemas de estabilidad de taludes
Depósitos	Suelo de ladera	Depósitos de ladera	Cerros	Gravas arenosas arcillosas compactas	Suelos de mediana capacidad portante, susceptibles a problemas de estabilidad de taludes
Residual	Suelo residual	Suelo residual	Cerros	Arcillas gravo arenosas firmes	Suelos de mediana a alta capacidad portante con posibles problemas de estabilidad de taludes en sectores de alta pendiente
Basura	Relleno de basura	Rellenos de basura	Piedemonte y Planicie	Basuras	Materiales heterogéneos, que de acuerdo con su disposición pueden ser compresibles y susceptibles a problemas de estabilidad de taludes

Nombre	Geotecnia	Geología	Geomorfología	Composición principal	Comportamiento geotécnico general
Relleno	Relleno de excavación	Rellenos de excavación	Piedemonte Y Planicie	Rellenos heterogéneos	Materiales heterogéneos, que de acuerdo con su disposición pueden ser compresibles y susceptibles a problemas de estabilidad de taludes
Excavación	Excavación especial	Excavaciones especiales	Piedemonte	Gravas arenosas sueltas a compactas	Zonas de explotación de agregados en el río Tunjuelo, susceptibles a problemas de estabilidad de taludes

Tabla 1. Descripción de las zonas geotécnicas. Fuente: Decreto 523 de diciembre 16 de 2010 "Por el cual se adopta la Microzonificación Sísmica de Bogotá D.C."

Zona	Espesor del depósito (m)	Periodo fundamental del suelo (s)	Descripción geotécnica general	Velocidad onda promedio 50 m Vs (m/s)	Humedad promedio 50 m Hn (%)	Efectos de sitio relacionados
Cerro	-	< 0.3	Rocas sedimentarias y depósitos de ladera con espesores inferiores a 6 m	> 750	< 10	Topográfico
Piedemonte A	< 50	0.3 – 0.6	Suelos coluvial y aluvial con intercalaciones de arcillas blandas: Bloques, cantos y gravas con matriz arcillo arenosas o areno arcillosa, capas de arcillas blandas	200 - 750	10 - 80	Topográfico – Amplificación
Piedemonte B	< 50	0.3 – 0.6	Suelo coluvial y aluvial con espesor superior	300 - 750	10 - 30	Topográfico – Amplificación

Zona	Espesor del depósito (m)	Periodo fundamental del suelo (s)	Descripción geotécnica general	Velocidad onda promedio 50 m Vs (m/s)	Humedad promedio 50 m Hn (%)	Efectos de sitio relacionados
Piedemonte C	< 50	0.3 – 0.6	a 12 m: Bloques, cantos y gravas con matriz arcillo arenosas o areno arcillosa			
Lacustre – 50	< 50	1.0 – 1.5	Suelo lacustre blando: Arcillas limosas o limos arcillosos, en algunos sectores con intercalaciones de lentes de turba	< 175	> 80	Amplificación
Lacustre – 100	50 - 100	1.5 – 2.5				Amplificación
Lacustre – 200	100 - 200	2.5 – 3.5				Amplificación
Lacustre – 300	200 – 300	3.5 – 4.5				Amplificación
Lacustre – 500	300 – 500	4.5 – 6.5				Amplificación
Lacustre Aluvial – 200	100 – 200	2.0 – 3.0	Suelo lacustre con intercalaciones de aluvial:	< 200	> 60	Amplificación
Lacustre Aluvial – 300	200 – 300	3.0 – 4.0	Arcillas limosas o limos arcillosos con lentes de turba y capas de arenas compactas			Amplificación
Aluvial – 50	< 50	0.4 – 0.8	Suelo aluvial duro: Arcillas limosas o arenas arcillosas o limos arenosos, en algunos sectores se encuentran lentes de arenas limpias	175 – 300	25 – 50	Amplificación, licuación
Aluvial – 100	50 – 100	0.8 – 1.2				Amplificación, licuación
Aluvial – 200	100 – 200	1.2 – 2.5				Amplificación, licuación
Aluvial – 300	200 – 300	2.5 – 4.0				Amplificación, licuación
Depósito Ladera	6 – 25	< 0.3	Depósitos de ladera con espesores superiores a 6 m de composición variable	Variable según depósito	Variable según el tipo de depósito	Topográfico

Tabla 2. Descripción de las zonas de respuesta sísmica. Fuente: Decreto 523 de diciembre 16 de 2010 "Por el cual se adopta la Microzonificación Sísmica de Bogotá D.C."

Se dispone en la web del Sistema de información para la Gestión del Riesgo y Cambio Climático (<https://www.sire.gov.co/>), de la herramienta online Geoportal, que sirve de consulta de zonas geotécnicas y zonas de respuesta sísmica según la dirección del predio a localizar. Como se ve en las figuras siguientes.

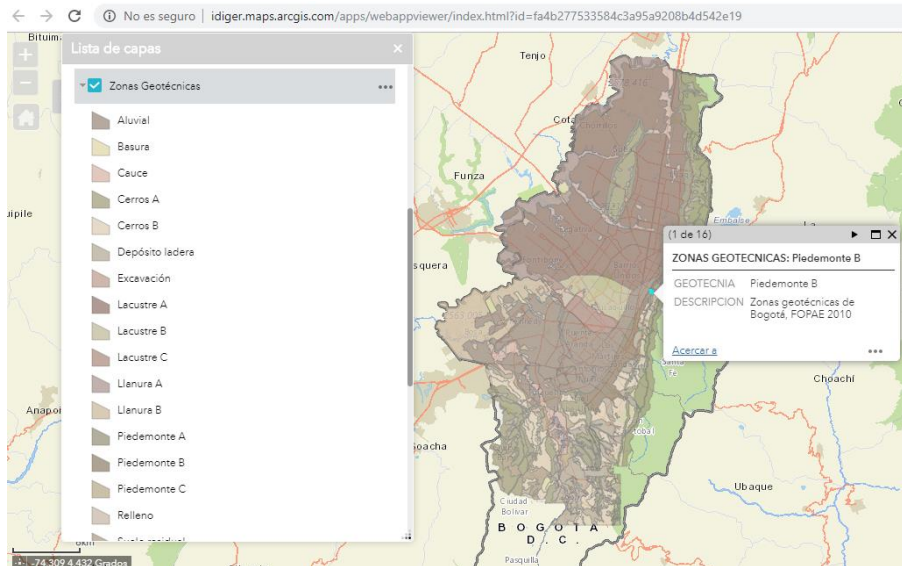


Figura 1. Localización de zonas geográficas según dirección de predio Fuente <https://www.sire.gov.co/> (Geoportal)

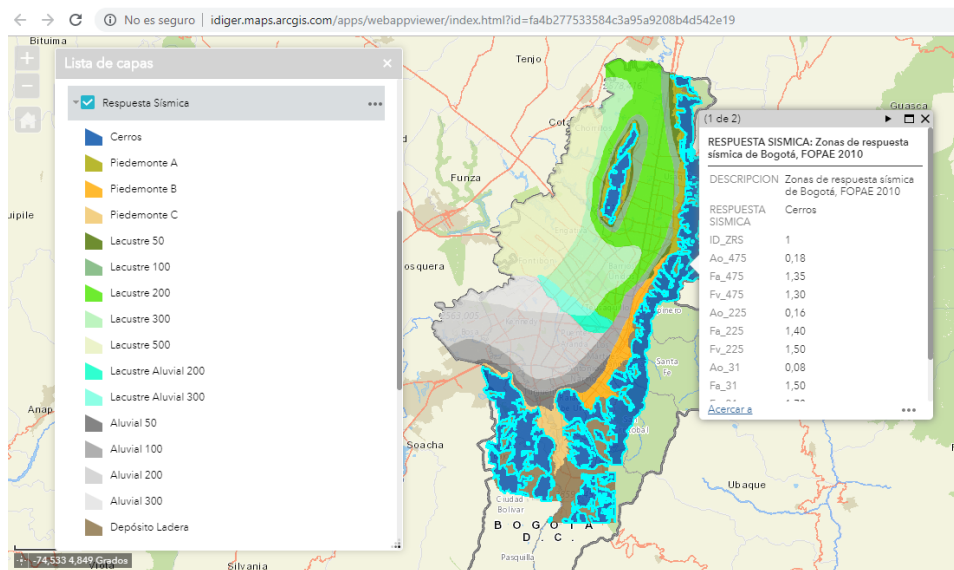


Figura 2. Localización de zonas de respuesta sísmica según dirección de predio Fuente <https://www.sire.gov.co/> (Geoportal)

El Artículo 4° del decreto 523 de 2010 establece que “Las edificaciones que se construyan o aquellas que sean ampliadas, adecuadas, modificadas en el Distrito Capital en forma tal que conlleven intervención estructural, o que sean objeto de reforzamiento estructural o rehabilitación sísmica, deberán diseñarse y construirse dependiendo de la ubicación en los planos denominados "Mapa 1. Zonas Geotécnicas" y "Mapa 2. Zonas de Respuesta Sísmica", acogiéndose los coeficientes y curvas para el diseño de edificaciones de conformidad con la "Tabla 3. Coeficientes y curva de diseño", salvo las construcciones del Título E de la NSR-10 las cuales se diseñarán de acuerdo con lo dispuesto en él. Se presenta entonces la tabla que contiene los valores de los coeficientes con los cuales se construyen las curvas de diseño para cada zona a estudiar.

Zona	F _a (475)	F _v (475)	T _c (s)	T _L (s)	A ₀ (475) (g)
Cerros	1.35	1.30	0.62	3.0	0.18
Piedemonte A	1.65	2.00	0.78	3.0	0.22
Piedemonte B	1.95	1.70	0.56	3.0	0.26
Piedemonte C	1.80	1.70	0.60	3.0	0.24
Lacustre – 50	1.40	2.90	1.33	4.0	0.21
Lacustre – 100	1.30	3.20	1.58	4.0	0.20
Lacustre – 200	1.20	3.50	1.87	4.0	0.18
Lacustre – 300	1.05	2.90	1.77	5.0	0.16
Lacustre – 500	0.95	2.70	1.82	5.0	0.14
Lacustre Aluvial – 200	1.10	2.80	1.63	4.0	0.17
Lacustre Aluvial – 300	1.00	2.50	1.60	5.0	0.15
Aluvial – 50	1.35	1.80	0.85	3.5	0.20
Aluvial – 100	1.20	2.10	1.12	3.5	0.18
Aluvial – 200	1.05	2.10	1.28	3.5	0.16
Aluvial – 300	0.95	2.10	1.41	3.5	0.14
Depósito Ladera	1.65	1.70	0.66	3.0	0.22

Tabla 3. Coeficientes de diseño. Fuente: Decreto 523 de diciembre 16 de 2010 "Por el cual se adopta la Microzonificación Sísmica de Bogotá D.C."

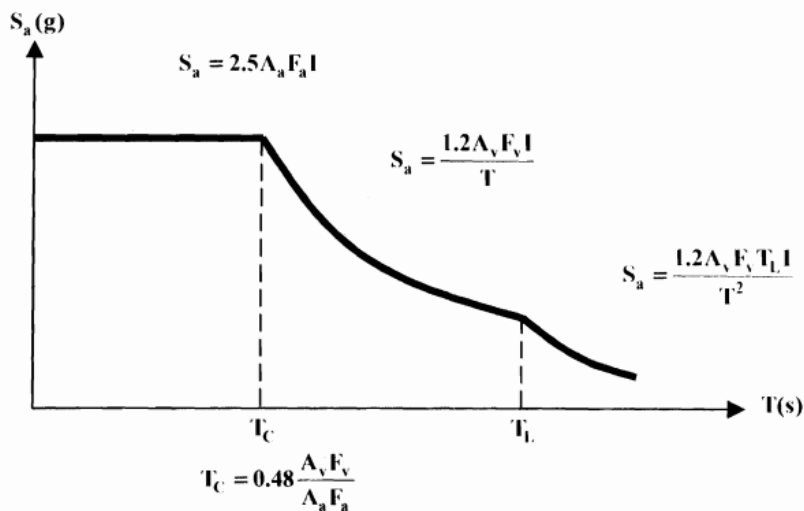


Figura 3. Curva de diseño para un coeficiente de amortiguamiento de 5% del crítico. Fuente: Decreto 523 de diciembre 16 de 2010 "Por el cual se adopta la Microzonificación Sísmica de Bogotá D.C."

Con base en la información presentada en la Figura 3, donde quedan identificadas las ecuaciones a usar en cada una de las zonas de la curva de diseño, y la Tabla 3 se construyen los espectros de diseño a usar para evaluar la respuesta de los edificios empotrados en la base versus los edificios con aislamiento sísmico.

Espectro de diseño para zona Cerros.

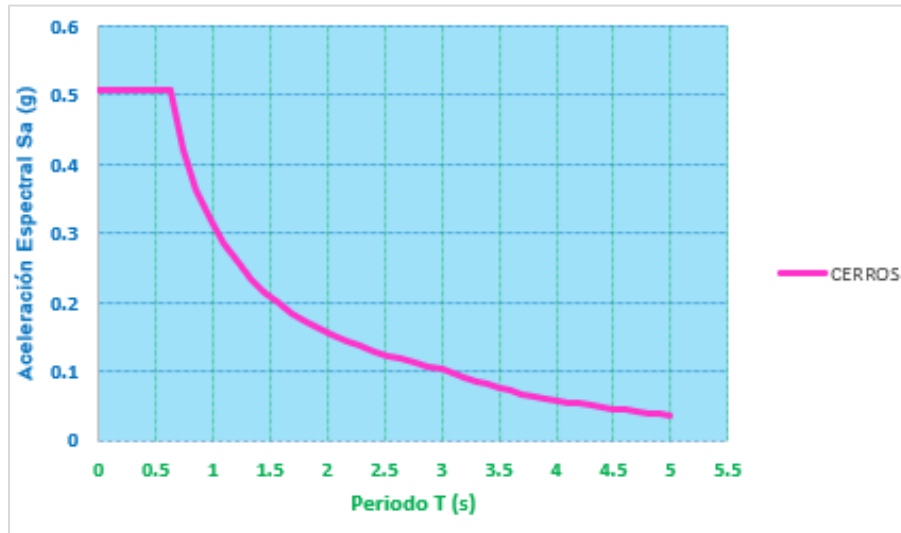


Figura 4. Curva de diseño para un coeficiente de amortiguamiento de 5% del crítico - Zona Cerros. Fuente: Propia.

Espectro de diseño para zona Piedemonte A.

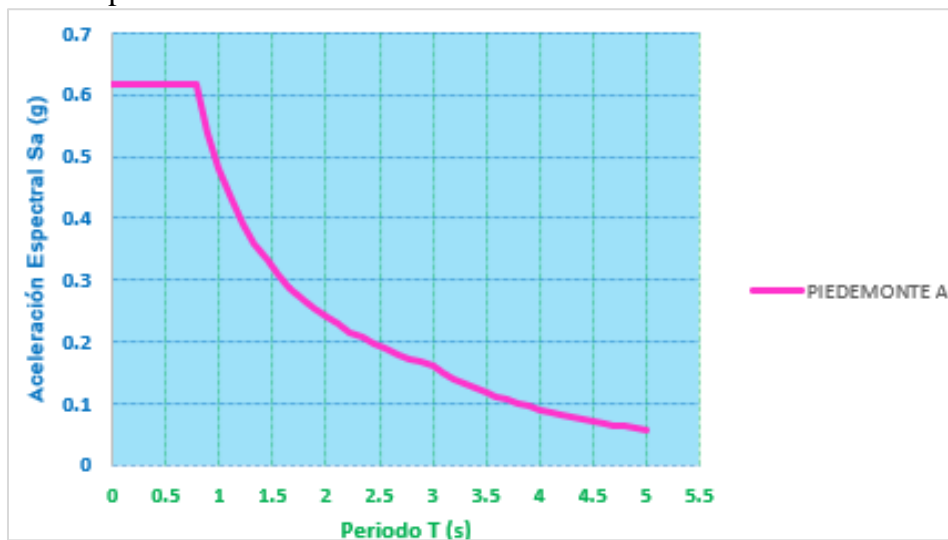


Figura 5. Curva de diseño para un coeficiente de amortiguamiento de 5% del crítico - Zona Piedemonte A. Fuente: Propia.

Espectro de diseño para zona Piedemonte B.

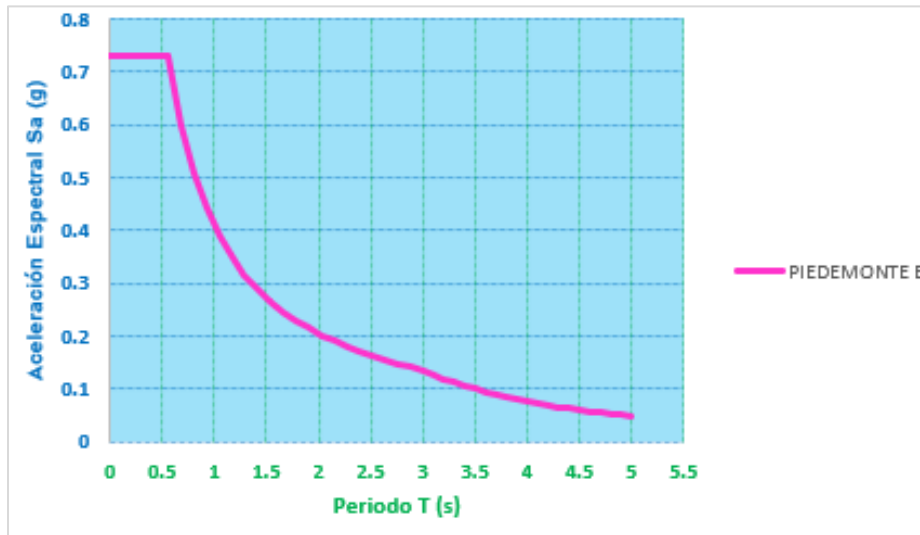


Figura 6. Curva de diseño para un coeficiente de amortiguamiento de 5% del crítico - Zona Piedemonte B. Fuente: Propia.

Espectro de diseño para zona Piedemonte C.

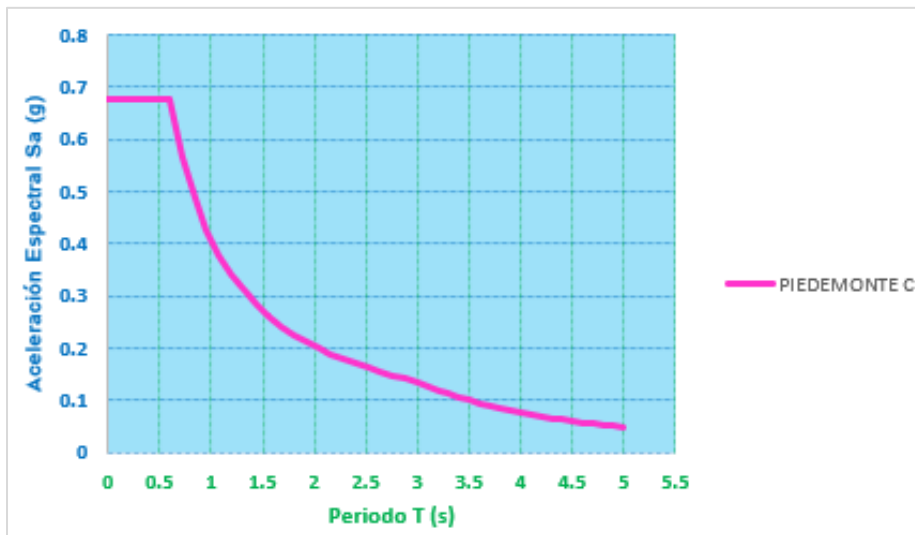


Figura 7. Curva de diseño para un coeficiente de amortiguamiento de 5% del crítico - Zona Piedemonte C. Fuente: Propia.

Espectro de diseño para zona Lacustre – 50.

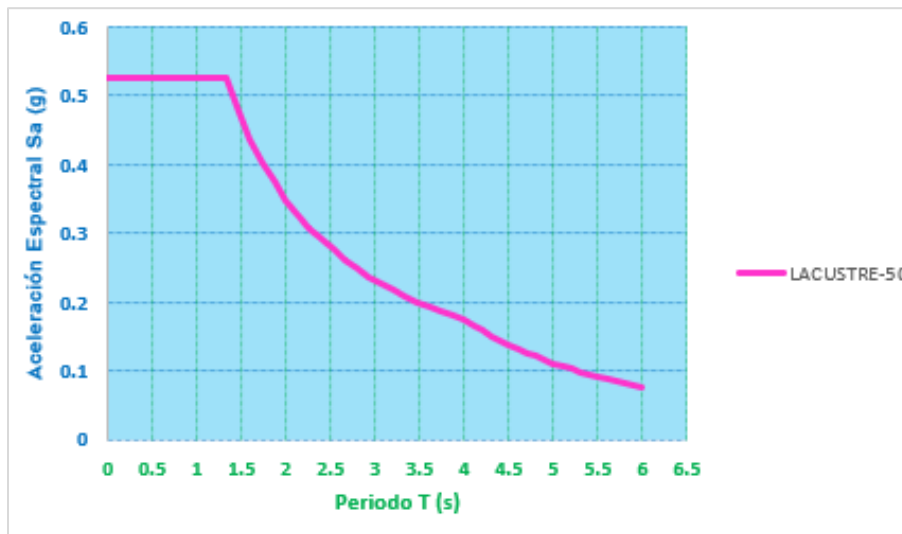


Figura 8. Curva de diseño para un coeficiente de amortiguamiento de 5% del crítico - Zona Lacustre - 50. Fuente: Propia.

Espectro de diseño para zona Lacustre – 100.

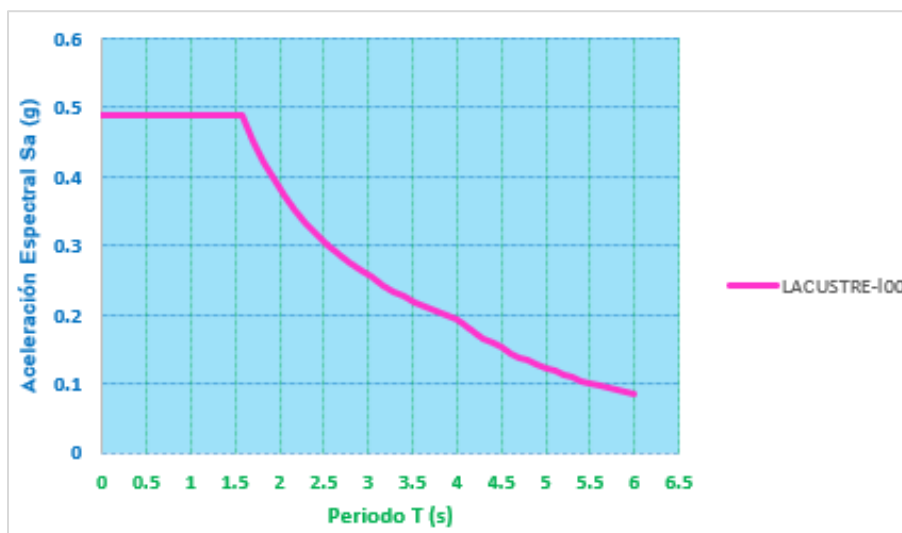


Figura 9. Curva de diseño para un coeficiente de amortiguamiento de 5% del crítico - Zona Lacustre - 100. Fuente: Propia.

Espectro de diseño para zona Lacustre – 200.

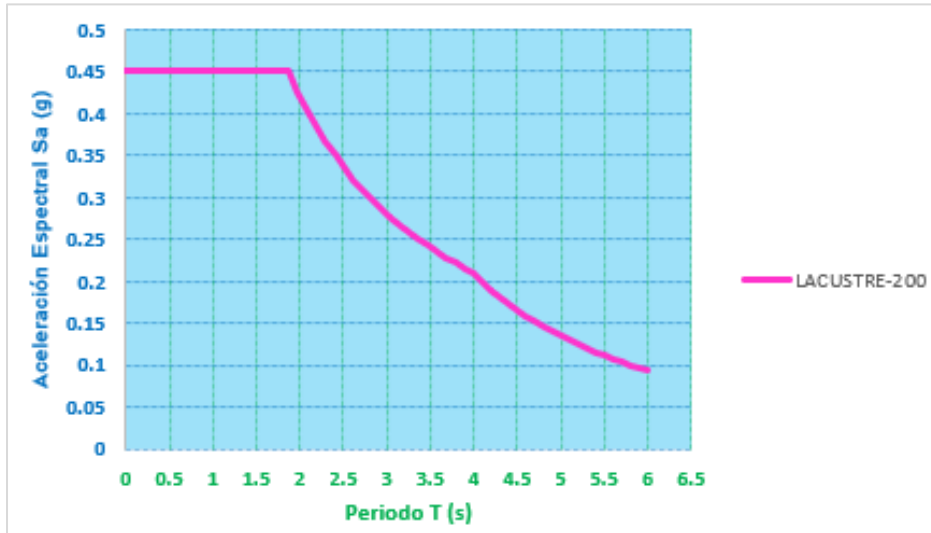


Figura 10. Curva de diseño para un coeficiente de amortiguamiento de 5% del crítico - Zona Lacustre - 200. Fuente: Propia.

Espectro de diseño para zona Lacustre – 300.

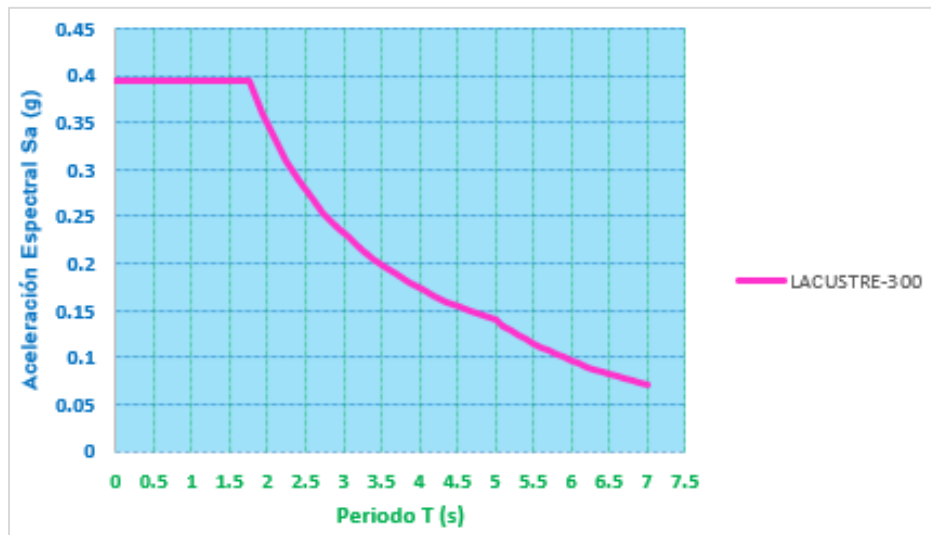


Figura 11. Curva de diseño para un coeficiente de amortiguamiento de 5% del crítico - Zona Lacustre - 300. Fuente: Propia.

Espectro de diseño para zona Lacustre – 500.

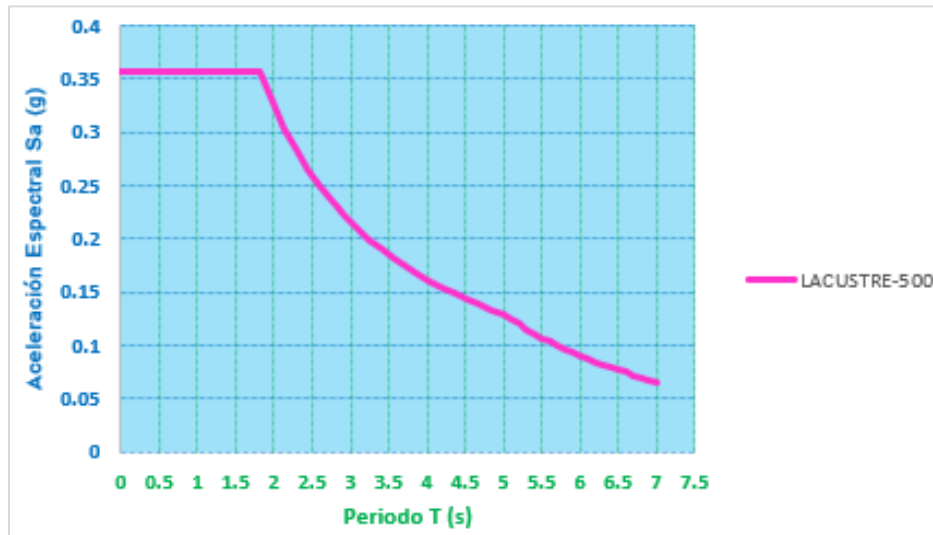


Figura 12. Curva de diseño para un coeficiente de amortiguamiento de 5% del crítico - Zona Lacustre - 500. Fuente: Propia.

Espectro de diseño para zona Lacustre Aluvial – 200.

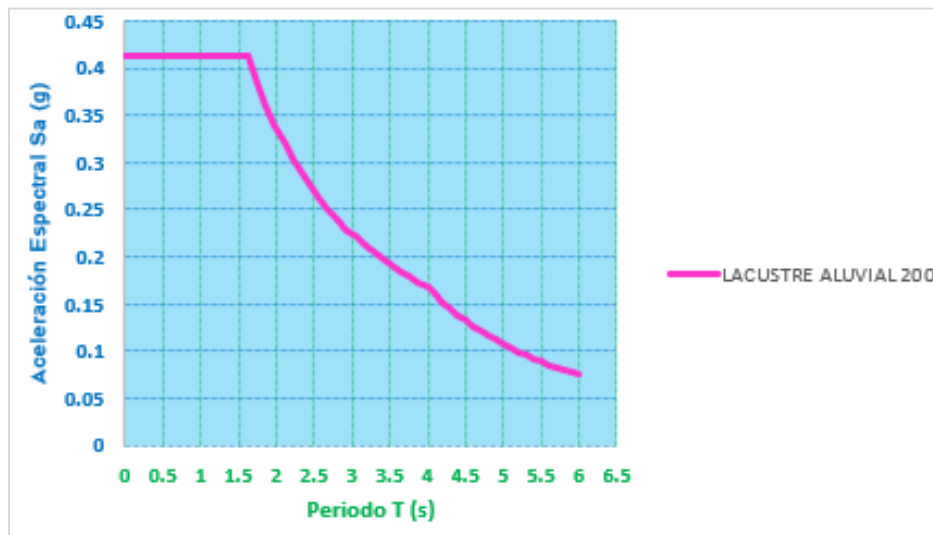


Figura 13. Curva de diseño para un coeficiente de amortiguamiento de 5% del crítico - Zona Lacustre Aluvial - 200. Fuente: Propia.

Espectro de diseño para zona Lacustre Aluvial – 300.

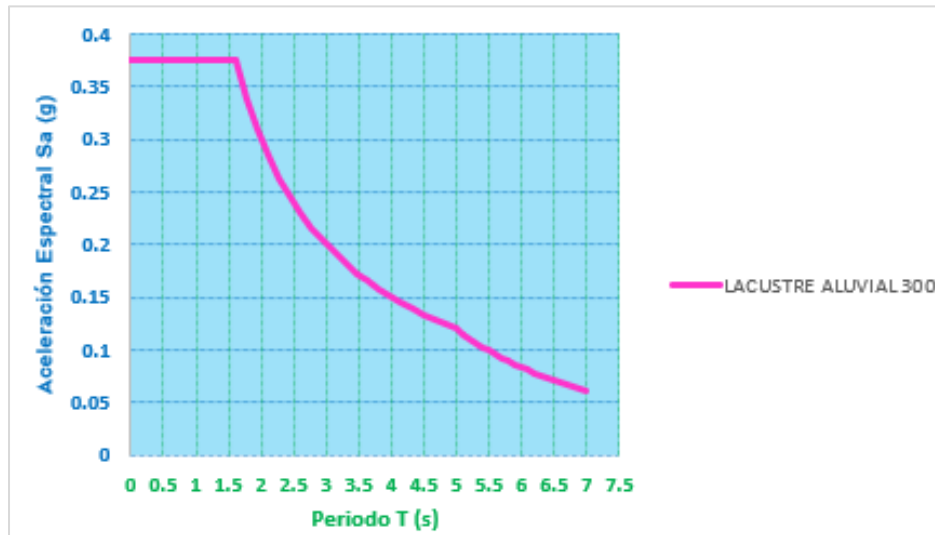


Figura 14. Curva de diseño para un coeficiente de amortiguamiento de 5% del crítico - Zona Lacustre Aluvial - 300. Fuente: Propia

Espectro de diseño para zona Aluvial – 50.

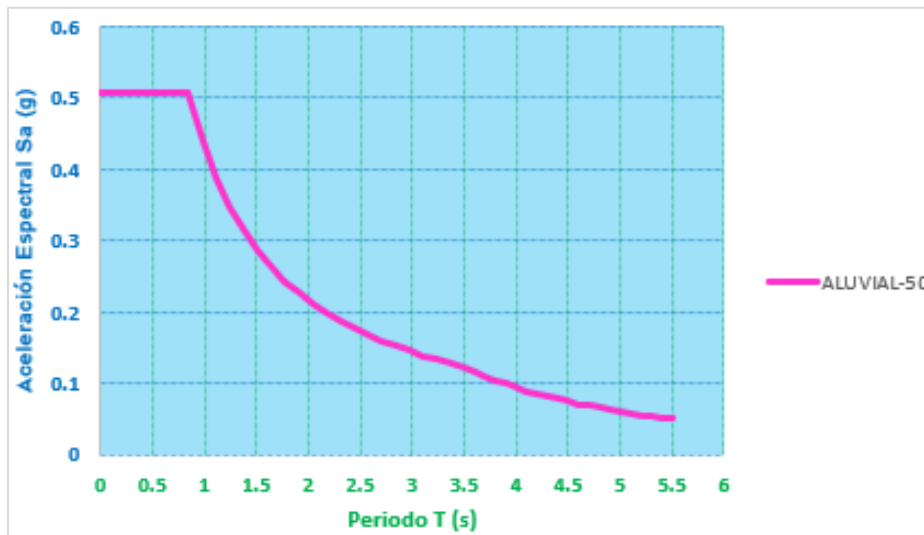


Figura 15. Curva de diseño para un coeficiente de amortiguamiento de 5% del crítico - Zona Aluvial - 50. Fuente: Propia

Espectro de diseño para zona Aluvial – 100.

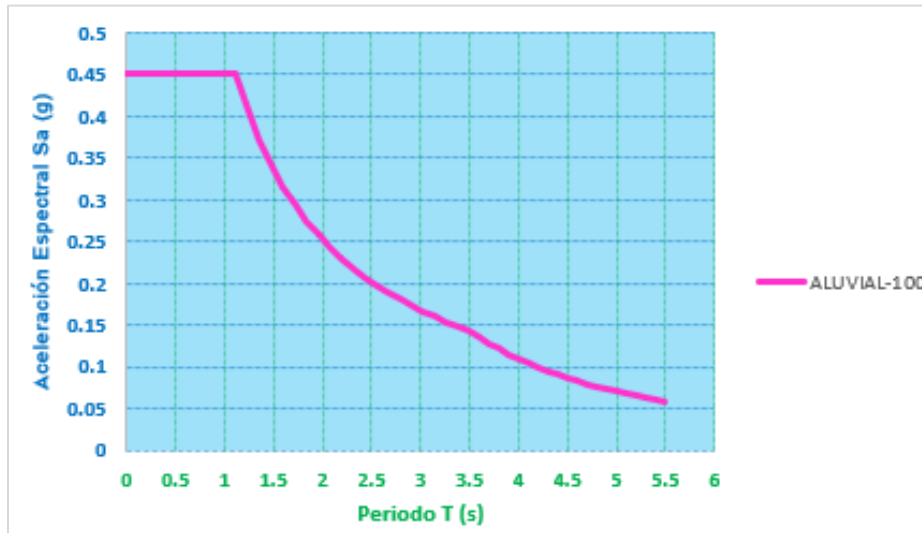


Figura 16. Curva de diseño para un coeficiente de amortiguamiento de 5% del crítico - Zona Aluvial - 100. Fuente: Propia

Espectro de diseño para zona Aluvial – 200.

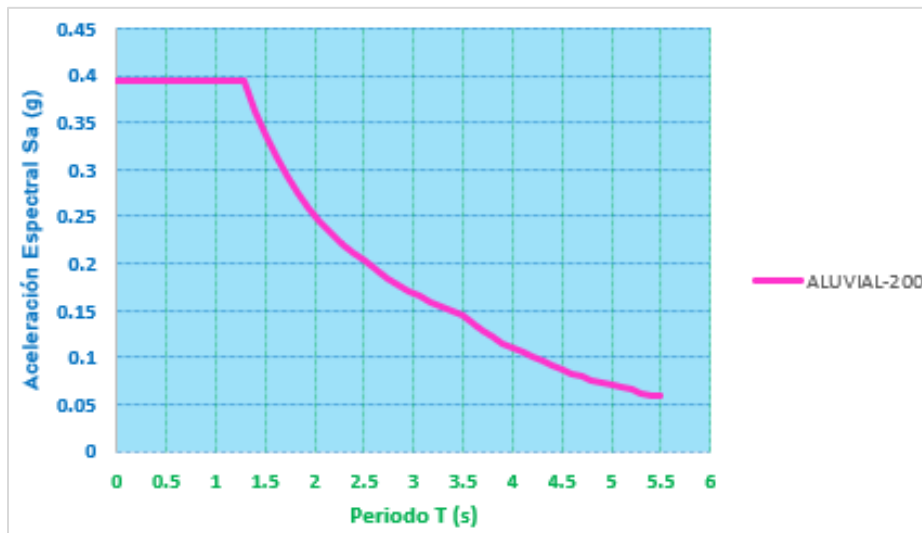


Figura 17. Curva de diseño para un coeficiente de amortiguamiento de 5% del crítico - Zona Aluvial - 200. Fuente: Propia

Espectro de diseño para zona Aluvial – 300.

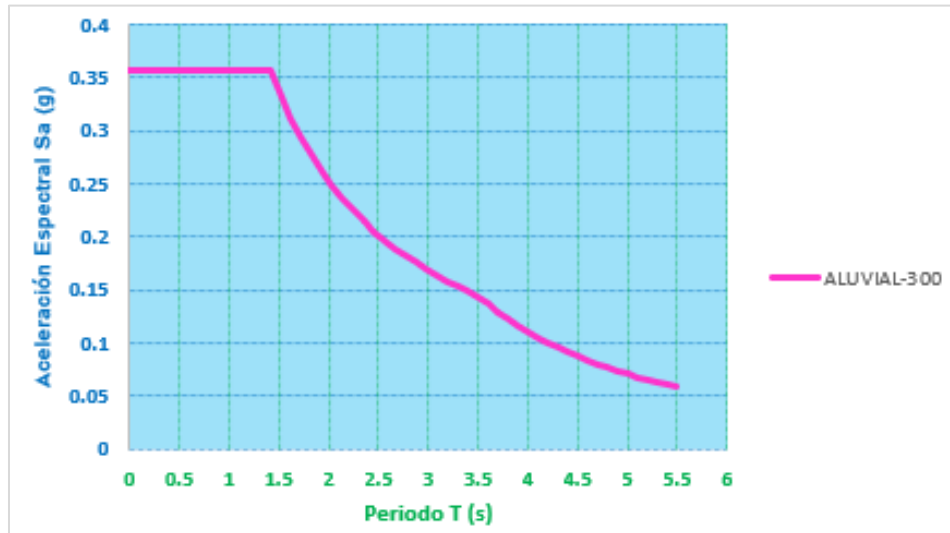


Figura 18. Curva de diseño para un coeficiente de amortiguamiento de 5% del crítico - Zona Aluvial - 300. Fuente: Propia

Espectro de diseño para zona Depósito Ladera.

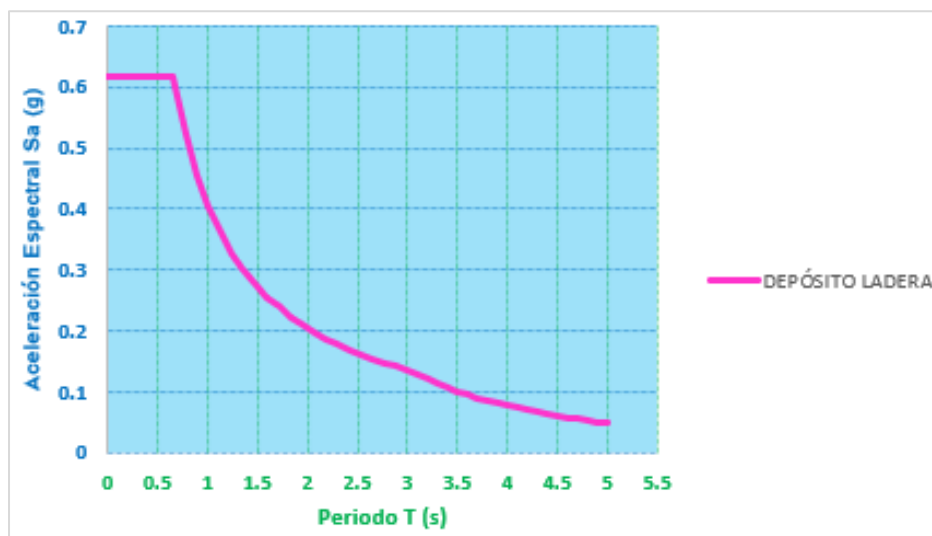


Figura 19. Curva de diseño para un coeficiente de amortiguamiento de 5% del crítico - Zona Depósito Ladera. Fuente: Propia

Para el análisis de la respuesta en el tiempo se recurrirá al uso de las señales obtenidas por las estaciones que hacen parte de la Red de Acelerógrafos de Bogotá (RAB), y que fueron insumos para la construcción de los respectivos espectros de diseño para las zonas Lacustre y Piedemonte. Bogotá cuenta con una red de 29 estaciones de acelerógrafos ubicados en puntos estratégicos de la ciudad. Se analizarán 3 señales de las estaciones Colonia Escolar de Usaquén y Universidad de la Salle para tipificar la microzona Piedemonte y 3 señales de las estaciones Estación Escuela

Colombiana de Ingeniería “CEING”, Estación Universidad Corpas “CCORP”, Estación Uniagraria “CUAGR” para la microzona Lacustre.

La Figura 20 muestra la ubicación de la red de estaciones de acelerógrafos de la ciudad de Bogotá D.C., nótese la existencia de dichas estaciones en las diferentes microzonas que conforman el espectro de la sismicidad local de la ciudad, proveyendo datos para la constante actualización del estudios de los movimientos del terreno según el tipo de suelo y su respuesta zonal.

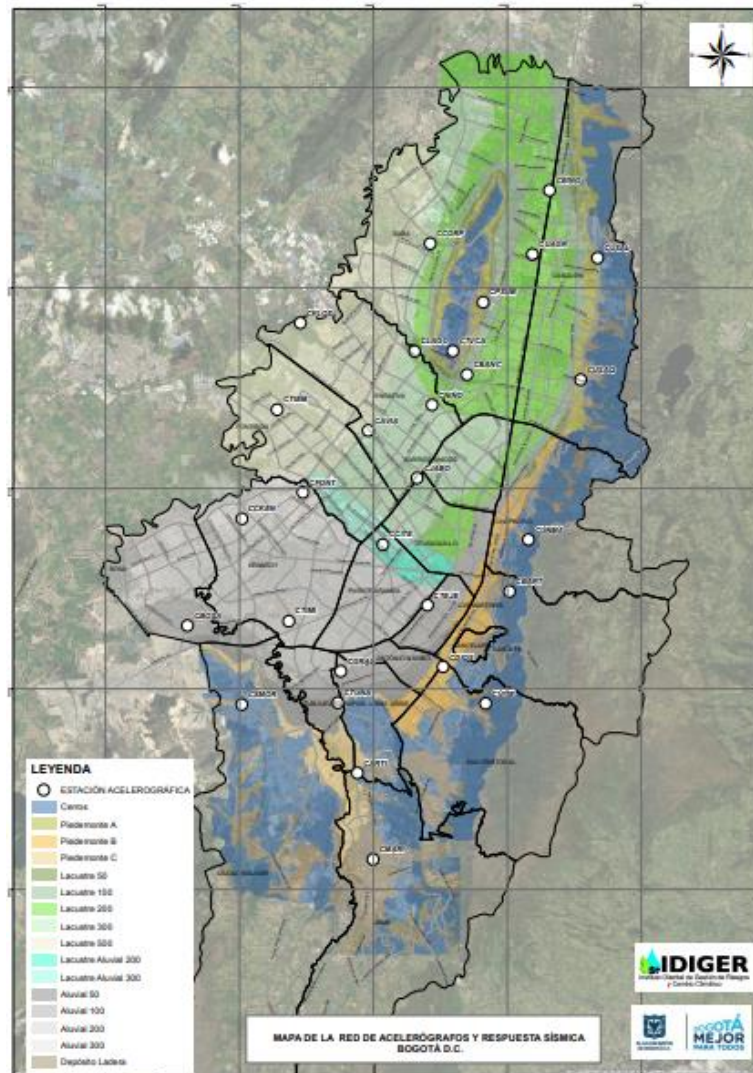


Figura 20. Ubicación de red de estaciones de acelerógrafos y respuesta sísmica de Bogotá D.C.
Fuente: IDIGER.

2.2.2 Aislación Sísmica.

El concepto de aislación sísmica en la base se sostiene en la premisa como se muestra en la Figura 21, de reducir las perturbaciones de los movimientos del terreno sobre la superestructura, como se puede apreciar esquemáticamente, al tener un movimiento del terreno fuerte, la estructura de la izquierda con empotramiento en su base presenta deformaciones relativas piso a piso mayores que la estructura de la derecha, la cual cuenta con un sistema de aislación sísmica y permite el

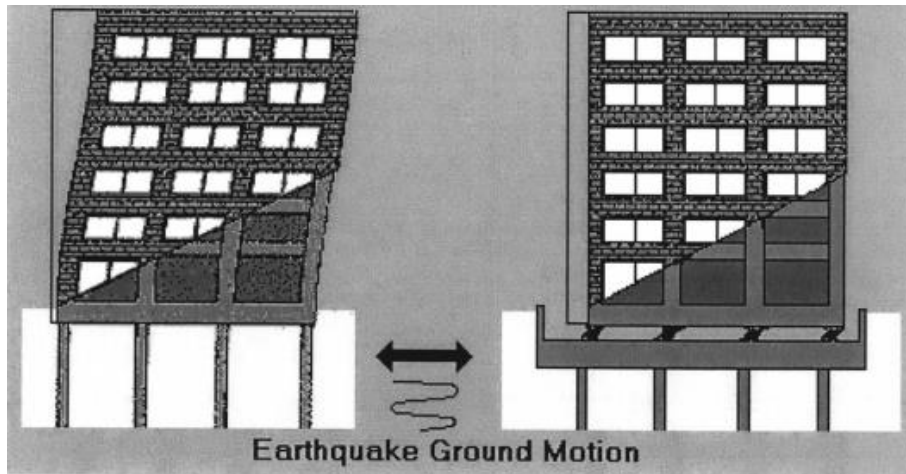
movimiento de la estructura superior casi que como un bloque; este suceso ha sido documentado a través de los años remontándose su aparición hasta el año 550 antes de Cristo. (Kelly, 1990) establece que la idea de desacoplar la superestructura de un edificio de los efectos dañinos del movimiento del suelo producido por un fuerte terremoto al aislarlo en su base para la década de los 90's era un tema atractivo para ingenieros e inventores, pero a la fecha sus resultados no se habían probado en edificios construidos sometidos a terremotos, sino con estudios de gran escala usando mesas vibratorias. El sismo de 1995 en la ciudad de Kobe en Japón, proporcionó la evidencia necesaria del excelente desempeño de las edificaciones aisladas en su base ante el evento de un sismo de gran magnitud. Esto abrió el camino para que se hicieran grandes avances tecnológicos, basados en estudios e investigaciones de este tipo de sistemas y se establecieran teorías, metodologías de diseño y fases constructivas.

(Romero & Florez, 2011) El aislamiento sísmico es una estrategia de diseño basada en la premisa de la posibilidad de separar una estructura de los movimientos del suelo mediante la introducción de elementos flexibles entre la estructura y su cimentación. Los aisladores reducen notablemente la rigidez del sistema estructural, haciendo que el periodo fundamental de la estructura aislada sea mucho mayor en comparación con el de la misma estructura de base fija.

Actualmente se cuenta con un número creciente de edificaciones construidas alrededor del mundo con el sistema de aislación sísmica. A nivel Latinoamérica, Chile es el país con mayor número de edificios entre los que se encuentran hospitales, centros educativos, edificios residenciales e industriales. En Colombia, el uso de aisladores se ha ido aplicando a la construcción puentes y edificaciones. La Tabla 4. Aplicación de aislamiento sísmico de base en edificaciones. Fuente: Consecuencias de la posible aplicación a Colombia de las normas más actuales sobre aislamiento sísmico de edificios. , muestra el número de edificaciones aproximado construidas por país según (Martelli A., 2014) (Walters, 2015).

País	Número de edificios aislados
Japón	7800
China	4000
Rusia	600
Italia	400
USA	500
Chile	75
Nueva Zelanda	50
Taiwán	50
Canadá	50
Armenia	45
Turquía	40
México	25
Colombia	20
Perú	10
Ecuador	7
Total	13672

Tabla 4. Aplicación de aislamiento sísmico de base en edificaciones. Fuente: Consecuencias de la posible aplicación a Colombia de las normas más actuales sobre aislamiento sísmico de edificios. (Piscal & Almansa, 2016)



**Figura 21. Comparación Edificio empotrado en su base (izquierda) vs. Aislado en la base (derecha).
Fuente: DESIGN OF BASE ISOLATION SYSTEM FOR BUILDINGS (Tai-Chieh Wu, 2001)**

TIPOS DE AISLADORES SÍSMICOS.

AISLADORES ELASTOMÉRICOS

Los primeros aisladores elastoméricos consistían principalmente en la utilización de un caucho natural de gran espesor muy flexible en la dirección horizontal pero que presentaban problemas de rigidez en la dirección vertical, redundando en balanceos no deseados en la estructura. Para contrarrestar este problema se idearon reforzamientos con láminas de acero o núcleos de plomo que proporcionaran rigidez vertical. Los avances en este sistema de aislación generaron una subdivisión de estos tipos de aisladores como se muestra en la Figura 22, y que han consistido en reemplazar el caucho natural por productos sintéticos y la combinación de los reforzamientos para evitar el balanceo por falta de rigidez vertical.

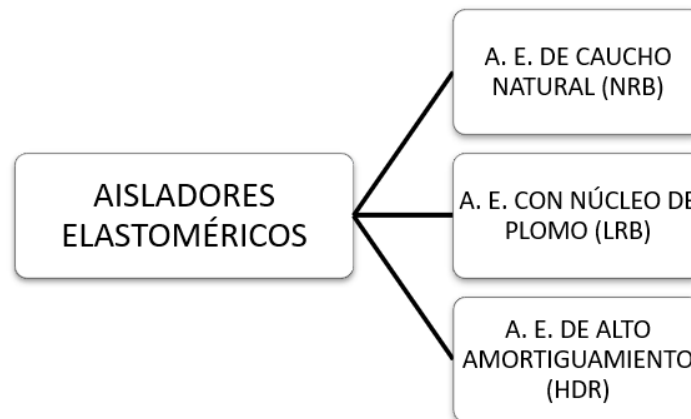


Figura 22. Clasificación de aisladores elastoméricos. Fuente: Propia.

Los aisladores de caucho natural (NRB) presentan ventajas en cuanto a su fácil manufactura, simplicidad del modelamiento, su comportamiento mecánico no se ve afectado por los ciclos de cargas o el paso del tiempo, alcanza un amortiguamiento entre el 2% y el 3% del valor crítico y permanece en el rango de comportamiento lineal a esfuerzo cortante hasta tensiones de más del

100%. Es estable y no está sujeto a la fluencia. Variaciones de los aisladores de caucho natural de bajo amortiguamiento consisten en la inclusión de láminas de acero para rigidez vertical como se muestra en el esquema de la Figura 23, donde se intercalan dichas láminas con las láminas de caucho, dicho ensamble es contenido perimetralmente por un refuerzo de goma y en sus extremos superior e inferior con placas de anclaje. Entre las desventajas están que suelen hacer parte de sistemas complejos de interacción con disipadores de energía para poder proveer a la estructura de niveles de amortiguación más altos.

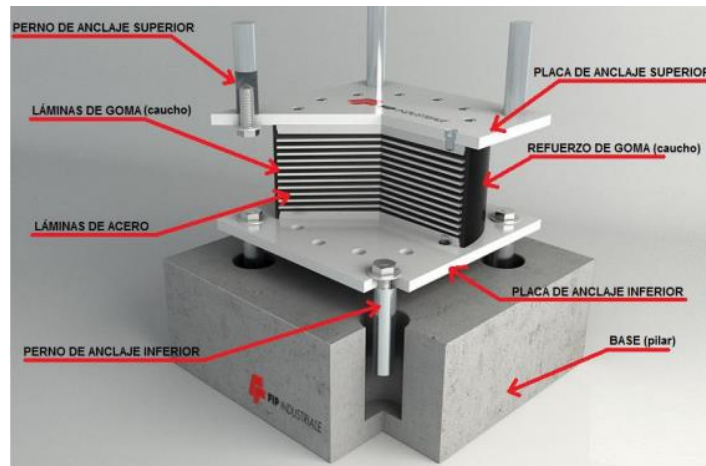


Figura 23. Aislador elastomérico NRB. Fuente: FIP Industriale

Los aisladores con núcleo de plomo LRB tuvo su origen en Nueva Zelanda para el año de 1975, consiste en casi el mismo diseño de un aislador de caucho del tipo de bajo amortiguamiento, con la diferencia que se incluyen o insertan uno o más núcleos de plomo en agujeros dentro del dispositivo, como puede apreciarse en la Figura 24, en este ejemplo se ha incluido sólo un núcleo de plomo central, proporcionando de esta manera medios adicionales de disipación de energía. El núcleo de plomo insertado incursiona en el rango plástico, contribuyendo a la absorción de energía mediante un amortiguamiento histerético y a la disminución del desplazamiento horizontal del dispositivo. Se puede alcanzar un amortiguamiento efectivo alrededor del 10%.

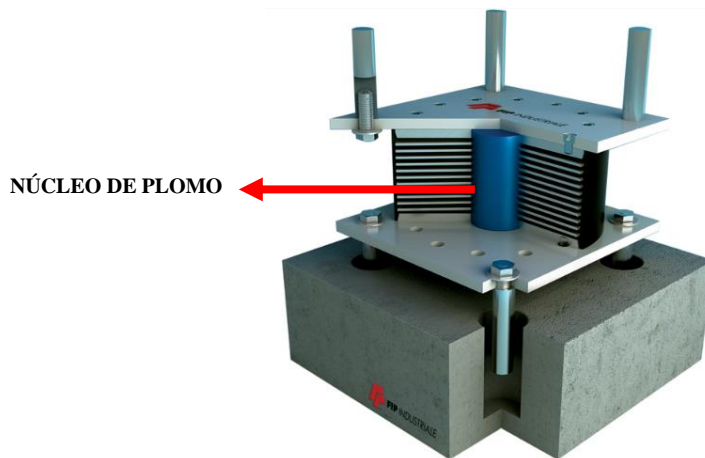


Figura 24. Aislador elastomérico LRB. Fuente: FIP Industriale

Los aisladores de alto amortiguamiento HDR incorporan en la fabricación de sus láminas compuestas como resinas, rellenos de carbón y aceites, generando que el caucho alcance niveles de amortiguamiento entre el 15% al 20%. La Figura 25 muestra el exterior de un aislador de este tipo, por lo general los refuerzos internos se realizan con placas de acero estructural A36 intercaladas con las láminas de caucho de alto amortiguamiento y en sus extremos tapas tipo bridadas.



Figura 25. Aislador elastomérico HDR. Fuente: Cámara Chilena de la Construcción (2011).

AISLADORES DESLIZANTES.

La disipación de energía para este tipo de aislador sísmico se hace por medio de la fricción dinámica que se genera al deslizarse en su base por la acción de fuerzas horizontales, rigiéndose su comportamiento principalmente por la Ley de Coulomb. Estos tipos de dispositivos tienen un material deslizante de alto rendimiento o articulación que se desliza y se apoya en una superficie deslizante esférica y cóncava de acero inoxidable revestida de Politetrafluoroetileno sobre la que se soporta la estructura. El tipo de aislador deslizante tipo fricción puede subdividirse en función de la curvatura, considerándose entonces los siguientes:

El aislador de péndulo de fricción con simple curvatura (FPS), trabaja como un péndulo simple en movimiento armónico. Su funcionalidad consiste en el deslizamiento de un control articulado sobre una superficie cóncava, para que entre a trabajar se requiere que la fuerza de excitación externa venza el valor de la fuerza de fricción estática, así mismo para que no haya problemas de confort referentes a los usuarios de la edificación la fuerza de fricción debe ser lo suficientemente mayor para evitar movimientos o desplazamientos innecesarios para fuerzas de sismos pequeños y acciones del viento. Se espera un rango de amortiguación entre el 10% y 40% dependiendo del coeficiente de fricción empleado. El aislamiento en este tipo de dispositivo es función del radio de curvatura y es directamente proporcional al periodo de la estructura, a su vez, éste último no depende de la masa de la estructura a soportar. La Figura 26 ilustra las partes de un sistema de aislamiento por fricción FPS, una fotografía de un aislador FPS real al lado de un ser humano para comparación de sus dimensiones y un esquemático del funcionamiento del aislador en su posición inicial y en el caso del máximo evento sísmico esperado alcanzándose el desplazamiento máximo en el aislador.



Figura 26. Descripción, funcionamiento y aspecto de aislador tipo péndulo de fricción en curvatura simple (FPS). Fuente: Earthquake Protection Systems (EPS).

Los aisladores tipo péndulo de fricción de doble curvatura (DFPS), son un mejoramiento del tipo curvatura simple, y como su nombre lo sugiere consisten en dos superficies deslizantes cóncavas con igual o diferente radios de curvatura, de igual manera pueden presentarse diferentes coeficientes de fricción para cada tipo de superficie. De manera gráfica se pueden ver las etapas del movimiento en un aislador sísmico tipo péndulo de fricción de doble curvatura en la Figura 27, se aprecia cómo funciona en varias etapas según sea la intensidad de la fuerza lateral aplicada. Para condiciones de la superficie cóncava S_2 con coeficiente de fricción f_2 ($f_2 < f_1$) y radio de curvatura R_2 , existirá una fuerza externa que venza esta resistencia y permita el desplazamiento de la estructura, luego de alcanzado el máximo deslizamiento dentro de la S_2 , vendría una etapa en la cual la superficie cóncava S_1 , con propiedades de coeficiente de fricción f_1 y radio de curvatura R_1 , asimilaría la fuerza externa actuante restante hasta alcanzar su valor máximo de deslizamiento, todo este sistema bajo los efectos de la fuerza gravitacional que tiende a llevar a la estructura a su posición de equilibrio o reposo.

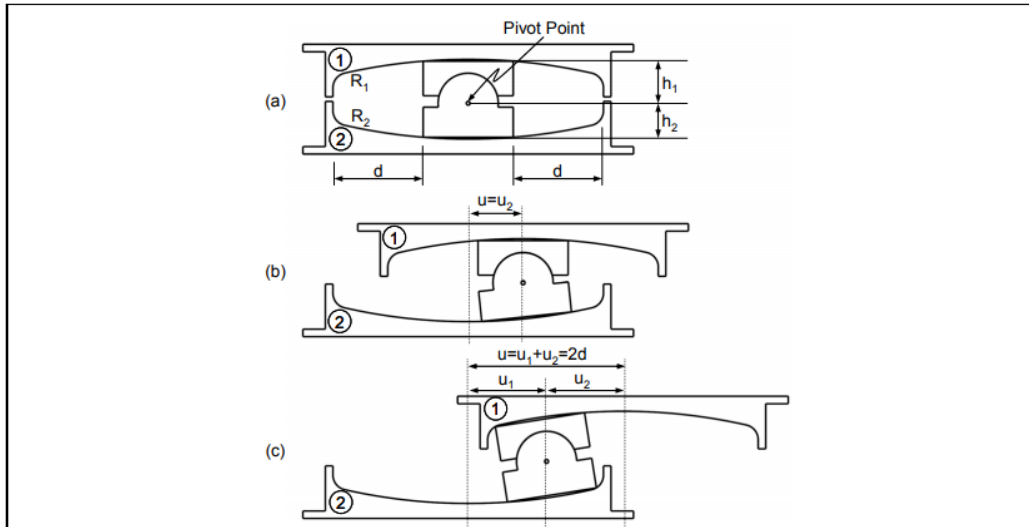


Figura 27. Sección transversal del funcionamiento de un Aislador Péndulo de Fricción de Doble Curvatura (DFPS). Fuente: (Fenz & Constantinou, 2005)

Los aisladores de tercera generación o péndulo de fricción de triple curvatura (TFPS) consta de cuatro superficies cóncavas y tres mecanismos que cumplen la función de péndulos independientes entre sí. La Figura 28 muestra el esquema de un aislador TFPS, dónde se puede apreciar la existencia de un mecanismo deslizador interno con radio menor R_1 , sobre el cuál se desliza un cilindro y el cual funciona absorbiendo la energía de sismos de baja intensidad. Este conjunto a su vez, se encuentra dentro de otras dos superficies cóncavas de radios R_2 y R_3 , los sistemas de péndulos independientes se forman debido a los movimientos relativos de cada una de los sistemas con respecto a las superficies que se tomen como referencia. las ventajas de este tipo de sistema de aislación aparte de la disminución de las fuerzas sísmicas, consisten en la activación sucesiva según las diferentes sollicitaciones sísmicas (sismo de servicio, de diseño y máximo) y la optimización del desempeño estructural a un costo menor.

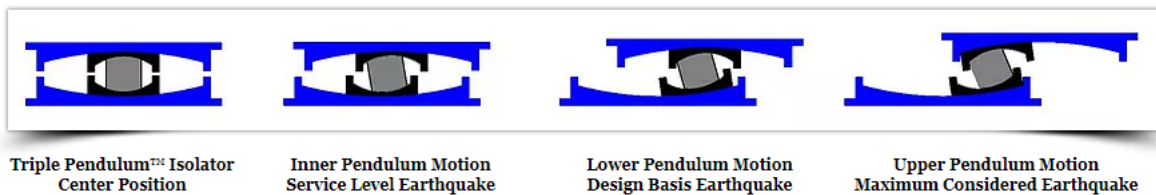


Figura 28. Diagramación del funcionamiento de un Aislador Péndulo de Fricción de Triple Curvatura (TFPS). Situación normal y condiciones sísmicas. Fuente: Earthquake Protection Systems

2.3 Estado del arte

Se han desarrollado varios trabajos de investigación referentes al uso de aislación sísmica en la base, entre estos proyectos destacamos a nivel regional los siguientes:

(Auqui Parra, 2010) Análisis de aisladores sísmicos elastoméricos construidos en el Ecuador. Se realizaron prototipos de aisladores tipo elastoméricos, con la diferenciación de la adición en sus núcleos de pernos pasantes, pernos macizos vulcanizados y resorte, análogo a los aisladores con

núcleo de plomo; determinaron con errores, al no contar con las máquinas esenciales para la correcta evaluación de la respuesta de los aisladores que si se obtiene un amortiguamiento de las fuerzas sísmicas y disminución de frecuencias.

(Villavicencio Cedeño, 2015) Análisis sísmico estructural comparativo para edificios con aisladores de base tipo elastoméricos y friccionantes, para los diferentes tipos de suelos del Ecuador. Se realizaron modelos de edificaciones aporticadas y de muros de corte de configuración regular tanto en planta como en altura, se consideraron las condiciones para edificios con base fija y con sistema de aislación de tipo fricción y elastoméricos, se hizo además el diseño del sistema de aislación según las recomendaciones del NEHRP RECOMMENDED PROVISIONS FOR SEISMIC REGULATIONS FOR NEW BUILDINGS — PROVISIONS AND COMMENTARY., ya que en Ecuador igual que en Colombia no se cuenta con una normativa o proceso de diseño propio. Entre las conclusiones que arrojó este trabajo de grado se encuentra que las edificaciones con mayor rigidez poseen un mejor comportamiento para las estructuras con el sistema de aislación, los tipos de suelo E amplificaron las respuestas y se obtuvieron resultados no deseables ante el uso del sistema de aislación, para las otras condiciones de tipo de suelo, se obtuvieron valores considerables de reducción en fuerzas cortantes de piso, cortantes basales, desplazamientos y derivas de pisos, con mayor incidencia en los aisladores tipo elastoméricos con núcleo de plomo.

(Pastora Estrada & Ríos Novoa, 2016). Análisis del efecto de aisladores sísmicos en la respuesta dinámica de un edificio aporticado de 4 niveles, según las condiciones de suelo de la zona noroeste de la ciudad de Managua, Nicaragua. Se enfatiza que, dentro de las recomendaciones de este estudio, está la de realizar más trabajos de investigación en este tema para poder tener una base inicial para un acercamiento e inclusión en el Reglamento Nacional de la Construcción que se maneja en Nicaragua. Se encontró además que una adecuada combinación de aisladores tipo HDR y LRB, ubicados de manera estratégica en planta de la estructura, originó un mejor comportamiento dinámico de la misma. En cuanto a las demandas sísmicas, usaron dos intensidades de movimiento del suelo, según configuración elegida para la localización de los aisladores, se alcanzaron periodos más largos y las consecuentes reducciones en los cortantes sísmicos de hasta el 96% para el caso más crítico, respecto al sistema convencional.

(Trujillo Benito, 2017) Diseño integral de estructuras con sistema de aislación sísmica aplicado a un edificio de concreto armado. Se desarrolló un análisis de edificación regular de 4 pisos y 2 sótanos, y una combinación de sistema de aislación de los tipos friccionantes y elastoméricos, destaca la opción de obviar el diseño por capacidad de los elementos estructurales ya que trabajarán en el rango elástico, y la importancia del análisis exhaustivo de la no linealidad en el comportamiento en el nivel del aislamiento. Se observa la disminución en parámetros como derivas y cortantes de diseño, en las estructuras aisladas en su base, y el respectivo mejoramiento del desempeño ante la ocurrencia de los sismos de diseño y el máximo probable. Sugiere limitar el número de aisladores tipo fricción al 30% del total de dispositivos a usar, debido a la reducción de la capacidad de fuerza restitutiva del edificio que ocurre cuando hay demasiados de este tipo de aisladores.

En Colombia se han desarrollado los siguientes trabajos de investigación referentes al tema:

(Montoya Vallecilla, 2010) Análisis sísmico de un edificio con aislamiento en la base. Se realizó un análisis modal espectral de un edificio aporticado de doce pisos en una zona de amenaza sísmica alta (Armenia), primero con el edificio fijo en su base y luego usando aisladores tipo elastoméricos con núcleo de plomo y se compararon los resultados obtenidos, los cuales no generan una mayor diferenciación en cuanto a la magnitud de las reducciones esperadas, por estar limitado el análisis en cuanto a la correcta inclusión de los parámetros de diseño en el software utilizado, no teniéndose en cuenta por ejemplo la amortiguación del sistema de aislamiento.

(Castilla Romero & Montes Flórez, 2011) Análisis estructural y económico de edificios de 30 pisos en la ciudad de Cartagena, mediante análisis estático y empleando aisladores sísmicos. El trabajo de investigación consistió en el modelamiento de tres edificios ubicados en la ciudad de Cartagena con alturas entre 12 y 23 pisos, aunque para efectos de la investigación se rediseñaron con una altura de 30 pisos y se consideró un análisis de tipo estático. La comparación entre los edificios con base fija y con sistema de aislación arrojó resultados como los siguientes, el espectro de diseño para la estructura asilada tuvo que ser ajustado para el amortiguamiento del conjunto de dispositivos a un valor entre el 13% - 20%, ya que el de la NSR – 10 está calculado para un valor del 5%, los valores de mayor reducción en el cortante basal (70% en promedio) fueron representativos de la selección de las mejores alternativas de aislamiento para cada tipo de edificación, con esto se procedió a hacer el diseño de los elementos estructurales y a cuantificar un estimado en el cálculo de cantidades de obra de concreto y acero requerido. Se obtuvieron valores del orden del 9% en reducción del peso del edificio, 29% en reducción de la cantidad de acero de refuerzo y un 14% en reducción en volumen de concreto redundando en un ahorro de dinero de alrededor del 8.6% del sistema aislado versus el convencional. Es importante resaltar el factor económico del uso de aisladores sísmicos, pues se pensaría que incrementa el costo de construcción, sin embargo, como se vio en este estudio, en últimas en un panorama general o global se obtienen beneficios económicos y un mejor desempeño estructural.

(Melo Bojacá, 2013) Aisladores sísmicos elastoméricos en centros de salud, caso Clínica Comfandi. Este estudio de tipo descriptivo abordó el caso de estudio de la Clínica Comfandi en Cali, ubicada en zona de amenaza sísmica alta, se realizó el análisis de la justificación de uso de aisladores, así como los criterios de diseño asociados y la configuración estructural de la estructura, así como, la determinación del sistema de aislación.

(Galindo Gómez, 2014) Comparación del comportamiento dinámico del edificio Park Way 41 con y sin aisladores pasivos en Bogotá usando el programa de elementos finitos- SAP 2000. Con ayuda del software SAP 2000, el autor analiza el comportamiento dinámico de un edificio particular ubicado en la ciudad de Bogotá D.C., entre las recomendaciones que genera está el de consolidar un mayor número de trabajos de investigación que aborden la temática de la aislación sísmica en la base y resalta la importancia de que en Bogotá deben haber más experiencias de este tipo, que conlleven a la construcción de edificaciones que puedan resistir movimientos sísmicos de gran magnitud, debido a la importancia de la capital. Establece además las características paramétricas del comportamiento de los aisladores usados y su forma de inclusión en el software de análisis para

su posterior procesamiento y modelación matemática adecuada. Además, recomienda al ser irregular la estructura analizada, las condiciones del efectivo modelamiento en el software de diseño, primero realizar una evaluación de las condiciones iniciales y mirar si es procedente el sistema de aislación como herramienta de control estructural; en el caso del edificio analizado existente la irregularidad en planta y la falta de rigidez puede proveer problemas futuros ante la ocurrencia del evento al usar un sistema de aislación, sin antes haber solucionado dichos problemas. Entre las peculiaridades encontradas para este caso está el hecho que no hubo reducción en gran magnitud del cortante sísmico, porque aun cuando el periodo pasó a ser de 3 segundos, seguía localizado en la meseta del espectro de aceleraciones, suelo de baja calidad, y se corre el riesgo de amplificar los efectos sísmicos, por tanto, el uso de aisladores sísmicos como solución puede no ser adecuado.

(Piscal & Almansa, 2016) Consecuencias de la posible aplicación a Colombia de las normas más actuales sobre aislamiento sísmico de edificios. Este artículo describe y compara algunas de las disposiciones o recomendaciones más importantes de las diferentes normas de aislamiento sísmico y se enfatizan los aspectos más relevantes que se deben puntualizar y hacer distinción para una futura implementación en el reglamento colombiano. Entre las conclusiones encontradas, se encuentran diferentes disparidades e incoherencia según los autores quienes manifiestan la urgencia de elaborar un código de aislación sísmica para Colombia, con base en la concordancia con la sismicidad del país.

(Piscal Arévalo & López Almansa, 2018) Propuesta para la futura norma de aislamiento sísmico de edificaciones en Colombia. Concluye el artículo que la aplicación directa de la normativa americana ASCE en el diseño de edificaciones con aislamiento sísmico en Colombia genera una serie de inconsistencias con el Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes NSR-10. Esta incompatibilidad redundante en sobrecostos y, en cierto tipo de edificaciones, conducir a parámetros de diseño inferiores a los requeridos. Los autores enfatizan en la importancia de realizar estudios adicionales que complementen la información como el factor R, el comportamiento de elementos no estructurales, el impacto del sistema de aislamiento, etc. Presentan los autores una metodología para abordar el diseño de edificios con aislamiento en la base armónica con los requisitos de NSR-10, y plantean la necesidad de estudiar las condiciones locales para poder generar una norma de aislamiento sísmico adaptada totalmente a las condiciones económicas y técnicas de Colombia.

(Correa Ávila, 2019) Apoyo para la elaboración y organización del documento correspondiente a la futura norma de aislamiento sísmico en Colombia. Este trabajo descriptivo reafirma la importancia de tener un código colombiano para el diseño de sistemas de aislación sísmica coherente a las particularidades locales, se hacen algunas apreciaciones diferenciales entre las versiones ASCE 7-10 y ASCE 7-16 y se plantea la formulación dimensional del posible código.

Todos estos antecedentes y estado del arte ilustran el vacío en cuanto a conocimiento que aún se tiene en el país sobre el uso de aisladores sísmicos como elementos de control estructural, y las pocas investigaciones que aborden el diseño de manera particular y teniendo en cuenta las condiciones locales.

Capítulo 3 Marco Teórico

Se presenta el marco teórico que enmarca los distintos tipos de análisis y los requisitos especificados por los códigos de diseño en cuanto a edificaciones con base aislada, y lo referente al análisis por desempeño.

3.1 NEHRP RECOMMENDED PROVISIONS FOR SEISMIC REGULATIONS FOR NEW BUILDINGS — PROVISIONS AND COMMENTARY.

La normativa sísmica para edificios nuevos y otras estructuras establece las condiciones mínimas de desempeño ante la ocurrencia de eventos sísmicos y cuál debe ser la respuesta de la edificación, es así como para sismos pequeños y moderados no debe haber daño de elementos estructurales y no estructurales y para sismos severos debe resistirlos sin fallas en el sistema de aislación y sin daños significativo en elementos estructurales y no estructurales.

MÉTODOS DE DISEÑO.

Dentro de los métodos para análisis y diseño de edificaciones con aislamiento de base tenemos el análisis estático lineal (FHE, Fuerza Horizontal Equivalente), el análisis dinámico lineal (AME, Análisis Modal Espectral) y el análisis dinámico no lineal.

Los requisitos generales de diseño para una estructura aislada en su base según FEMA (2003) son los siguientes:

- El valor de coeficiente de importancia debe tomarse como 1, sin importar el grupo de uso de la estructura.
- La definición de la configuración estructural se hará con base en la superestructura.
- Para el movimiento del suelo, el espectro de diseño debe ser específico del sitio para el diseño de aquellas estructuras aisladas localizadas en suelo tipo F o con aceleración espectral para un periodo de 1 segundo mayor a 0.6g.

FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE

Se deben cumplir los siguientes requerimientos para poder aplicar el procedimiento de análisis estático para estructuras aisladas según la sección 13.3 del NEHRP RECOMMENDED PROVISIONS FOR SEISMIC REGULATIONS FOR NEW BUILDINGS — PROVISIONS AND COMMENTARY.

- La estructura debe estar localizada en un sitio con tipo de suelo A, B, C o D.
- La aceleración espectral para un periodo de 1 segundo debe ser menor o igual a 0.6g.
- La superestructura debe tener 4 pisos o menos de altura equivalente a unos 20 metros.
- El periodo efectivo de la estructura aislada T_M es menor o igual que 3 segundos.
- El periodo efectivo de la estructura aislada T_D es tres veces mayor que el periodo elástico de la estructura empotrada en la base.
- La estructura es regular.

El sistema de aislación debe cumplir además los requisitos siguientes:

- La rigidez efectiva del sistema de aislación al desplazamiento de diseño es mayor que un tercio de la rigidez efectiva al 20% del desplazamiento de diseño.
- El sistema de aislación es capaz de producir una fuerza restauradora tal que la fuerza lateral al desplazamiento total de diseño es al menos 0.025W más grande que la fuerza lateral al 50% del desplazamiento total de diseño.
- El sistema de aislación no limita el desplazamiento para el sismo máximo considerado a menos del desplazamiento máximo total.

PARÁMETROS A CALCULAR CON EL PROCEDIMIENTO DE LA FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE.

Cuando se utilice o es aplicable el método de la fuerza horizontal equivalente para el diseño de una estructura aislada, se debe desarrollar el siguiente análisis y obtención de parámetros de diseño.

Desplazamiento de diseño D_D . El sistema de aislación deberá ser diseñado y construido para contrarrestar los desplazamientos laterales mínimos producidos por sismos actuando en ambas direcciones principales de la estructura, estos desplazamientos se calcularán por medio de la siguiente ecuación:

$$D_D = \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) \frac{S_{D1} T_D}{B_D}$$

Ecuación 1. Desplazamiento de diseño para FHE

Dónde,

g: Aceleración de la gravedad.

S_{D1} : La aceleración espectral de diseño para amortiguamiento del 5% y un periodo de 1 segundo.

T_D : Periodo efectivo de la estructura sísmicamente aislada al desplazamiento de diseño en la dirección bajo consideración.

B_D : Coeficiente numérico asociado al amortiguamiento efectivo del sistema de aislación β_D al desplazamiento de diseño. Ver Tabla 5.

AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO β_D/β_M en % del crítico	FACTOR B_D/ B_M
≤ 2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
≥ 50	2.0

Tabla 5. Coeficiente de amortiguamiento B_D o B_M . Fuente: (Building Seismic Safety Council, 2003).

Periodo efectivo al desplazamiento de diseño T_D : El periodo efectivo de la estructura aislada al desplazamiento de diseño, se calcula por medio de la ecuación.

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{Dmin}g}}$$

Ecuación 2. Periodo efectivo a D_D para FHE.

Dónde,

W: Peso sísmico encima de la interfaz de aislación.

k_{Dmin} : Mínima rigidez efectiva del sistema de aislamiento al desplazamiento de diseño en la dirección horizontal bajo consideración.

g: Aceleración de la gravedad.

Desplazamiento Máximo D_M : El desplazamiento máximo del sistema de aislación en la dirección más crítica de respuesta horizontal se calculará de acuerdo con:

$$D_M = \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) \frac{S_{MI}T_M}{B_M}$$

Ecuación 3. Desplazamiento máximo para FHE

Donde,

g: Aceleración de la gravedad.

S_{MI} : La aceleración espectral máxima para amortiguamiento del 5% y un periodo de 1 segundo.

T_M : Periodo efectivo de la estructura sísmicamente aislada al desplazamiento máximo en la dirección bajo consideración.

B_M : Coeficiente numérico asociado al amortiguamiento efectivo del sistema de aislación β_M al desplazamiento máximo. Ver Tabla 5.

Periodo efectivo al desplazamiento máximo T_M : El periodo efectivo de la estructura aislada al máximo desplazamiento se calcula por medio de la ecuación.

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

Ecuación 4. Periodo efectivo a D_M para FHE.

Dónde,

W: Peso sísmico encima de la interfaz de aislación.

k_{Mmin} : Mínima rigidez efectiva del sistema de aislamiento al desplazamiento máximo en la dirección horizontal bajo consideración.

g: Aceleración de la gravedad.

Desplazamientos totales: El desplazamiento total de diseño D_{TD} y el desplazamiento total máximo D_{TM} , de los elementos del sistema de aislación sísmica, deberán incluir desplazamientos adicionales debidos a la torsión natural y accidental, calculada considerando la distribución espacial de la rigidez lateral del sistema de aislación y la localización más desventajosa de la excentricidad de la masa.

Para los elementos de un sistema de aislación con distribución espacial uniforme de la rigidez lateral, los desplazamientos totales de diseño y máximo (D_{TD} , D_{TM}), no deben ser menores que los calculados por las ecuaciones Ecuación 5 y Ecuación 6 respectivamente.

$$D_{TD} = D_D \left[1 + y \left(\frac{12e}{b^2 + d^2} \right) \right]$$

Ecuación 5. Desplazamiento total de diseño D_{TD} .

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

Ecuación 6. Desplazamiento total máximo D_{TM} .

Donde,

D_D : Desplazamiento de diseño en el centro de rigidez del sistema de aislación en la dirección bajo consideración. Ecuación 1.

D_M : Desplazamiento máximo en el centro de rigidez del sistema de aislación en la dirección bajo consideración. Ecuación 3.

y: Distancia entre el centro de rigidez del sistema de aislación y el elemento de interés medida perpendicularmente a la dirección de la carga sísmica bajo consideración.

e: La excentricidad horizontal real medida entre el centro de masa de la superestructura y el centro de rigidez del sistema de aislación, más la excentricidad accidental, tomada como el 5% de la dimensión más larga de la estructura en planta perpendicular a la dirección de la fuerza en consideración.

b: La dimensión más corta de la estructura en planta perpendicular a d.

d: La dimensión más larga de la estructura en planta.

En el caso de que se demuestre mediante cálculos que la configuración del sistema de aislación es capaz de resistir la torsión de manera adecuada, los valores de D_{TD} y D_{TM} pueden ser menores a los obtenidos mediante las ecuaciones Ecuación 5 y Ecuación 6 respectivamente, pero no pueden ser menores que 1.1 veces D_D y D_M respectivamente.

FUERZAS LATERALES MÍNIMAS.

Fuerzas laterales mínimas para el sistema de aislación y para elementos estructurales debajo del sistema de aislación.

El sistema de aislación, la cimentación y todos los elementos estructurales debajo del sistema de aislación deben diseñarse y construirse para contrarrestar un valor mínimo de fuerza lateral denominada V_b , usando las provisiones de una estructura no aislada. V_b se obtendrá como sigue:

$$V_b = k_{Dmax} D_D$$

Ecuación 7. Valor mínimo de fuerza lateral para el sistema de aislación y elementos estructurales por debajo del mismo.

Donde,

$k_{Dm\acute{a}x}$: Rigidez máxima efectiva del sistema de aislación al desplazamiento de diseño en la dirección horizontal bajo consideración.

D_D : Desplazamiento de diseño en el centro de rigidez del sistema de aislación en la dirección bajo consideración. Ecuación 1.

En todos los casos, V_b no puede ser menor que la máxima fuerza en el sistema de aislación a cualquier desplazamiento incluyendo el desplazamiento de diseño.

Fuerzas laterales mínimas para elementos estructurales por encima del sistema de aislación.

La estructura por encima del sistema de aislación deberá diseñarse y construirse para contrarrestar un valor mínimo de fuerza lateral denominada V_s , usando las provisiones de una estructura no aislada. V_s se obtendrá como sigue:

$$V_s = \frac{k_{Dmax} D_D}{R_I}$$

Ecuación 8. Valor mínimo de fuerza lateral para la estructura por encima del sistema de aislación.

Donde,

$k_{Dm\acute{a}x}$: Rigidez máxima efectiva del sistema de aislación al desplazamiento de diseño en la dirección horizontal bajo consideración.

D_D : Desplazamiento de diseño en el centro de rigidez del sistema de aislación en la dirección bajo consideración. Ecuación 1.

R_I : Coeficiente numérico relacionado con el tipo de sistema estructural de resistencia sísmica por encima del sistema de aislación.

R_I es función del valor de R como se define en la NSR – 10 Capítulo A.3 (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA, 2017), y debe tomarse como el menor valor entre

2 ó 3/8R (obtenido de las Tablas A.3-1 a A.3-4 NSR – 10); pero en ningún caso debe ser menor a 1.0.

En ningún caso V_s puede ser menor a:

- a) La fuerza lateral requerida para una estructura de base fija del mismo peso y con un periodo igual al periodo aislado T_D ;
- b) El cortante basal correspondiente a la carga de diseño mayorada de viento; y
- c) La fuerza lateral para activar completamente el sistema de aislamiento multiplicado por 1.5.

Distribución vertical de fuerzas.

La fuerza total deberá distribuirse sobre la altura de la estructura por encima de la interfase de aislación mediante la siguiente ecuación:

$$F_x = V_s \frac{w_x h_x}{\sum_{i=1}^n w_i h_i}$$

Ecuación 9. Distribución vertical de la fuerza total

Donde,

V_s : Fuerza lateral total de diseño que actúa en los elementos por encima del sistema de aislación.

W_x : Porción del peso W que está localizada o asignada al nivel x .

h_x : Altura sobre la base del nivel x .

w_i, w_x : Porción del peso W que está localizada o asignada al nivel i o al nivel x respectivamente.

h_i : Altura, por encima de la base, al nivel i .

Límites de deriva.

El límite máximo para las derivas de piso de la estructura por encima del sistema de aislación es del $0.015h_{sx}$.

PROCEDIMIENTOS DINÁMICOS

Se deberá crear un modelo matemático que incluya el sistema de aislación y los demás elementos estructurales que hacen parte del sistema principal de resistencia sísmica. El sistema de aislación debe modelarse con el detalle suficiente que permita:

- a. La distribución espacial de las unidades de aislación.

- b. Calcular los desplazamientos en ambas direcciones horizontales, y la torsión de la superestructura considerando las condiciones más desventajosas en cuanto a la localización de la masa excéntrica.
- c. Evaluar las fuerzas de volcamiento/levantamiento sobre cada una de las unidades de aislación.
- d. Tener en cuenta los efectos de carga vertical, carga bilateral, y velocidad de carga si las propiedades fuerza-deflexión del sistema de aislación dependen de tales atributos.

El desplazamiento total de diseño y el desplazamiento total máximo a través del sistema de aislación debe ser calculado usando un modelo de la estructura aislada que incorpore las características de fuerza-deflexión de los elementos no lineales del sistema de aislación y del sistema principal de resistencia sísmica.

Estructura Aislada.

El desplazamiento máximo de cada piso y las fuerzas y desplazamientos de diseño en los elementos que hacen parte del sistema principal de resistencia sísmica se pueden calcular usando un modelo elástico lineal de la estructura aislada siempre que:

1. Las propiedades de rigidez asumidas para los componentes no lineales del sistema de aislación están basadas en la máxima rigidez efectiva del sistema de aislación, y
2. Ningún elemento que hace parte del sistema principal de resistencia sísmica de la estructura por encima del sistema de aislación es no lineal.

Sistemas principales de resistencia sísmica con elementos no lineales incluyen, pero no están limitados a, sistemas estructurales irregulares diseñados para una fuerza lateral menor que el $100\% V_s$ y sistemas estructurales regulares diseñados para una fuerza lateral menor que el $80\% V_s$, donde V_s es calculado por medio de la Ecuación 8.

Sismo de entrada

Para el cálculo del desplazamiento total de diseño del sistema de aislación y los desplazamientos y fuerzas laterales de la estructura aislada debe usarse el sismo de diseño.

Para el cálculo del desplazamiento total máximo del sistema de aislación debe usarse el sismo máximo considerado.

ANÁLISIS ESPECTRO DE RESPUESTA.

El análisis modal espectral debe llevarse a cabo usando un valor de amortiguamiento modal para el modo fundamental en la dirección de interés no mayor que el amortiguamiento efectivo del sistema de aislación o 30% del amortiguamiento crítico, el que sea menor. Valores de

amortiguamiento modal para modos superiores deberán ser seleccionados consistentes con aquellos que serían apropiados para el análisis de respuesta espectral de la estructura por encima del sistema de aislación asumiendo empotramiento en la base.

El análisis de respuesta espectral usado para determinar el desplazamiento total de diseño y el desplazamiento total máximo deberá incluir los efectos combinados y simultáneos del 100% del movimiento del suelo en la dirección crítica y 30% del movimiento del suelo en la dirección horizontal perpendicular. El desplazamiento máximo del sistema de aislación deberá calcularse como la suma vectorial de los dos desplazamientos ortogonales.

El cortante de diseño en cualquier piso no deberá ser menor que el cortante de piso resultante de aplicar las fuerzas de piso calculadas con la Ecuación 9 y un valor de V_s igual al cortante basal obtenido por el análisis de respuesta espectral en la dirección de interés.

ANÁLISIS DE RESPUESTA EN EL TIEMPO.

Se deberán usar al menos tres acelerogramas apropiados para poder hacer el análisis de respuesta en el tiempo, dichos acelerogramas deben ser seleccionados y escalados según la sección 13.2.3.2 Time histories del documento (Building Seismic Safety Council, 2003). Cada par de componentes de movimientos del terreno deberán ser aplicados al modelo considerando la ubicación más desventajosa de la masa excéntrica. El desplazamiento máximo del sistema aislado deberá calcularse como la suma vectorial de los dos componentes ortogonales del desplazamiento en cada intervalo de tiempo.

Para cada movimiento del terreno analizado, se deberán calcular los parámetros de interés. Si al menos se analizan siete movimientos del terreno, el valor promedio de la respuesta de los parámetros de interés se puede usar para el diseño. Si se usan menos de siete movimientos del terreno, el valor a usar para el diseño corresponderá a la máxima respuesta de los parámetros de interés.

Desplazamientos y fuerzas laterales mínimas.

Sistema de aislación y elementos estructurales por debajo del sistema de aislación.

El sistema de aislación, la cimentación y todos los elementos estructurales debajo del sistema de aislación deben diseñarse y construirse cumpliendo todos los requerimientos apropiados de una estructura no aislada y las fuerzas obtenidas por el análisis dinámico sin reducción, pero la fuerza lateral de diseño no deberá tomarse menos que el 90% de V_b calculado mediante la Ecuación 7.

El desplazamiento total de diseño del sistema de aislación no deberá tomarse a menos que el 90% de D_{TD} . El desplazamiento total máximo del sistema de aislación no deberá tomarse a menos que el 80% de D_{TM} . Estos límites se deberán evaluar usando los valores de D_{TD} y D_{TM} determinados a partir de la Ecuación 5 y la Ecuación 6 respectivamente, teniendo en cuenta que se usarán los valores de D'_D y D'_M calculados con las siguientes ecuaciones, en lugar de D_D y D_M respectivamente.

$$D'_D = \frac{D_D}{\sqrt{1 + \left(\frac{T}{T_D}\right)^2}}$$

Ecuación 10. Cálculo de D'D en función de D_D

$$D'_M = \frac{D_M}{\sqrt{1 + \left(\frac{T}{T_M}\right)^2}}$$

Ecuación 11. Cálculo de D'M en función de D_M

Donde,

D_D: Desplazamiento de diseño en el centro de rigidez del sistema de aislación en la dirección bajo consideración. Ecuación 1.

D_M: Desplazamiento máximo en el centro de rigidez del sistema de aislación en la dirección bajo consideración. Ecuación 3.

T: Periodo elástico de la superestructura fijada en la base.

T_D: Periodo efectivo de la estructura sísmicamente aislada al desplazamiento de diseño en la dirección bajo consideración.

T_M: Periodo efectivo de la estructura sísmicamente aislada al desplazamiento máximo en la dirección bajo consideración.

Elementos estructurales por encima del sistema de aislación.

Los elementos estructurales por encima del sistema de aislación deben diseñarse usando las consideraciones apropiadas para una estructura no aislada y las fuerzas obtenidas del análisis dinámico divididas por R_I, donde R_I se determina como se mencionó anteriormente.

Cuando se use el procedimiento del espectro de respuesta y la estructura es de configuración regular, la fuerza lateral de diseño actuante sobre la estructura por encima del sistema de aislación, deberá tomarse a no menos que el 80% de V_s calculado con la Ecuación 8; cuando la estructura es de configuración irregular la fuerza lateral de diseño se tomará como el 100% de V_s.

Cuando se use el procedimiento de historia de la respuesta en el tiempo y la estructura es de configuración regular, la fuerza lateral de diseño actuante sobre la estructura por encima del sistema de aislación, deberá tomarse a no menos que el 60% de V_s calculado con la Ecuación 8; cuando la estructura es de configuración irregular la fuerza lateral de diseño se tomará como el 80% de V_s.

Cuando la fuerza lateral de diseño sobre los elementos estructurales, calculada mediante el análisis espectral o de historia en el tiempo, es menor que el mínimo valor requerido por las secciones anteriores, todos los parámetros de respuesta, incluyendo las fuerzas y los momentos en los miembros, deben ajustarse mayorándolos proporcionalmente.

La deriva se limita a $0.015h_{sx}$ cuando se usa un análisis espectral y a $0.020h_{sx}$ cuando se usa el análisis de historia en el tiempo.

Adicionalmente deben estimarse los efectos secundarios del sismo máximo considerado, Δ , de la superestructura combinadas con las fuerzas gravitacionales si la razón de deriva de piso excede $0.010/R_I$.

3.2 ANÁLISIS POR DESEMPEÑO.

El análisis lineal se ha venido usando durante décadas no tanto por su precisión en la obtención de valores de fuerzas, esfuerzos, deformaciones, sino más por su ventaja y practicidad en alcanzar información útil para diseño. El análisis no lineal, aun cuando es un poco más difícil, provee un método racional con resultados más apropiados y confiables para el diseño.

El diseño basado en desempeño tiene como objeto asegurar que el diseño alcance un cierto nivel de desempeño con cierta certidumbre bajo un sismo de gran magnitud. Los niveles de servicio más comunes son el de Ocupación Inmediata (IO) referido a poco o ningún daño en elementos estructurales o no estructurales se puede ocupar luego del evento sísmico con algunas reparaciones en ducterías e instalaciones; Seguridad de la Vida (LS) que permite algunos daños, pero poco o ningún tipo de heridos, se requieren algunas reparaciones antes de volver a ocuparse; Colapso Preventivo (CP) que permite daños considerables, pero no el colapso de la estructura.

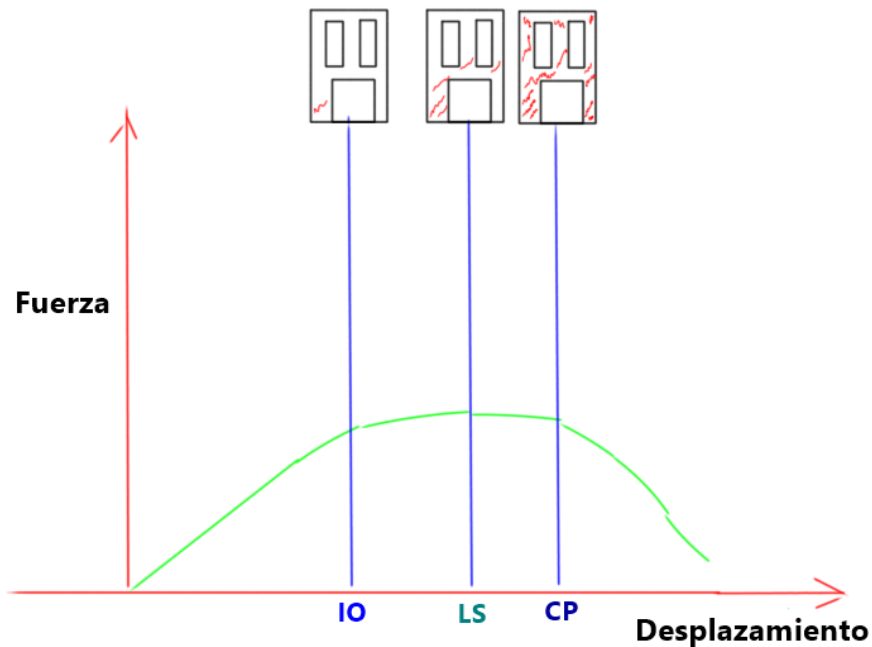


Figura 29. Niveles de desempeño. Fuente: Propia.

Como se aprecia en la Figura 29 para el nivel de desempeño IO se permite un poco de comportamiento inelástico, para LS se admite en gran medida el comportamiento inelástico, y para CP se lleva al límite la capacidad dúctil de los elementos. El concepto de diseño por capacidad

está asociado a obtener relaciones demanda capacidad menores a 1, es importante resaltar que el mecanismo u objetivo de diseño es permitir que algunos elementos alcancen fluencia mientras que otros permanecen en el rango elástico. Para evitar la incertidumbre y dependencia del análisis de un modelo que no representa cien por ciento la estructura real, es recomendable que el diseñador escoja de antemano que elementos quiere llevar a fluencia y cuales permanecerán elásticos, no al contrario, dejar que el análisis le arroje estos resultados. De esta manera, se puede luego diseñar los elementos que estarán en fluencia con la suficiente ductilidad y los componentes elásticos con la suficiente resistencia.

Para un sistema estructural de pórticos se prefiere el comportamiento viga débil – columna fuerte, por tanto, se especifica que las vigas puedan fluir o presentar comportamiento inelástico en flexión y alguna que otra columna en cubierta y en la base, los demás elementos como uniones viga columna, columnas, cimentación, vigas y columnas a cortante permanezcan elásticos.

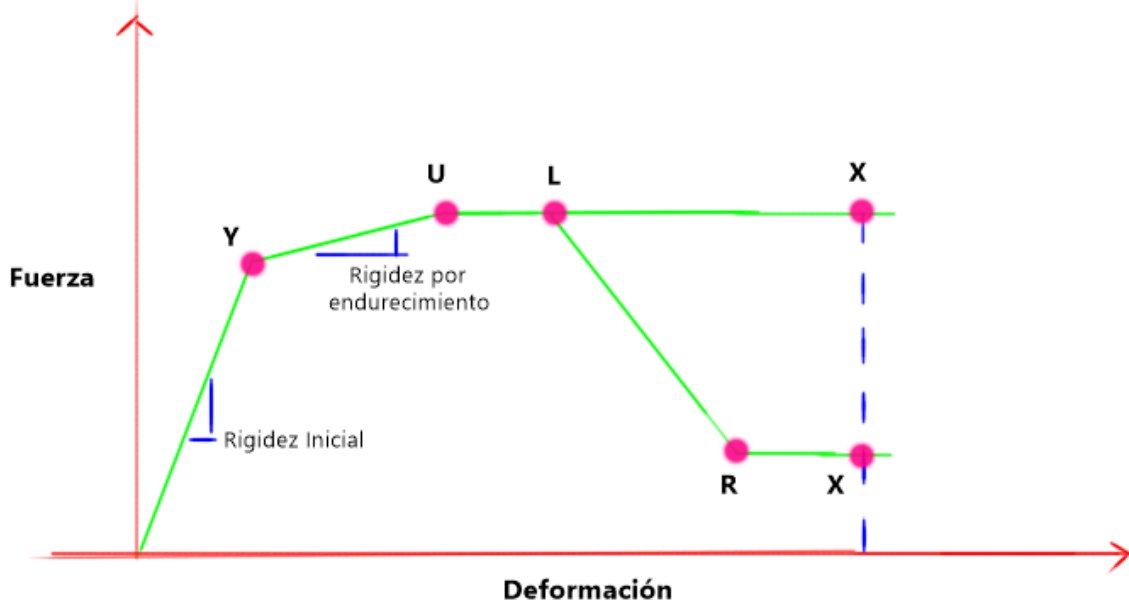


Figura 30. Aspectos principales Desempeño - Comportamiento No Lineal. Fuente: Propia.

La Figura 30 muestra los aspectos principales que se han desarrollado para tratar de asimilar el comportamiento no lineal de una estructura simplificando las relaciones de fuerza – deformación a etapas con límites definidos. Por ejemplo, el punto Y corresponde al límite del estimado donde ocurre la fluencia inicial, U es cuando se alcanza la resistencia última, L es el límite de ductilidad, de L a R ocurre la pérdida de resistencia y X es un punto máximo extremo de deformación que si es alcanzado no tiene sentido continuar el análisis porque es indicativo de que algo anda mal. El punto X se define para detener el análisis cuando se alcanzan deformaciones irreales para el caso en estudio.

Los códigos de diseño han aproximado el comportamiento no lineal a relaciones prácticas entre fuerza deformación, de manera más específica que la general mostrada para desempeño de la Figura 30. A partir de estos puntos se delimitan los niveles de desempeño para el diseño (Figura 31 y figura 32). Así la capacidad IO está cercana al punto de fluencia inicial, la capacidad para

nivel LS es alrededor del 75% de la capacidad CP, y el nivel CP se presenta muy cercano al límite de ductilidad. La mayoría de componentes de los cuales depende la resistencia de la estructura estarán dentro del nivel IO y LS, mientras los componentes de los cuales no depende la resistencia de la estructura tendrán valores cercanos al punto CP.

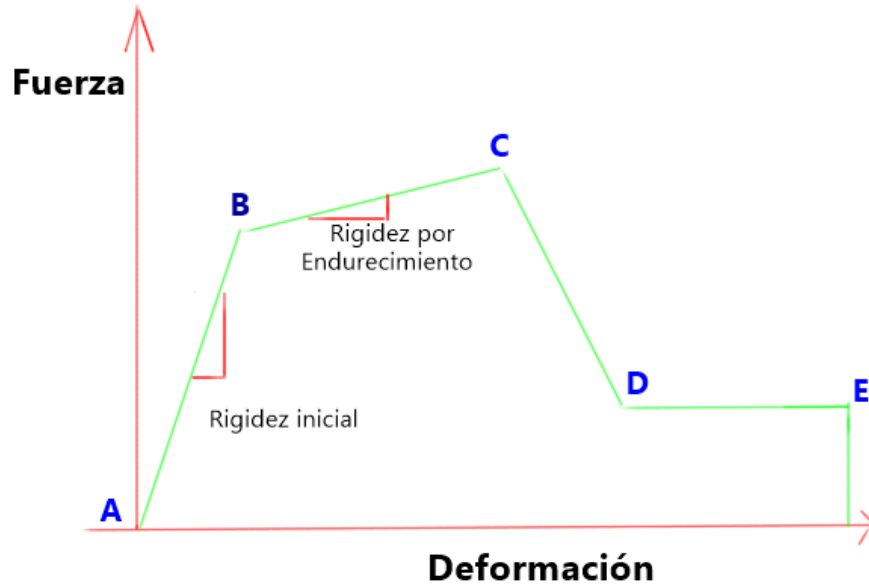


Figura 31. Relaciones prácticas Fuerza - Deformación Comportamiento No Lineal. Fuente: Propia.

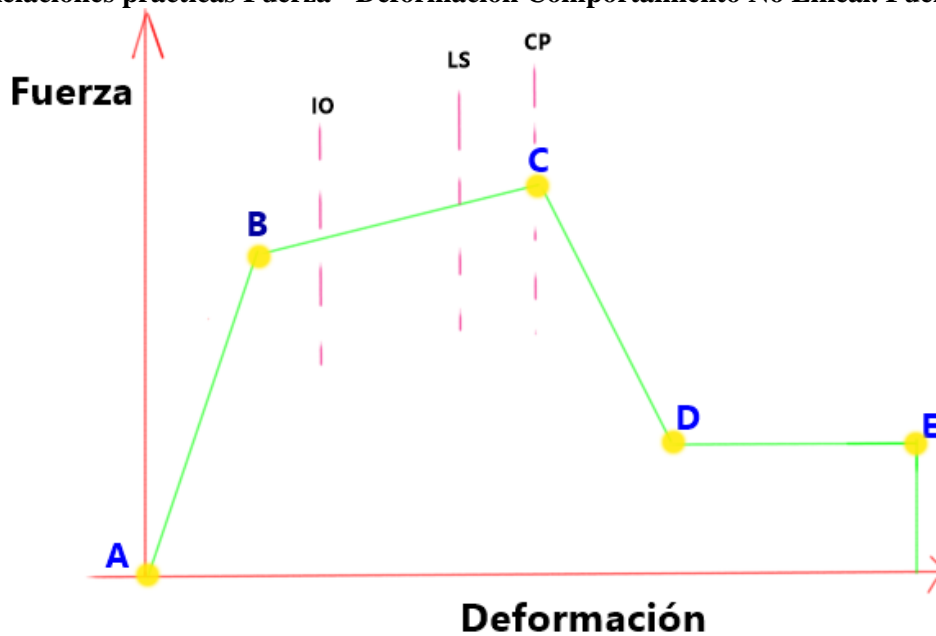


Figura 32. Niveles de desempeño según comportamiento no lineal. Fuente: Propia.

El análisis no lineal comprende la no linealidad de los materiales, por ejemplo, la curva esfuerzo deformación del acero típica muestra un comportamiento lineal con un módulo de elasticidad determinado aproximado de 200 GPa hasta su punto de fluencia, luego viene la etapa de

endurecimiento por deformación y por último la rotura. El comportamiento no lineal del acero se representará como lineal hasta el punto de fluencia y a partir de ese punto como una línea horizontal asumiendo un comportamiento completamente plástico con módulo igual a cero. También se debe considerar la no linealidad geométrica, teniendo en cuenta los efectos P-Delta y los efectos de segundo orden.

La NSR – 10 en el Apéndice A-3 Procedimiento No Lineal Estático De Plastificación Progresiva “Push – Over” establece los requisitos que deben cumplir las estructuras a ser sometidas a este tipo de análisis, también se cuenta con las etapas que deben desarrollarse desde la creación del modelo matemático, pasando por el análisis, las fórmulas asociadas al proceso de cálculo, conceptos y parámetros.

El análisis Push – Over contempla información relativa a propiedades de los materiales en cuanto a resistencia, refuerzos y distribución del mismo, dimensiones, solicitaciones gravitacionales y laterales, la selección objetiva de los puntos donde queremos que se formen las rótulas plásticas y sus propiedades de esfuerzo deformación.

A continuación, se presenta las ecuaciones y términos utilizados en la NSR 10 para análisis estático no lineal para plastificación progresiva Push – Over.

Desplazamiento objetivo

$$\delta_T = C_0 C_1 S_a \left(\frac{T_e}{2\pi} \right)^2 g$$

Ecuación 12. Desplazamiento objetivo. Fuente: (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA , 2017)

Donde, C_0 es un coeficiente de modificación para relacionar el desplazamiento espectral de un sistema de un grado de libertad equivalente a el desplazamiento en la cubierta de la estructura con sistema de múltiples grados de libertad.

$$C_0 = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \phi_i}{\sum_{i=1}^n m_i \phi_i^2}$$

Ecuación 13. Coeficiente C_0 . Fuente: (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA , 2017)

m_i : hace referencia a la porción de la masa total localizada en el nivel de estudio i .

ϕ_i : es la amplitud del vector característico de forma al nivel i . Corresponde a la forma del primer modo de la estructura en la dirección que se está considerando, determinada por medio de un análisis modal de la estructura con las propiedades del primer incremento de la carga lateral (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA , 2017).

C_1 es un coeficiente de modificación que relaciona los máximos desplazamientos inelásticos con los desplazamientos calculados para la respuesta lineal elástica.

$$C_1 = \frac{1}{R_d} \left(1 + \frac{(R_d - 1) T_C}{T_e} \right)$$

Ecuación 14. Coeficiente de modificación C_1 . Fuente: (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA, 2017)

Con R_d definido como la relación entre el cortante estático en la base sobre la resistencia efectiva a la fluencia.

$$R_d = \frac{S_a M g}{V_y}$$

Ecuación 15. Cálculo de R_d . Fuente: (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA, 2017)
 S_a corresponde a la aceleración espectral definida en el artículo A.2.6 de la NSR – 10.

M es la masa total de la edificación.

g : es el valor de la aceleración de la gravedad.

V_y es la resistencia efectiva a fluencia definida como la fuerza de desempeño de la estructura en la dirección estudiada resultante del análisis estático no lineal Push – Over, para la curva de fuerza versus desplazamiento no lineal idealizada desarrollada para el edificio.

T_e se denomina periodo efectivo fundamental y se determina como sigue:

$$T_e = T_1 \sqrt{\frac{V_1 / \delta_1}{V_y / \delta_y}}$$

Ecuación 16. Periodo efectivo fundamental. Fuente: (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA, 2017)

T_1 es el periodo fundamental de la estructura en la dirección que está bajo consideración determinado en la primera iteración del análisis de “Push – Over”. (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA, 2017).

V_1 es la fuerza lateral total aplicada al primer incremento de la carga lateral. (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA, 2017).

δ_1 es el desplazamiento del punto de control al primer incremento de la carga lateral. (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA, 2017).

δ_y es el desplazamiento efectivo de fluencia del punto de control determinado de una curva bilineal ajustada a la curva de capacidad. (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA, 2017).

T_C es período de vibración, en segundos, correspondiente a la transición entre la zona de aceleración constante del espectro de diseño, para períodos cortos, y la parte descendiente del mismo, definido en el artículo A.2.6. de la NSR – 10.

El método de análisis no lineal estático consiste en la representación gráfica del desempeño sísmico esperado de la estructura al intersecar el espectro de capacidad de la estructura con el espectro de respuesta o demanda del sismo. El punto común de la intersección resultante corresponde al punto de desempeño y su respectiva coordenada de desplazamiento es la demanda de desplazamiento estimada sobre la estructura para el nivel de amenaza sísmica especificado (Figura 33).

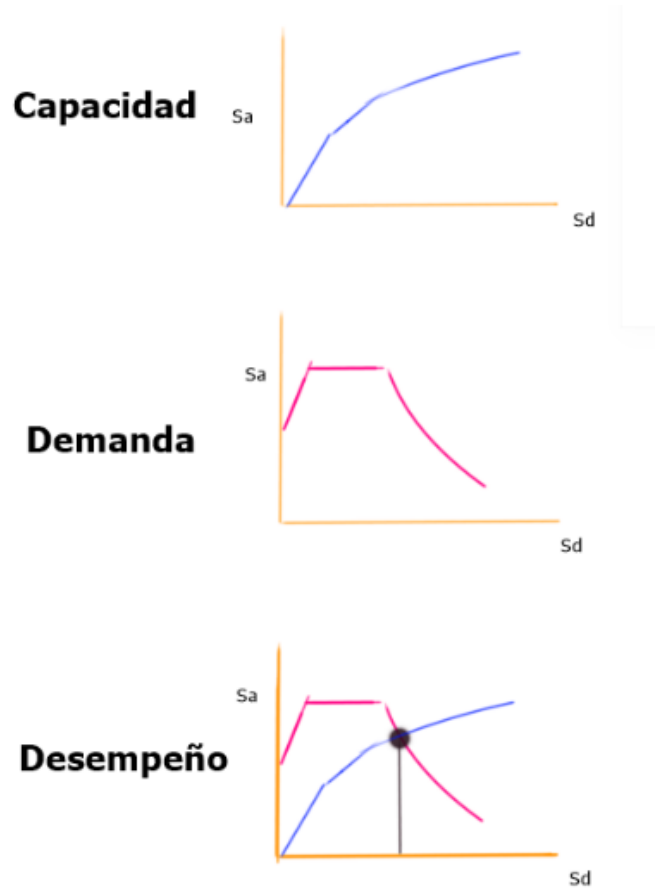


Figura 33. Análisis no lineal, diseño por desempeño. Fuente: Propia.

La curva de capacidad que se muestra en la Figura 34 establece la relación entre la fuerza cortante basal y el desplazamiento en el nivel superior de la estructura para cada incremento de carga, en general se construye para el primer modo de vibración como representativo del comportamiento de la estructura, lo que es válido para periodos menores o iguales a 1 segundo, cuando se tienen periodos mayores es necesario considerar los otros modos principales de vibración.

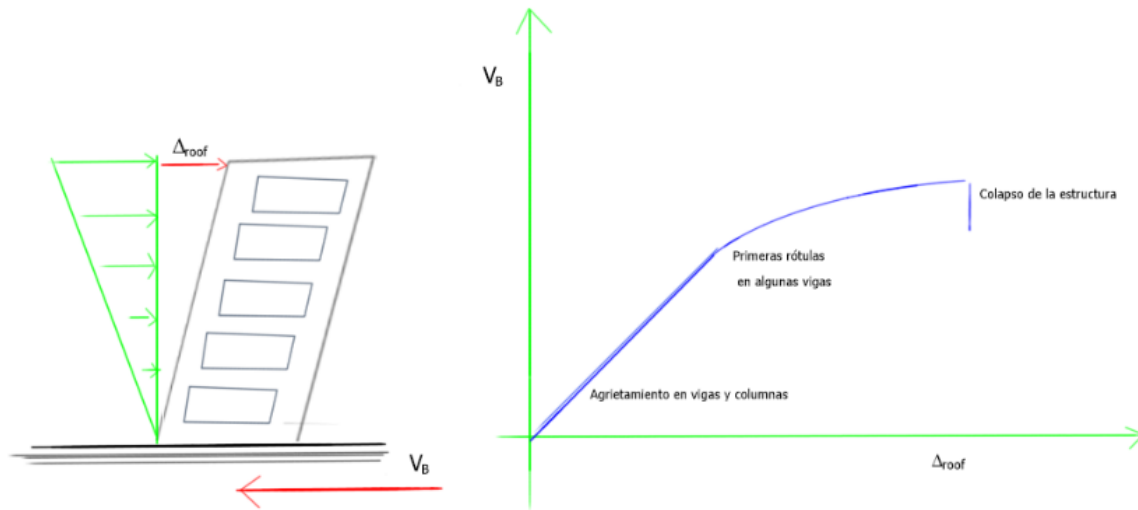


Figura 34. Curva de capacidad estructural. Fuente: Propia.

Se trata entonces de empujar la estructura a intervalos de carga constante y llevarla al colapso. En este proceso los elementos o componentes van alcanzando los distintos estados límites de servicio progresivamente, formándose las rótulas plásticas, como se ilustra en la Figura 35.

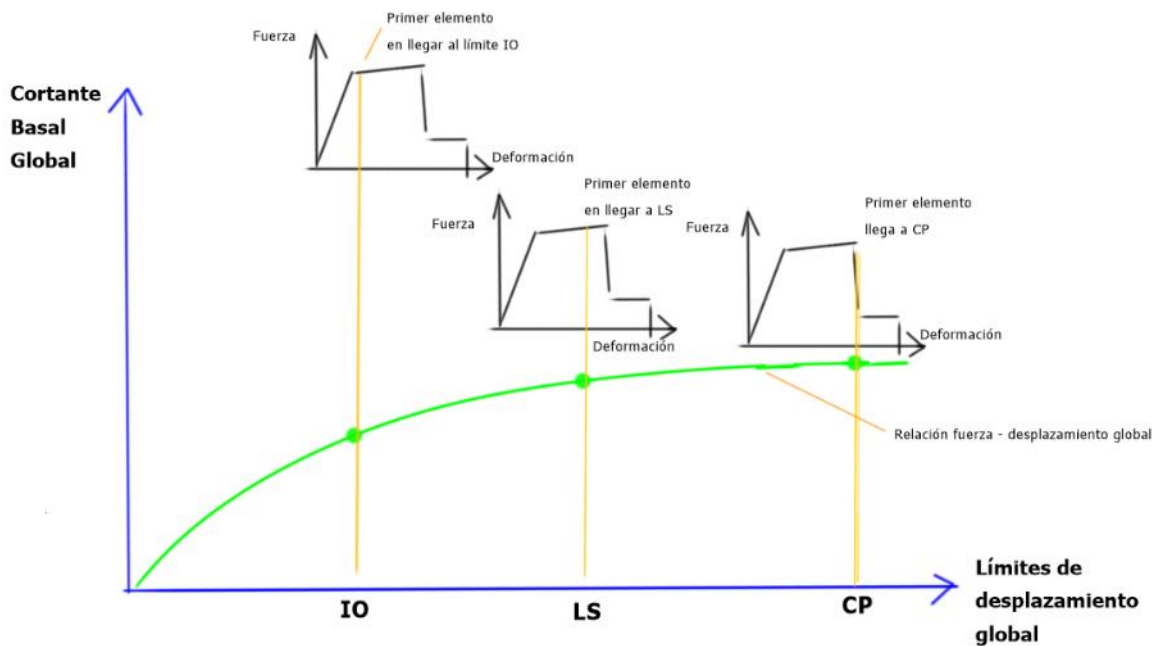


Figura 35. Plastificación progresiva de un componente. Fuente: Propia.

Capítulo 4

(Metodología/Desarrollo/Materiales Y Métodos/Diseño Experimental)

La metodología que se generó para el desarrollo y cumplimiento de objetivos, conllevó la realización de un análisis dinámico con modelos simplificados de 3 grados de libertad, para edificación con base fija y para edificación con base aislada 4 grados de libertad, consiguiendo una representación de ambos comportamientos y el cálculo de desplazamientos, y establecer así algunos de los principios básicos para un adecuado funcionamiento de un sistema de aislación. Seguido a esto, se puede entonces, aproximar el comportamiento de la edificación de cuatro grados de libertad a un modelo más simplificado de dos GDL, uno que corresponde al sistema de aislamiento y el otro a la superestructura.

Se procede luego a la aplicación de los cálculos de los parámetros de diseño para cada sistema de aislación según su tipología, como insumo se necesita de un predimensionamiento de una estructura con base fija, el uso de los espectros del sismo máximo esperado para las dos microzonas sísmicas, dependiendo de la naturaleza del aislador se verifican sus parámetros de diseño, este se hace para un análisis estático y se comprueba a través de análisis dinámico que se cumplan con los parámetros objetivos. Se comparan los resultados con variables de control y se escoge un sistema de aislación.

Por último, se diseñan los elementos estructurales de la edificación con base fija y se corrobora su desempeño sísmico por medio de un análisis Push Over para ambas microzonas, para el edificio con base aislada se diseñan los elementos de la superestructura y se verifica su desempeño a través de un análisis dinámico no lineal tiempo historia. Estos últimos se vuelven a comparar para establecer conclusiones.

4.1 Desarrollo de objetivos

4.1.1 Modelos Grados de Libertad

Modelo dinámico de edificación con 3 GDL sistema aislado.

Se establece en este apartado el análisis simplificado de una estructura con tres grados de libertad para la posterior formulación de un sistema aislado de similares condiciones, estableciendo los principios básicos de la metodología de diseño.

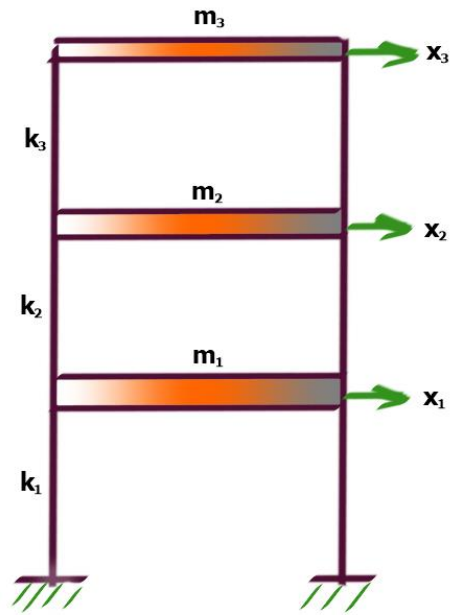


Figura 36. Estructura Base Fija 3 GDL. Fuente: Propia.

De la estructura mostrada en la Figura 36, suponemos está ubicada en la zona Piedemonte C, otros datos se muestran a continuación.

Material: Concreto Reforzado.

Resistencia a la compresión del concreto $f'_c = 28 \text{ MPa}$

Módulo de Elasticidad del concreto = 20636.9 MPa

Peso Específico = 24 kN/m^3

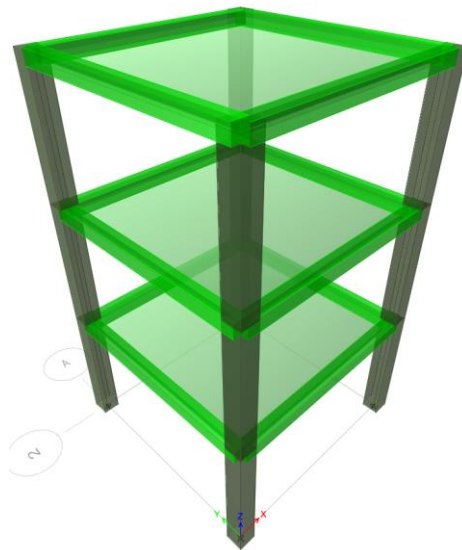


Figura 37. Modelo 3D Estructura de Base Fija. Fuente: Propia

Se considera la estructura de la Figura 37 un edificio de 3 niveles con las vigas y losas rígidas a flexión con las masas concentradas en cada nivel y la misma rigidez de entrepiso para todos los niveles.

Nivel	Masa	Peso
	kN-s ² /m	kN
Nivel 3	45.785	449
Nivel 2	66.995	657
Nivel 1	66.995	657

Tabla 6. Masas del sistema 3gdl fijo. Fuente: Propia.

Las columnas tienen sección cuadrada de 40 cm de lado, altura de entrepiso de 3.10 m, se presentan los cálculos matemáticos realizados en Mathcad Prime calcula su rigidez de la siguiente manera:

$$H := 3.1 \text{ m}$$

$$f'_c := 28 \text{ MPa}$$

$$E_c := 3900 \sqrt{f'_c} \cdot \text{MPa} = 20636.9 \text{ MPa}$$

$$\gamma_c := 24 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$W_1 := 657 \text{ kN}$$

$$W_2 := 657 \text{ kN}$$

$$W_3 := 449 \text{ kN}$$

$$m_1 := \frac{W_1}{g} = 66.995 \text{ kN} \cdot \frac{\text{s}^2}{\text{m}}$$

$$m_2 := \frac{W_2}{g} = 66.995 \text{ kN} \cdot \frac{\text{s}^2}{\text{m}}$$

$$m_3 := \frac{W_3}{g} = 45.785 \text{ kN} \cdot \frac{\text{s}^2}{\text{m}}$$

Información columna

$$c := 40 \text{ cm}$$

$$w_{col} := \gamma_c \cdot c^2 \cdot H = 11.904 \text{ kN}$$

$$I_{col} := \frac{c^4}{12} = 213333.3 \text{ cm}^4$$

$$k_{col} := \frac{12 E_c I_{col}}{H^3} = 17733.7 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$N_{col} := 4$$

$$k_1 := N_{col} \cdot k_{col}$$

$$k_1 = 70934.66 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$k_2 := k_1$$

$$k_3 := k_1$$

Matriz de masas

$$M := \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 66.995 & 0 & 0 \\ 0 & 66.995 & 0 \\ 0 & 0 & 45.785 \end{bmatrix} \text{ kN} \cdot \frac{\text{s}^2}{\text{m}}$$

Matriz de rigideces

$$K := \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 141869.32 & -70934.66 & 0 \\ -70934.66 & 141869.32 & -70934.66 \\ 0 & -70934.66 & 70934.66 \end{bmatrix} \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Se plantea el cálculo del determinante $(K - \lambda M) = 0$

$$\lambda := \text{eigenvals}(M^{-1} \cdot K) = \begin{bmatrix} 3639.24 \\ 1893.16 \\ 252.09 \end{bmatrix} \frac{1}{s^2}$$

Frecuencias y Periodos

$$\lambda_2 = 252.094 \frac{1}{s^2} \quad \omega_1 := \sqrt{\lambda_2} = 15.877 \frac{1}{s} \quad T_1 := \frac{2 \pi}{\omega_1} = 0.396 \text{ s}$$

$$\lambda_1 = 1893.16 \frac{1}{s^2} \quad \omega_2 := \sqrt{\lambda_1} = 43.51 \frac{1}{s} \quad T_2 := \frac{2 \pi}{\omega_2} = 0.144 \text{ s}$$

$$\lambda_0 = 3639.24 \frac{1}{s^2} \quad \omega_3 := \sqrt{\lambda_0} = 60.326 \frac{1}{s} \quad T_3 := \frac{2 \pi}{\omega_3} = 0.104 \text{ s}$$

Cálculo de Autovectores

$$\Phi_1 := \text{eigenvec}(M^{-1} \cdot K, \lambda_2) = \begin{bmatrix} 0.342 \\ 0.603 \\ 0.72 \end{bmatrix}$$

$$\Phi_2 := \text{eigenvec}(M^{-1} \cdot K, \lambda_1) = \begin{bmatrix} -0.715 \\ -0.152 \\ 0.683 \end{bmatrix}$$

$$\Phi_3 := \text{eigenvec}(M^{-1} \cdot K, \lambda_0) = \begin{bmatrix} 0.488 \\ -0.701 \\ 0.52 \end{bmatrix}$$

$$J_b := \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$W' := g \cdot M = \begin{bmatrix} 657 & 0 & 0 \\ 0 & 657 & 0 \\ 0 & 0 & 449 \end{bmatrix} \text{ kN}$$

$$\Phi'_1 := \frac{\Phi_1}{\Phi_{1_2}} = \begin{bmatrix} 0.475 \\ 0.837 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$W'_1 := \frac{(\Phi'_1{}^T \cdot W' \cdot J_b)^2}{\Phi'_1{}^T \cdot W' \cdot \Phi'_1} = 1625.34 \text{ kN}$$

$$\Gamma'_1 := \frac{(\Phi'_1{}^T \cdot M \cdot J_b)}{\Phi'_1{}^T \cdot M \cdot \Phi'_1} = 1.239$$

$$\Phi'_2 := \frac{\Phi_2}{\Phi_{2_2}} = \begin{bmatrix} -1.047 \\ -0.222 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$W'_2 := \frac{(\Phi'_2{}^T \cdot W' \cdot J_b)^2}{\Phi'_2{}^T \cdot W' \cdot \Phi'_2} = 123.18 \text{ kN}$$

$$\Gamma'_2 := \frac{(\Phi'_2{}^T \cdot M \cdot J_b)}{\Phi'_2{}^T \cdot M \cdot \Phi'_2} = -0.32$$

$$\Phi'_3 := \frac{\Phi_3}{\Phi_{3_2}} = \begin{bmatrix} 0.939 \\ -1.349 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$W'_3 := \frac{(\Phi'_3{}^T \cdot W' \cdot J_b)^2}{\Phi'_3{}^T \cdot W' \cdot \Phi'_3} = 14.48 \text{ kN}$$

$$\Gamma'_3 := \frac{(\Phi'_3{}^T \cdot M \cdot J_b)}{\Phi'_3{}^T \cdot M \cdot \Phi'_3} = 0.081$$

$$\Gamma'_1 + \Gamma'_2 + \Gamma'_3 = 1$$

$$\frac{W'_1}{W} = 92.192\% \quad \frac{W'_2}{W} = 6.987\% \quad \frac{W'_3}{W} = 0.821\%$$

$$W := W_1 + W_2 + W_3 = 1763 \text{ kN}$$

$$W'_1 + W'_2 + W'_3 = 1763 \text{ kN}$$

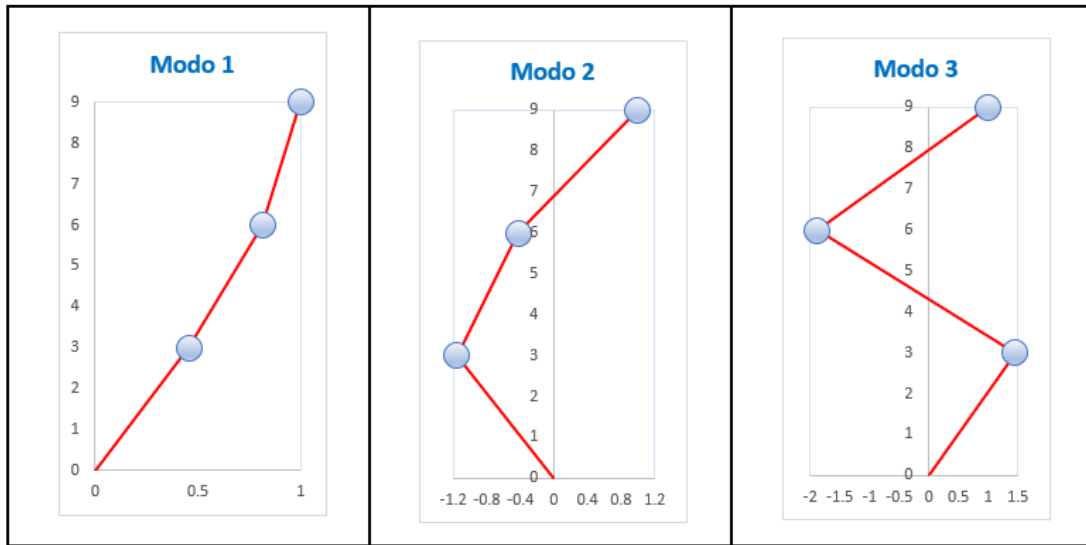


Figura 38. Modos de vibración modelo fijo 3 GDL. Fuente: Propia.

La Figura 38 muestra los 3 modos de vibración del modelo fijo de 3 GDL. Del espectro de diseño para la microzona Piedemonte C, obtenemos el valor de S_a para los tres periodos de cada modo.

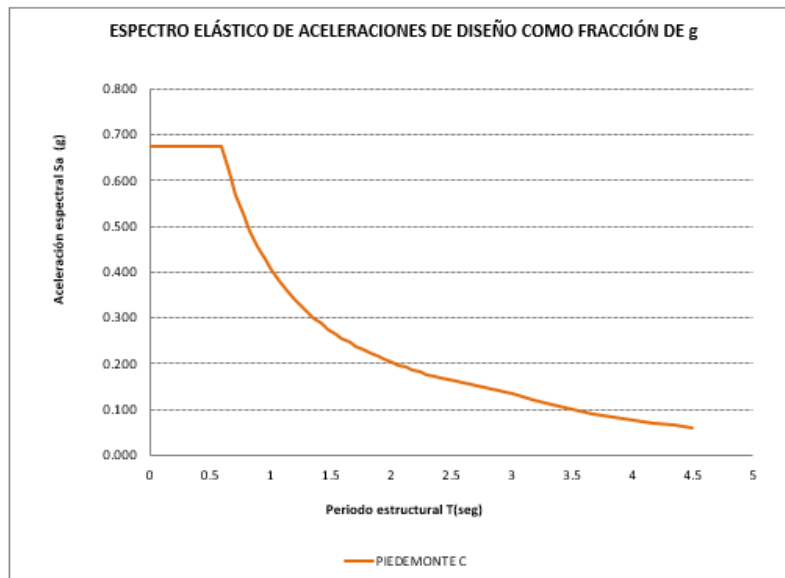


Figura 39. Espectro de diseño Piedemonte C. Fuente: Propia.

Para un coeficiente de amortiguamiento crítico de $\xi = 5\%$ la relación entre los espectros de pseudo-aceleración y desplazamientos viene dada por:

$$S_d(T, \xi) = \frac{T^2 \times S_a(T, \xi)}{4\pi^2}$$

Ecuación 17. Cálculo de desplazamiento S_d a partir de S_a

$$T_1 = 0.396 \text{ s}$$

$$S_{a1} := 0.675$$

$$S_{d1} := S_{a1} \cdot \left(\frac{T_1}{2 \cdot \pi} \right)^2 \cdot g = 2.626 \text{ cm}$$

$$T_2 = 0.144 \text{ s}$$

$$S_{a2} := 0.675$$

$$S_{d2} := S_{a2} \cdot g \cdot \left(\frac{T_2}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 0.35 \text{ cm}$$

$$T_3 = 0.104 \text{ s}$$

$$S_{a3} := 0.675$$

$$S_{d3} := S_{a3} \cdot g \cdot \left(\frac{T_3}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 0.182 \text{ cm}$$

$$S_d = \sqrt{(I_1^v \cdot S_{d1})^2 + (I_2^v \cdot S_{d2})^2 + (I_3^v \cdot S_{d3})^2} = 3.257 \text{ cm}$$

Se tendría entonces para este modelo de 3 GDL un desplazamiento en cubierta superior a 3 cm, ahora se analizará el modelo aislado en su base, el cual tendrá un GDL más correspondiente al sistema de aislación como se puede visualizar en la Figura 40.

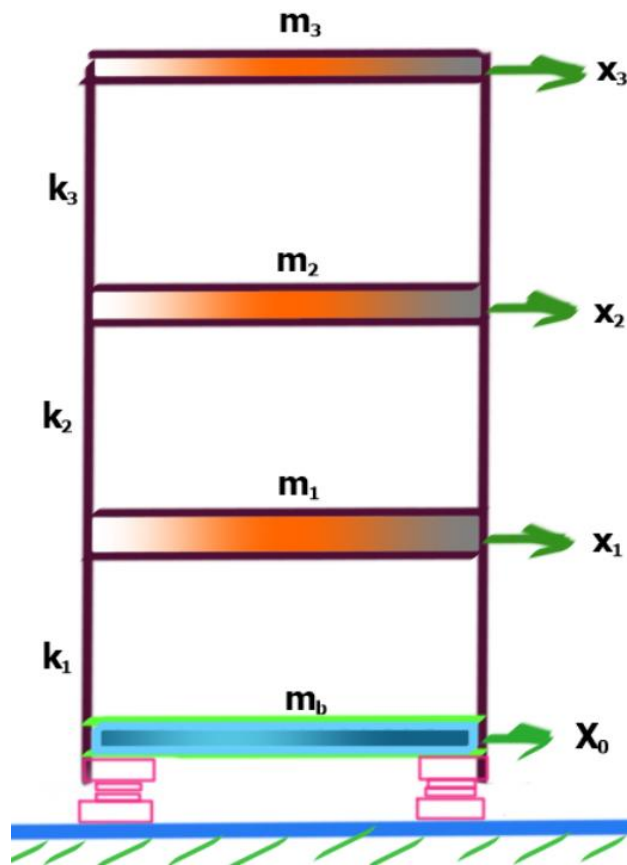


Figura 40. Estructura Base Aislada 4 GDL. Fuente: Propia.

$$W_b := 730 \text{ kN}$$

$$m_b := \frac{W_b}{g} = 74.439 \text{ kN} \cdot \frac{\text{s}^2}{\text{m}}$$

$$W_s := W_1 + W_2 + W_3$$

$$W_t := W_s + W_b = 2493 \text{ kN}$$

$$M_s := m_1 + m_2 + m_3$$

$$M_s = 179.776 \text{ kN} \cdot \frac{\text{s}^2}{\text{m}}$$

$$M_t := M_s + m_b = 254.215 \text{ kN} \cdot \frac{\text{s}^2}{\text{m}}$$

Periodo de estructura fija

$$T_f := T_1 = 0.396 \text{ s}$$

Periodo efectivo del sistema de aislamiento $T_b \geq 3 T_s$

$$T_b := 2 \text{ s}$$

$$\frac{T_b}{T_f} = 5.051$$

$$k_b := \frac{4 \cdot \pi^2}{T_b^2} \cdot \left(\frac{W_t}{g} \right) = 2509.004 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\beta_b := 20\%$$

$$B := \left(\frac{\beta_b}{5\%} \right)^{0.3} = 1.516$$

$$c_b := 2 \cdot \beta_b \cdot \sqrt{k_b \cdot M_t} = 319.456 \frac{\text{kN} \cdot \text{s}}{\text{m}}$$

$$M' := \begin{bmatrix} m_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 74.439 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 66.995 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 66.995 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 45.785 \end{bmatrix} \frac{\text{kN} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$$

$$W' := M' \cdot g = \begin{bmatrix} 730 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 657 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 657 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 449 \end{bmatrix} \text{kN}$$

$$K' := \begin{bmatrix} k_b + k_1 & -k_1 & 0 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ 0 & -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 73443.7 & -70934.7 & 0 & 0 \\ -70934.7 & 141869.3 & -70934.7 & 0 \\ 0 & -70934.7 & 141869.3 & -70934.7 \\ 0 & 0 & -70934.7 & 70934.7 \end{bmatrix} \frac{kN}{m}$$

Se plantea el cálculo del determinante $(K' - \lambda M') = 0$

$$\lambda := \text{eigenvals}(M'^{-1} \cdot K') = \begin{bmatrix} 3748.87 \\ 2309.7 \\ 702.92 \\ 9.62 \end{bmatrix} \frac{1}{s^2}$$

Frecuencias y Periodos

$$\lambda_3 = 9.618 \frac{1}{s^2} \quad \omega_1 := \sqrt{\lambda_3} = 3.101 \frac{1}{s} \quad T'_1 := \frac{2\pi}{\omega_1} = 2.026 \text{ s}$$

$$\lambda_2 = 702.918 \frac{1}{s^2} \quad \omega_2 := \sqrt{\lambda_2} = 26.513 \frac{1}{s} \quad T'_2 := \frac{2\pi}{\omega_2} = 0.237 \text{ s}$$

$$\lambda_1 = 2309.7 \frac{1}{s^2} \quad \omega_3 := \sqrt{\lambda_1} = 48.059 \frac{1}{s} \quad T'_3 := \frac{2\pi}{\omega_3} = 0.131 \text{ s}$$

$$\lambda_0 = 3748.87 \frac{1}{s^2} \quad \omega_4 := \sqrt{\lambda_0} = 61.228 \frac{1}{s} \quad T'_4 := \frac{2\pi}{\omega_4} = 0.103 \text{ s}$$

Matriz de amortiguamiento de Rayleigh

$$\beta_b = 0.2$$

$$\zeta = 0.05$$

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} := 2 \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\omega_1} & \omega_1 \\ \frac{1}{\omega_2} & \omega_2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \beta_b \\ \zeta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.221 \frac{1}{s} \\ 0.002 \text{ s} \end{bmatrix}$$

$$\zeta_3 := \frac{a}{2 \cdot \omega_3} + \frac{b}{2} \cdot \omega_3 = 6.16\%$$

$$\zeta_4 := \frac{a}{2 \cdot \omega_4} + \frac{b}{2} \cdot \omega_4 = 7.226\%$$

$$C' := a \cdot M' + b \cdot K' = \begin{bmatrix} 240.331 & -144.338 & 0 & 0 \\ -144.338 & 370.474 & -144.338 & 0 \\ 0 & -144.338 & 370.474 & -144.338 \\ 0 & 0 & -144.338 & 200.24 \end{bmatrix} \frac{kN \cdot s}{m}$$

Cálculo de Autovectores

$$\Phi_1 := \text{eigenvec}(M'^{-1} \cdot K', \lambda_3) = \begin{bmatrix} 0.486 \\ 0.498 \\ 0.506 \\ 0.509 \end{bmatrix} \quad \Phi_2 := \text{eigenvec}(M'^{-1} \cdot K', \lambda_2) = \begin{bmatrix} -0.612 \\ -0.182 \\ 0.369 \\ 0.675 \end{bmatrix}$$

$$\Phi_3 := \text{eigenvec}(M'^{-1} \cdot K', \lambda_1) = \begin{bmatrix} -0.415 \\ 0.576 \\ 0.31 \\ -0.632 \end{bmatrix} \quad \Phi_4 := \text{eigenvec}(M'^{-1} \cdot K', \lambda_0) = \begin{bmatrix} 0.191 \\ -0.554 \\ 0.662 \\ -0.467 \end{bmatrix}$$

$$J_b := \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\Phi'_1 := \frac{\Phi_1}{\Phi_{13}} = \begin{bmatrix} 0.954 \\ 0.979 \\ 0.994 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$W'_1 := \frac{(\Phi'_1{}^T \cdot W' \cdot J_b)^2}{\Phi'_1{}^T \cdot W' \cdot \Phi'_1} = 254.132 \text{ tonnef} \quad \Gamma'_1 := \frac{(\Phi'_1{}^T \cdot M' \cdot J_b)}{\Phi'_1{}^T \cdot M' \cdot \Phi'_1} = 1.021$$

$$\Phi'_2 := \frac{\Phi_2}{\Phi_{23}} = \begin{bmatrix} -0.907 \\ -0.27 \\ 0.546 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$W'_2 := \frac{(\Phi'_2{}^T \cdot W' \cdot J_b)^2}{\Phi'_2{}^T \cdot W' \cdot \Phi'_2} = 0.079 \text{ tonnef} \quad \Gamma'_2 := \frac{(\Phi'_2{}^T \cdot M' \cdot J_b)}{\Phi'_2{}^T \cdot M' \cdot \Phi'_2} = -0.025$$

$$\Phi'_3 := \frac{\Phi_3}{\Phi_{33}} = \begin{bmatrix} 0.656 \\ -0.911 \\ -0.491 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$W'_3 := \frac{(\Phi'_3{}^T \cdot W' \cdot J_b)^2}{\Phi'_3{}^T \cdot W' \cdot \Phi'_3} = 0.003 \text{ tonnef} \quad \Gamma'_3 := \frac{(\Phi'_3{}^T \cdot M' \cdot J_b)}{\Phi'_3{}^T \cdot M' \cdot \Phi'_3} = 0.005$$

$$\Phi'_4 := \frac{\Phi_4}{\Phi_{43}} = \begin{bmatrix} -0.41 \\ 1.187 \\ -1.42 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$W'_4 := \frac{(\Phi'_4{}^T \cdot W' \cdot J_b)^2}{\Phi'_4{}^T \cdot W' \cdot \Phi'_4} = 0 \text{ tonnef} \quad \Gamma'_4 := \frac{(\Phi'_4{}^T \cdot M' \cdot J_b)}{\Phi'_4{}^T \cdot M' \cdot \Phi'_4} = -0.001$$

$$\Gamma'_1 + \Gamma'_2 + \Gamma'_3 + \Gamma'_4 = 1$$

La Figura 41 muestra los 4 modos de vibración del modelo aislado donde predomina el modo 1 con la mayor participación y se puede apreciar el movimiento de la superestructura como un bloque.

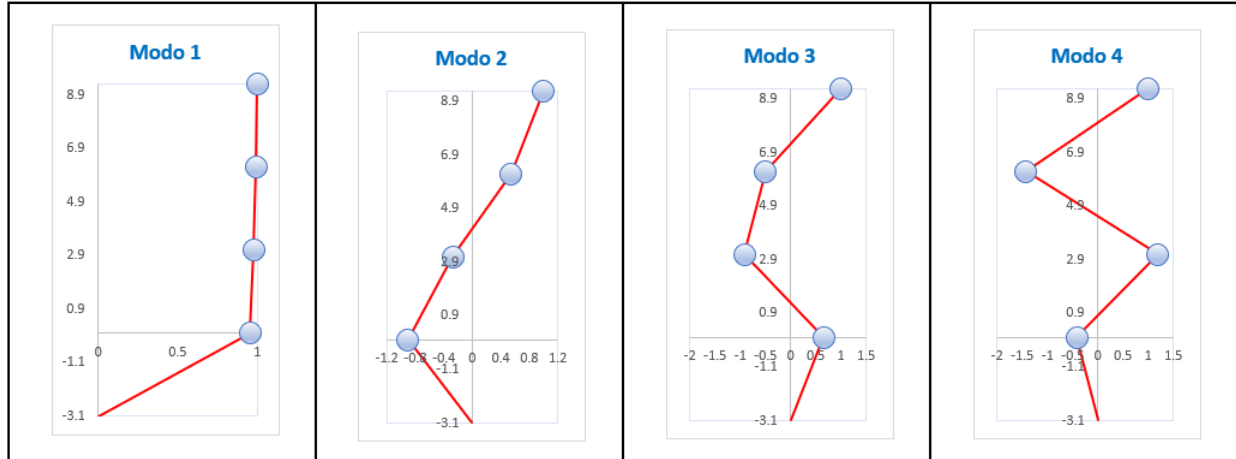


Figura 41. Modos de vibración modelo aislado 4 GDL. Fuente: Propia.

$$T'_1 = 2.026 \text{ s}$$

$$T'_2 = 0.237 \text{ s}$$

$$T'_3 = 0.131 \text{ s}$$

$$T'_4 = 0.103 \text{ s}$$

$$S'_{a1} := 0.204$$

$$S'_{a2} := 0.675$$

$$S'_{a3} := 0.675$$

$$S'_{a4} := 0.675$$

$$C'_1 := \Phi'_1{}^T \cdot C' \cdot \Phi'_1 = 302.583 \frac{\text{kN} \cdot \text{s}}{\text{m}}$$

$$M'_1 := \Phi'_1{}^T \cdot M' \cdot \Phi'_1 = 243.914 \text{ kN} \cdot \frac{\text{s}^2}{\text{m}}$$

$$C'_2 := \Phi'_2{}^T \cdot C' \cdot \Phi'_2 = 349.768 \frac{\text{kN} \cdot \text{s}}{\text{m}}$$

$$M'_2 := \Phi'_2{}^T \cdot M' \cdot \Phi'_2 = 131.925 \text{ kN} \cdot \frac{\text{s}^2}{\text{m}}$$

$$C'_3 := \Phi'_3{}^T \cdot C' \cdot \Phi'_3 = 885.517 \frac{\text{kN} \cdot \text{s}}{\text{m}}$$

$$M'_3 := \Phi'_3{}^T \cdot M' \cdot \Phi'_3 = 149.562 \text{ kN} \cdot \frac{\text{s}^2}{\text{m}}$$

$$C'_4 := \Phi'_4{}^T \cdot C' \cdot \Phi'_4 = 2546.497 \frac{\text{kN} \cdot \text{s}}{\text{m}}$$

$$M'_4 := \Phi'_4{}^T \cdot M' \cdot \Phi'_4 = 287.767 \text{ kN} \cdot \frac{\text{s}^2}{\text{m}}$$

$$\xi'_1 := \frac{C'_1}{2 \cdot \omega_1 \cdot M'_1} = 20\%$$

$$\xi'_3 := \frac{C'_3}{2 \cdot \omega_3 \cdot M'_3} = 6.2\%$$

$$\xi'_2 := \frac{C'_2}{2 \cdot \omega_2 \cdot M'_2} = 5\%$$

$$\xi'_4 := \frac{C'_4}{2 \cdot \omega_4 \cdot M'_4} = 7.226\%$$

$$B'_1 := \left(\frac{\xi'_1}{5\%} \right)^{0.3} = 1.516$$

$$B'_3 := \left(\frac{\xi'_3}{5\%} \right)^{0.3} = 1.065$$

$$B'_2 := \left(\frac{\xi'_2}{5\%} \right)^{0.3} = 1 \quad B'_4 := \left(\frac{\xi'_4}{5\%} \right)^{0.3} = 1.117$$

$$S'_{d1} := \frac{S'_{a1} \cdot g}{B'_1} \cdot \left(\frac{T'_1}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 13.723 \text{ cm}$$

$$S'_{d2} := \frac{S'_{a2} \cdot g}{B'_2} \cdot \left(\frac{T'_2}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 0.942 \text{ cm}$$

$$S'_{d3} := \frac{S'_{a3} \cdot g}{B'_3} \cdot \left(\frac{T'_3}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 0.269 \text{ cm}$$

$$S'_{d4} := \frac{S'_{a4} \cdot g}{B'_4} \cdot \left(\frac{T'_4}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 0.158 \text{ cm}$$

$$S'_d := \sqrt{(\Gamma'_1 \cdot S'_{d1})^2 + (\Gamma'_2 \cdot S'_{d2})^2 + (\Gamma'_3 \cdot S'_{d3})^2 + (\Gamma'_4 \cdot S'_{d4})^2} = 14.007 \text{ cm}$$

$$X := \sqrt{(\Gamma'_1 \cdot \Phi'_1 \cdot S'_{d1})^2 + (\Gamma'_2 \cdot \Phi'_2 \cdot S'_{d2})^2 + (\Gamma'_3 \cdot \Phi'_3 \cdot S'_{d3})^2 + (\Gamma'_4 \cdot \Phi'_4 \cdot S'_{d4})^2} = \begin{bmatrix} 13.369 \\ 13.707 \\ 13.92 \\ 14.007 \end{bmatrix} \text{ cm}$$

$$\Delta := \begin{bmatrix} X_0 \\ X_1 - X_0 \\ X_2 - X_0 \\ X_3 - X_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 13.369 \\ 0.338 \\ 0.551 \\ 0.638 \end{bmatrix} \text{ cm}$$

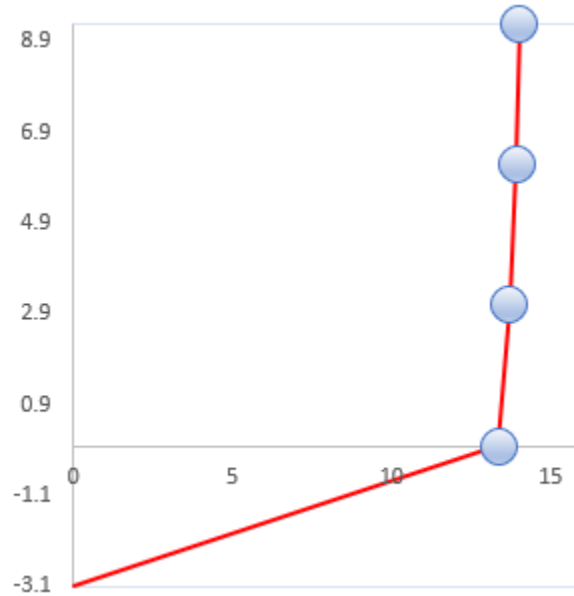


Figura 42. Desplazamientos en el modelo de 4 GDL aislado. Fuente: Propia.

En la Figura 42 se puede observar que la edificación aun cuando se desplaza más de 13 cm lo hace como un conjunto, disminuyéndose los desplazamientos relativos piso a piso. En ese contexto se podría pensar en analizar la superestructura como un bloque o cuerpo rígido que se desplaza sobre el sistema de aislación. Se tiene entonces una aproximación considerando dos GDL, uno que corresponde al sistema de aislamiento y el otro a la superestructura esquematizado en la Figura 43.

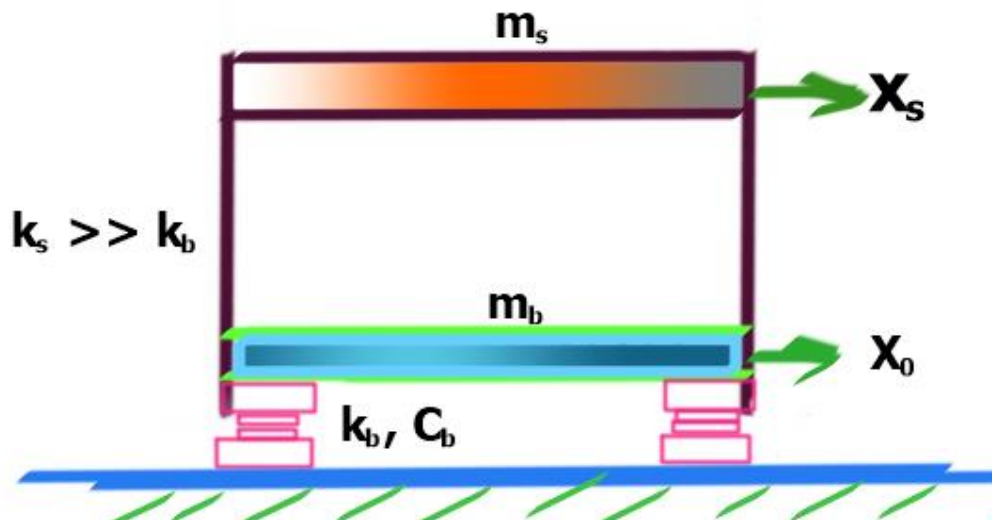


Figura 43. Estructura Base Aislada Modelo 2 GDL. Fuente: Propia.

En términos de desplazamiento absoluto, se tiene:

$$X_{abs} = \begin{bmatrix} x_b + u_g \\ x_s + u_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_b \\ x_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} u_g$$

$$X = \begin{bmatrix} x_b \\ x_s \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$X_{abs} = X + Ju_g$$

$$\ddot{X}_{abs} = \ddot{X} + J\ddot{u}_g$$

De la ecuación general para vibración libre amortiguada,

$$M(\ddot{X}_{abs}) + C\dot{X} + KX = 0$$

$$M(\ddot{X} + J\ddot{u}_g) + C\dot{X} + KX = 0$$

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = -MJ\ddot{u}_g$$

Donde,

$$M = \begin{bmatrix} m_b & 0 \\ 0 & m_s \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} C_b + C_s & -C_s \\ -C_s & C_s \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} K_b + K_s & -K_s \\ -K_s & K_s \end{bmatrix}$$

En términos de desplazamientos relativos, restando el término correspondiente al movimiento del terreno u_g .

$$\Delta_b = (x_b + u_g) - u_g = x_b$$

$$\Delta_s = (x_s + u_g) - u_g - \Delta_b = x_s - \Delta_b \quad \therefore \quad x_s = \Delta_s + \Delta_b$$

$$X = \begin{bmatrix} x_b \\ x_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta_b \\ \Delta_s + \Delta_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_b \\ \Delta_s \end{bmatrix} = A \times \Delta$$

$$\Delta = A^{-1}X = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_b \\ x_s \end{bmatrix}$$

$$J_c = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$M_c = A^T M A = \begin{bmatrix} m_s + m_b & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix}$$

$$C_c = A^T C A = \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix}$$

$$K_c = A^T K A = \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix}$$

$$M_c \ddot{\Delta} + C_c \dot{\Delta} + K_c \Delta = -M_c [J_c \ddot{u}_g]$$

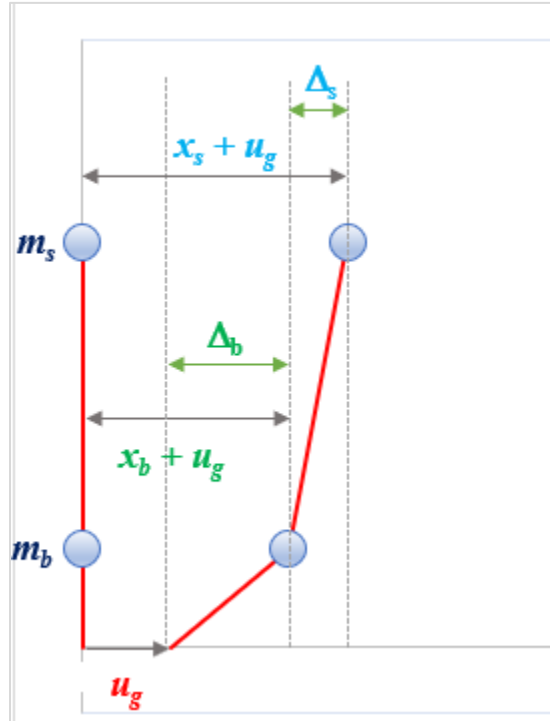


Figura 44. Estructura Base Aislada Modelo 2 GDL – Desplazamientos relativos. Fuente: Propia.

En la Figura 44 se muestran los desplazamientos ocurridos a nivel del suelo, sistema de aislación y superestructura. Ahora, si se normalizan los desplazamientos a los del sistema aislado, como se evidencia en la Figura 45, se tendrá que el primer modo de la estructura aislada está asociado con la deformación del sistema de aislamiento y el mayor porcentaje de participación de masa sísmica, como ocurrió en el desarrollo del modelo de 4 GDL aislado. Mientras que los otros modos superiores hacen referencia a las deformaciones de la superestructura. Estos últimos se excitan poco, la participación de masa sísmica en el segundo modo es mínima, quedando la superestructura con bajas demandas de deformación (pocos desplazamientos), sin embargo, hay que tener presente la posibilidad de aceleraciones considerables.

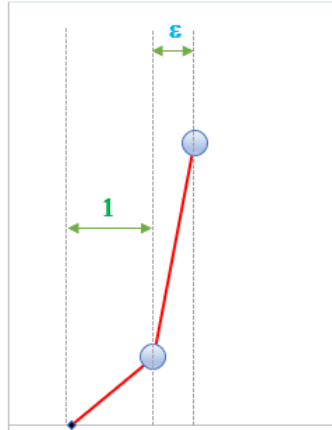


Figura 45. Estructura Base Aislada Modelo 2 GDL – Desplazamientos normalizados. Fuente: Propia.

Los parámetros ε y γ se ilustran en las Figuras 45, 46 y 47, sus valores vienen dados por:

$$\varepsilon = \left(\frac{T_s}{T_b}\right)^2$$

$$\gamma = \frac{m_s}{m_s + m_b}$$

Para que se dé un contraste adecuado de rigideces y ocurra el desacople del segundo modo de la excitación sísmica, se debe cumplir que:

$$T_b \geq 3T_s$$

Por tanto, el valor mínimo de ε será:

$$\varepsilon = \left(\frac{T_s}{3T_s}\right)^2 = \frac{1}{9}$$

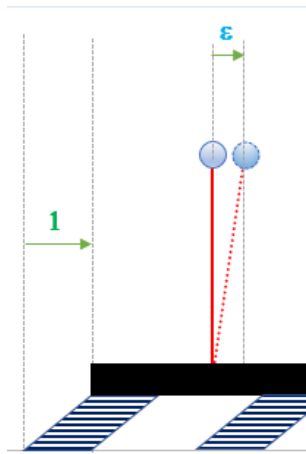


Figura 46. Modo 1 de vibración Estructura Base Aislada Modelo 2 GDL. Fuente: Propia.

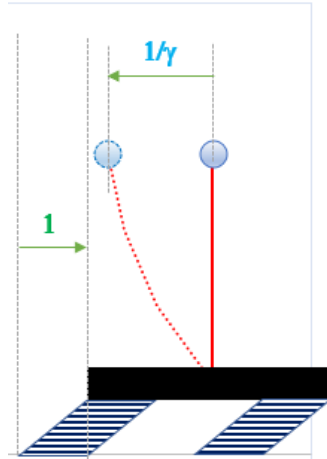


Figura 47. Modo 2 de vibración Estructura Base Aislada Modelo 2 GDL. Fuente: Propia.
 Ahora se considerará el edificio del ejemplo de los 4 grados de libertad, teniendo en cuenta sólo dos grados de libertad, el de la superestructura y el del sistema de aislación.

MODELO 2 GDL BASE AISLADA

Parámetros previos

Periodo de estructura fija

$$T_f := T_1 = 0.396 \text{ s}$$

Periodo efectivo del sistema de aislamiento $T_b \geq 3 T_s$

$$T_b := 2 \text{ s}$$

$$\frac{T_b}{T_f} = 5.051$$

$$k_b := \frac{4 \cdot \pi^2}{T_b^2} \cdot \left(\frac{W_t}{g} \right) = 2509.004 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\beta_b := 20\%$$

$$m_b = (7.444 \cdot 10^4) \text{ kg}$$

$$W_b := 730 \text{ kN}$$

$$m_b := \frac{W_b}{g} = 74.439 \text{ kN} \cdot \frac{\text{s}^2}{\text{m}}$$

$$W_s := W_1 + W_2 + W_3$$

$$W_t := W_s + W_b = 2493 \text{ kN}$$

$$M_s := m_1 + m_2 + m_3$$

$$M_s = 179.776 \text{ kN} \cdot \frac{\text{s}^2}{\text{m}}$$

$$M_t := M_s + m_b = 254.215 \text{ kN} \cdot \frac{\text{s}^2}{\text{m}}$$

$$\gamma := \frac{M_s}{M_t} = 0.707$$

$$\varepsilon := \left(\frac{T_f}{T_b} \right)^2 = 0.039$$

Primer modo de vibración

$$T_1 := T_b \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \varepsilon \cdot \gamma}} = 2.028 \text{ s}$$

$$S_{a1} := 0.204$$

$$\xi_1 := \beta_b \cdot \left(1 - \frac{3}{2} \cdot \gamma \cdot \varepsilon \right) = 19.2\%$$

$$B_1 := \left(\frac{\xi_1}{5\%} \right)^{0.3} = 1.497$$

Segundo modo de vibración

$$T_2 := T_f \cdot \sqrt{\frac{1 - \gamma}{1 + \gamma \cdot \varepsilon}} = 0.211 \text{ s}$$

$$S_{a2} := 0.675$$

$$\xi_2 := \frac{\left(5\% + \gamma \cdot \varepsilon^{\frac{1}{2}} \cdot \beta_b \right)}{\sqrt{1 - \gamma}} \cdot \left(1 - \frac{\gamma \cdot \varepsilon}{2} \right) = 14.2\%$$

$$B_2 := \left(\frac{\xi_2}{5\%} \right)^{0.3} = 1.368$$

Respuesta modal espectral máxima

$$S_{d1} := \left(\frac{S_{a1} \cdot g}{B_1} \right) \cdot \left(\frac{T_1}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 13.931 \text{ cm}$$

$$S_{d2} := \left(\frac{S_{a2} \cdot g}{B_2} \right) \cdot \left(\frac{T_2}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 0.548 \text{ cm}$$

Deformación máxima del edificio respecto a su base (SRSS)

$$d_{sM} := \varepsilon \cdot \sqrt{(1 - \gamma \cdot \varepsilon)^2 \cdot S_{d1}^2 + (1 - (1 - \gamma) \cdot \varepsilon)^2 \cdot S_{d2}^2} = 0.531 \text{ cm}$$

Deformación máxima del sistema de aislamiento (SRSS)

$$D_{bM} := \sqrt{(1 - \gamma \cdot \varepsilon)^2 \cdot S_{d1}^2 + (\gamma \cdot \varepsilon)^2 \cdot S_{d2}^2} = 13.545 \text{ cm}$$

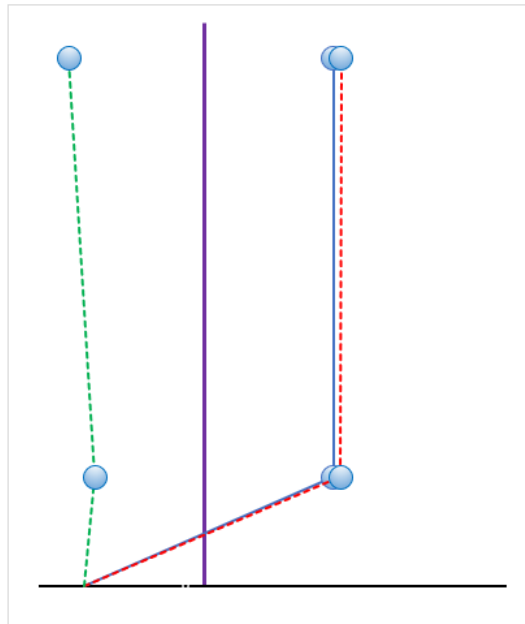


Figura 48. Desplazamientos Modales y Global Estructura Base Aislada Modelo 2 GDL. Fuente: Propia.

De los cálculos y la Figura 48, se observan resultados muy similares a los obtenidos con el modelo de 4 grados de libertad aislado. Los valores de amortiguamiento para los modos de vibración resultan ser, para el modo 1 muy aproximado al amortiguamiento del sistema de aislamiento, por tanto, es común tomar $\xi_1 = \xi_b$, y para el modo 2, el amortiguamiento es menor al del sistema aislado pero mayor al de la superestructura y se puede entonces considerar que $\xi_2 = \xi_s = 5\%$.

4.1.2 Metodologías de Diseño Sistemas de Aislación

Diagramas de flujo del proceso general de diseño del sistema de aislamiento y cálculos de parámetros para el diseño de la superestructura, así como los procedimientos puntuales para cada tipo de aislador se pueden ver en el Anexo 2. Diagramas de Flujo Metodológicos Diseño de Aisladores (Figuras 265 a la 270). En las siguientes secciones se realizará el detallado de cálculo siguiendo los pasos antes mencionados en dichos diagramas.

Predimensionamiento de la Edificación Aislada.

Información de entrada.

Edificio Regular en planta y altura. 5 ejes en dirección de cada eje principal con separación de 6 metros.

Número de pisos: 6.

Sistema Estructural: Pórticos en Concreto Reforzado con Capacidad Moderada de Disipación de Energía.

Resistencias de Materiales: Concreto $f'c = 28$ MPa, Acero de Refuerzo $f_y = 420$ MPa.

Predimensionamiento de Columnas: 50 cm x 50 cm.

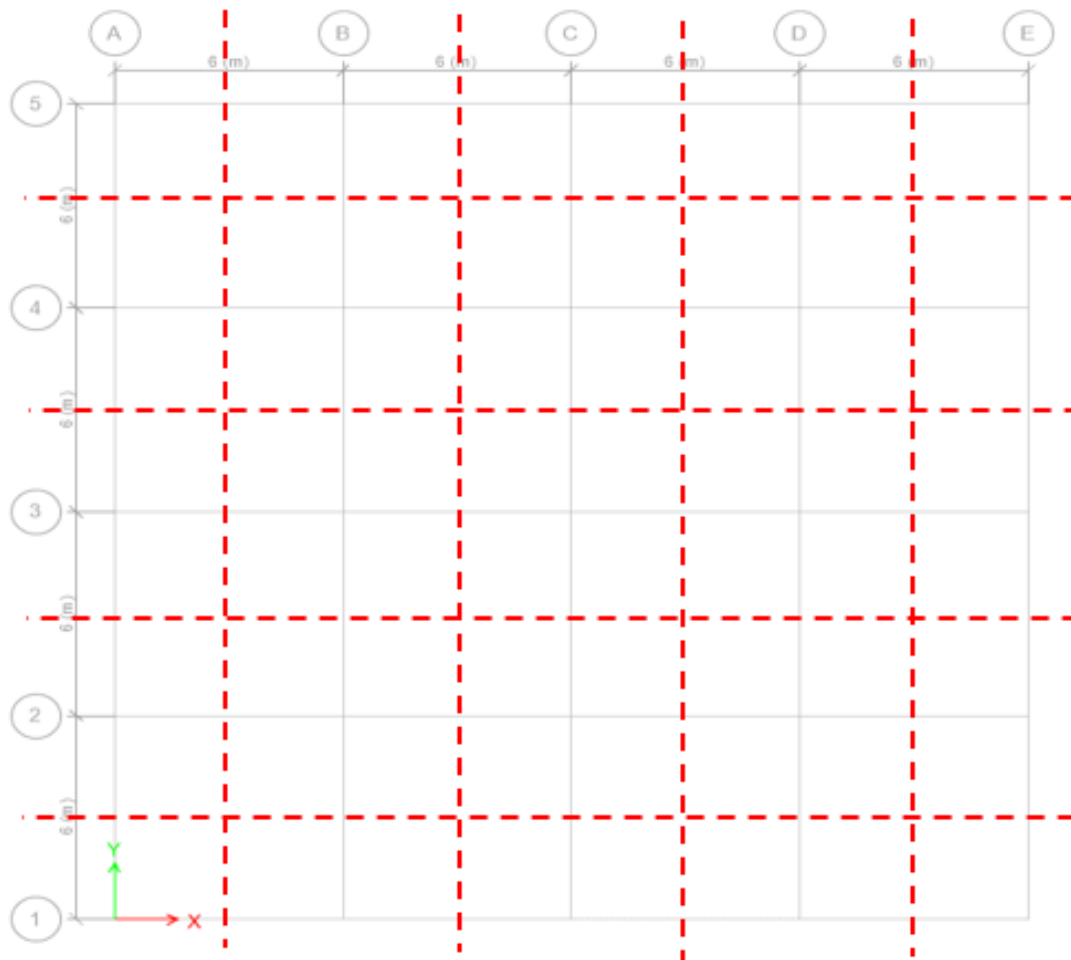


Figura 49. Edificación en base fija Vista en Planta Localización ejes estructurales. Fuente: Propia.

Predimensionamiento Columnas	
Area Aferente	36 m ²
Ancho aferente	6 m
Longitud anferente	6 m
Pesos	
W	1 ton/m ²
w piso	36 ton
n	6 pisos
W total pisos	216 ton
f'c	280 kgf/cm ²
40% f'c	112 kgf/cm ²
A col	1928.57 cm ²
Predimensionamiento Colu	43.9155 cm
Sin Columna Cuadrada	50 cm x 50 cm

Figura 50. Predimensionamiento Columnas. Fuente: Propia.

Predimensionamiento de Vigas: 40 cm x 50 cm. Siguiendo los requisitos geométricos de (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA , 2017) capítulo C.21.3.4.

Entrepiso: Losa Aligerada en dos direcciones.

Microzonificación: Piedemonte C.

Grupo de Uso: Ocupación normal, I = 1.

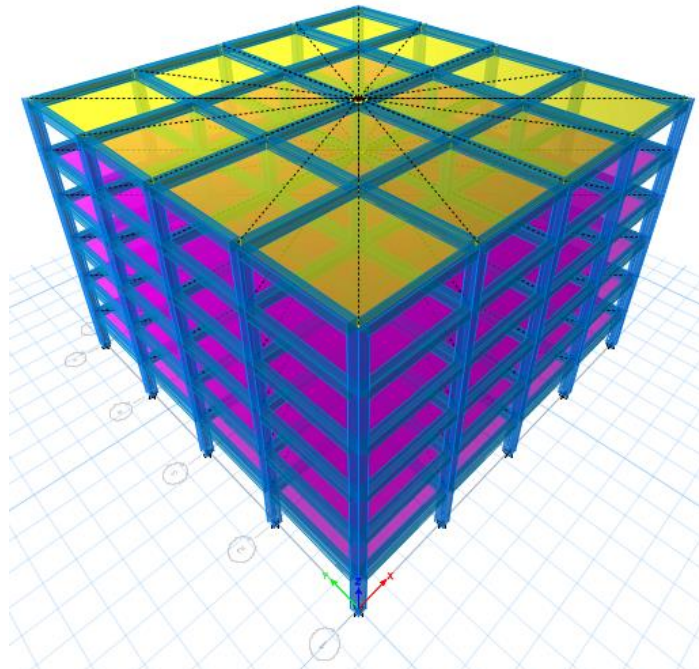


Figura 51. Edificación en base fija Modelo Matemático. Fuente: Propia.

Avalúo de cargas.

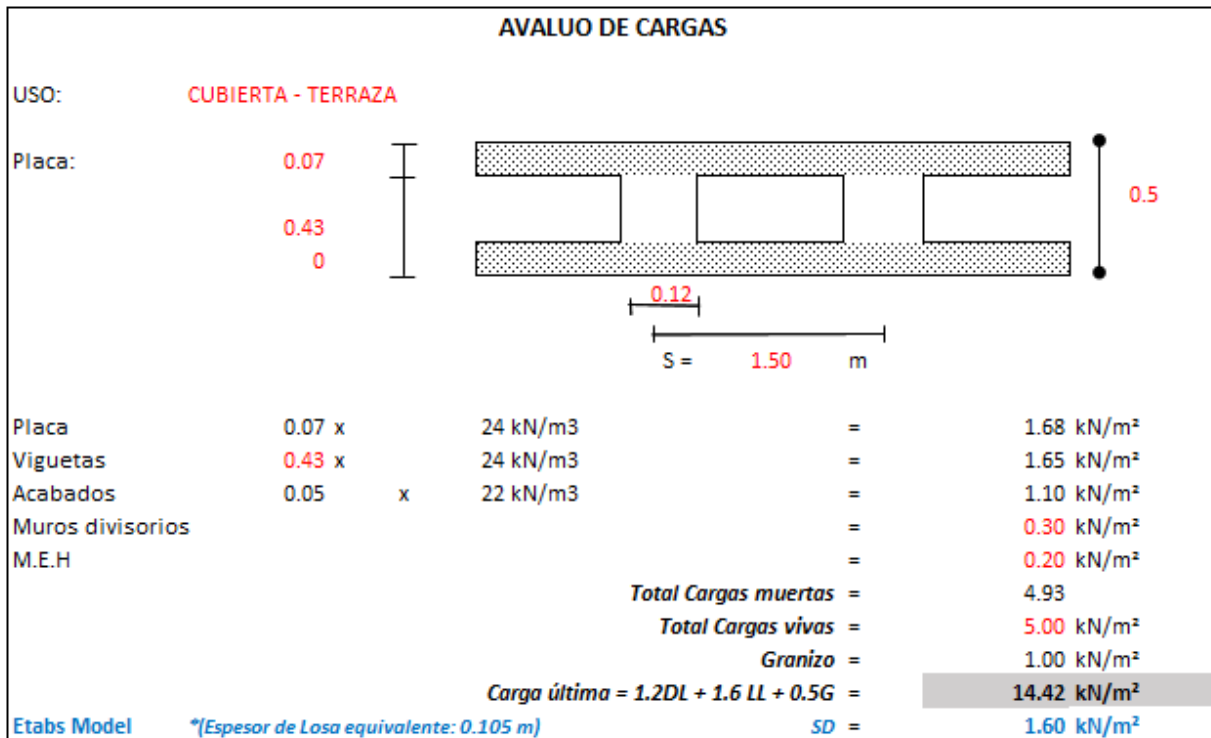
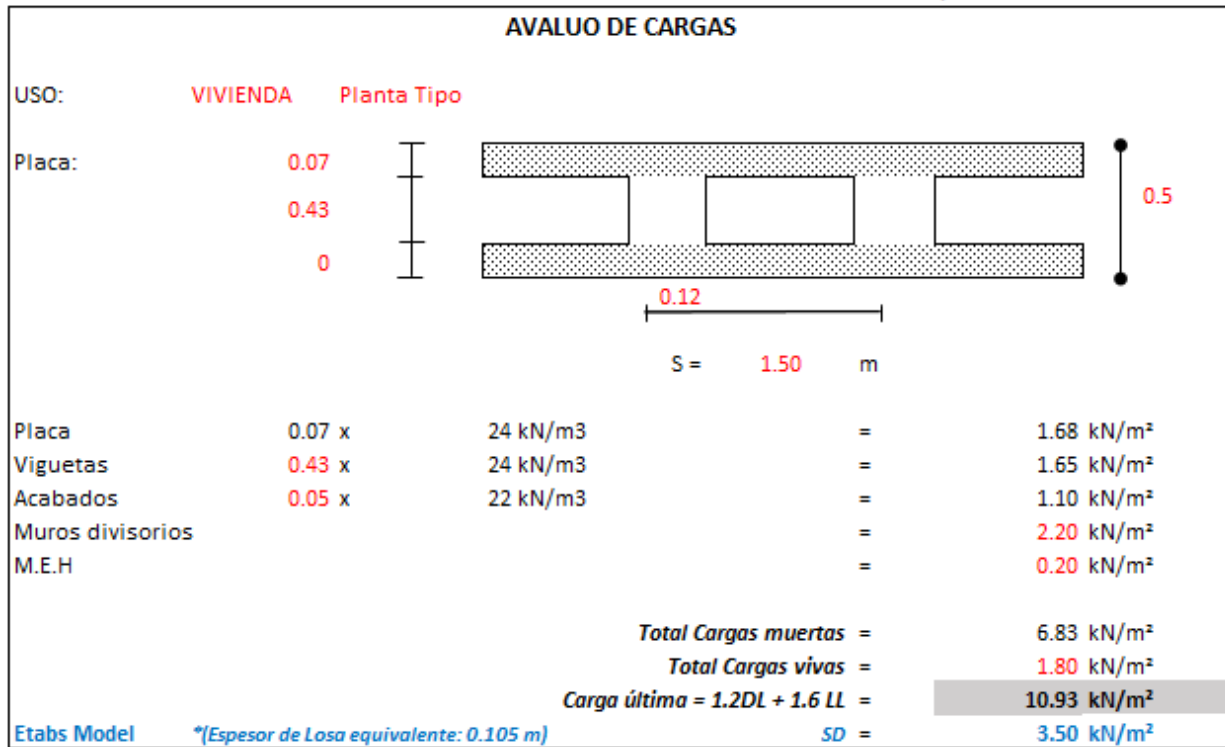


Figura 52. Avalúo de cargas y dimensionamiento placa en dos direcciones. Fuente: Propia.

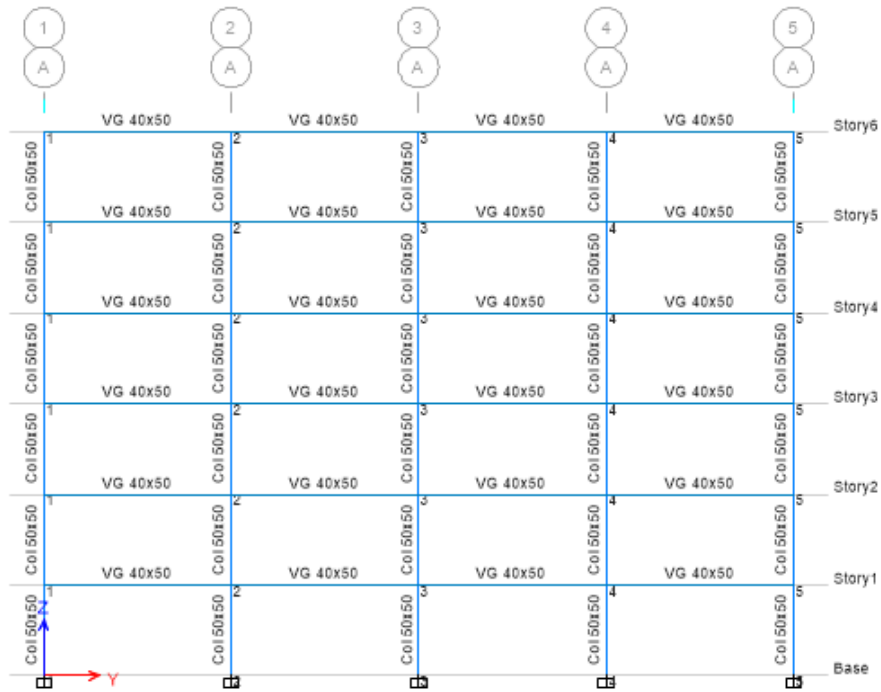


Figura 53. Elevación Edificación en base fija Modelo Matemático. Fuente: Propia.

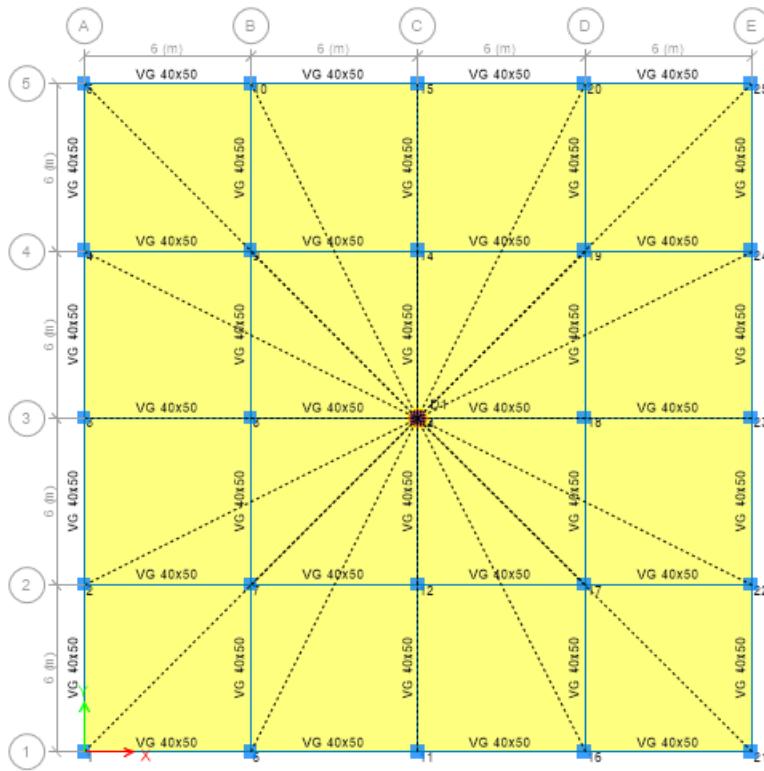


Figura 54. Planta Edificación en base fija Modelo Matemático. Fuente: Propia

Geometría de la edificación:

Dimensión mayor: 24 m.

Dimensión menor: 24 m.

Altura Total: 17.4 m.

Propiedades del edificio en base fija.

Case	Mode	Period sec	UX	UY	UZ	Sum UX	Sum UY	Sum UZ	RX	RY	RZ	Sum RX	Sum RY	Sum RZ
Modal RITZ	1	0.938	0.0%	81.8%	0.0%	0.0%	81.8%	0.0%	5.6%	0.0%	0.0%	5.6%	0.0%	0.0%
Modal RITZ	2	0.938	81.8%	0.0%	0.0%	81.8%	81.8%	0.0%	0.0%	5.6%	0.0%	5.6%	5.6%	0.0%
Modal RITZ	3	0.823	0.0%	0.0%	0.0%	81.8%	81.8%	0.0%	0.0%	0.0%	82.0%	5.6%	5.6%	82.0%
Modal RITZ	4	0.297	0.0%	10.3%	0.0%	81.8%	92.2%	0.0%	18.2%	0.0%	0.0%	23.8%	5.6%	82.0%
Modal RITZ	5	0.297	10.3%	0.0%	0.0%	92.2%	92.2%	0.0%	0.0%	18.2%	0.0%	23.8%	23.8%	82.0%
Modal RITZ	6	0.261	0.0%	0.0%	0.0%	92.2%	92.2%	0.0%	0.0%	0.0%	10.2%	23.8%	23.8%	92.3%
Modal RITZ	7	0.164	0.0%	4.3%	0.0%	92.2%	96.5%	0.0%	2.2%	0.0%	0.0%	26.0%	23.8%	92.3%
Modal RITZ	8	0.164	4.3%	0.0%	0.0%	96.5%	96.5%	0.0%	0.0%	2.2%	0.0%	26.0%	26.0%	92.3%
Modal RITZ	9	0.145	0.0%	0.0%	0.0%	96.5%	96.5%	0.0%	0.0%	0.0%	4.3%	26.0%	26.0%	96.5%
Modal RITZ	10	0.097	0.0%	3.4%	0.0%	96.5%	99.9%	0.0%	4.0%	0.0%	0.0%	30.0%	26.0%	96.5%
Modal RITZ	11	0.097	3.4%	0.0%	0.0%	99.9%	99.9%	0.0%	0.0%	4.0%	0.0%	30.0%	30.0%	96.5%
Modal RITZ	12	0.086	0.0%	0.0%	0.0%	99.9%	99.9%	0.0%	0.0%	0.0%	3.3%	30.0%	30.0%	99.9%

*Tabla 7. Modos de Vibración y Porcentajes de Participación de Masas.
Fuente: Propia con Análisis en ETABS.*

Story	Diaphragm	Mass X tonf-s ² /m	Mass Y tonf-s ² /m	XCM m	YCM m	Cumulative X tonf-s ² /m	Cumulative Y tonf-s ² /m	XCCM M	YCCM m	XCR m	YCR m
Story6	D6	37.40	37.40	12.00	12.00	37.40	37.40	12.00	12.00	12.00	12.00
Story5	D5	51.00	51.00	12.00	12.00	88.41	88.41	12.00	12.00	12.00	12.00
Story4	D4	51.00	51.00	12.00	12.00	139.41	139.41	12.00	12.00	12.00	12.00
Story3	D3	51.00	51.00	12.00	12.00	190.41	190.41	12.00	12.00	12.00	12.00
Story2	D2	51.00	51.00	12.00	12.00	241.41	241.41	12.00	12.00	12.00	12.00
Story1	D1	51.00	51.00	12.00	12.00	292.42	292.42	12.00	12.00	12.00	12.00

Tabla 8. Centros de Masas y Rigideces por Piso. Fuente: Propia con Análisis en ETABS.

Masa Part. UX	Masa Part. UY	Masa Part. RZ	T (s)	Modo
0.0%	81.8%	0.0%	0.938	1
81.8%	0.0%	0.0%	0.938	2
0.0%	0.0%	82.0%	0.823	3
0.0%	10.3%	0.0%	0.297	4
10.3%	0.0%	0.0%	0.297	5
0.0%	0.0%	10.2%	0.261	6
0.0%	4.3%	0.0%	0.164	7
4.3%	0.0%	0.0%	0.164	8
0.0%	0.0%	4.3%	0.145	9
0.0%	3.4%	0.0%	0.097	10
3.4%	0.0%	0.0%	0.097	11
0.0%	0.0%	3.3%	0.086	12

Tabla 9. Periodos y Porcentaje de Participación de Masas. Fuente: Propia con Análisis en ETABS.

Con la información previa, determinamos los siguientes parámetros, para la edificación con Base Fija.

Periodos Fundamentales: Base Fija

T_{BfX}	0.938 s	81.8% Muy	1° Modo
T_{BfY}	0.938 s	81.8% MUx	2° Modo
T_{BfZ}	0.823 s	82% MRz	3° Modo

Periodos Fundamentales: Base Fija - Límites NSR-10

Cu:	1.342
Ct:	0.047
α :	0.9

Límite Inferior

Período de vibración fundamental aproximado (T_a): 0.615 s

Límite superior

$C_u * T_a$ 0.825 s

Periodos Fundamentales: Base Fija

T_{BfX}	0.938 s	1° Modo
T_{BfY}	0.938 s	2° Modo
T_{BfZ}	0.823 s	3° Modo

Peso del Edificio

N° pisos	6	
N° dispositivos	25	
M	343.42 tf-s ² /m	Masa total (con losa de aislamiento)
M _S	292.42 tf-s ² /m	Masa de la superestructura
M _B	51.00 tf-s ² /m	

En el Prediseño, para el cálculo de la Masa Total (M), se toma la Masa correspondiente a la placa y todo el Sistema de Aislamiento (M_B) como si fuese un piso adicional, con referencia al valor máximo presente en los pisos de la superestructura.

Edificio con Base Aislada.

Periodo Objetivo: Se tomará como mínimo 3 segundos, que corresponde a más de 3 veces el valor del Periodo de la Estructura con Base Fija.

Base Aislada

Periodo Objetivo

T _{obj}	3.00 s	Corresponde a T _{AI} S
------------------	--------	---------------------------------

Amortiguamiento Objetivo:

β _{obj}	15%	Asumido
B _M	1.38	Interpolado de la Tabla 5.

Asumimos que la Masa total se mueve en el primer modo

Rigidez del Sistema de Aislamiento

$$K_{AIS} = K_b = 1506.40 \text{ tf/m}$$

$$K_{AIS} = \omega^2 M = \frac{4\pi^2}{T_{AIS}^2} M$$

Ecuación 18. Rigidez del sistema de aislación

$$K_{ef} = 60.26 \text{ tf/m} \quad \text{Rigidez promedio}$$

$$K_{ef} = \frac{K_{AIS}}{N^\circ \text{ Dispositivos}}$$

Ecuación 19. Rigidez promedio de cada aislador

Para el primer modo de vibración, como se está tomando el sistema como un cuerpo rígido, el periodo va a corresponder al del sistema de aislamiento y de igual manera ocurre con la rigidez.

Aunque se sabe que el procedimiento de la ASCE 7-16 y las provisiones establecidas para la técnica de inclusión del aislamiento de base en edificaciones presentan inconsistencias con lo establecido en la NSR – 10, señaladas detalladamente en (Piscal Arévalo & López Almansa, 2018); se planteará un procedimiento ante la ausencia de un procedimiento reglamentado en Colombia, siguiendo lineamientos de las normas ya aprobadas en países como Perú y Chile.

El valor de la pseudoaceleración espectral como función de la gravedad, se determina a partir del espectro de diseño para el sismo máximo de la Figura 55, que corresponde a 1.5 veces el espectro elástico de diseño de la NSR – 10, para el valor del periodo del sistema de aislamiento.

Microzona Piedemonte C.

$$S_{aM} \quad 0.204 \text{ g} \quad \text{Para } T_{AIS} = 3 \text{ s}$$

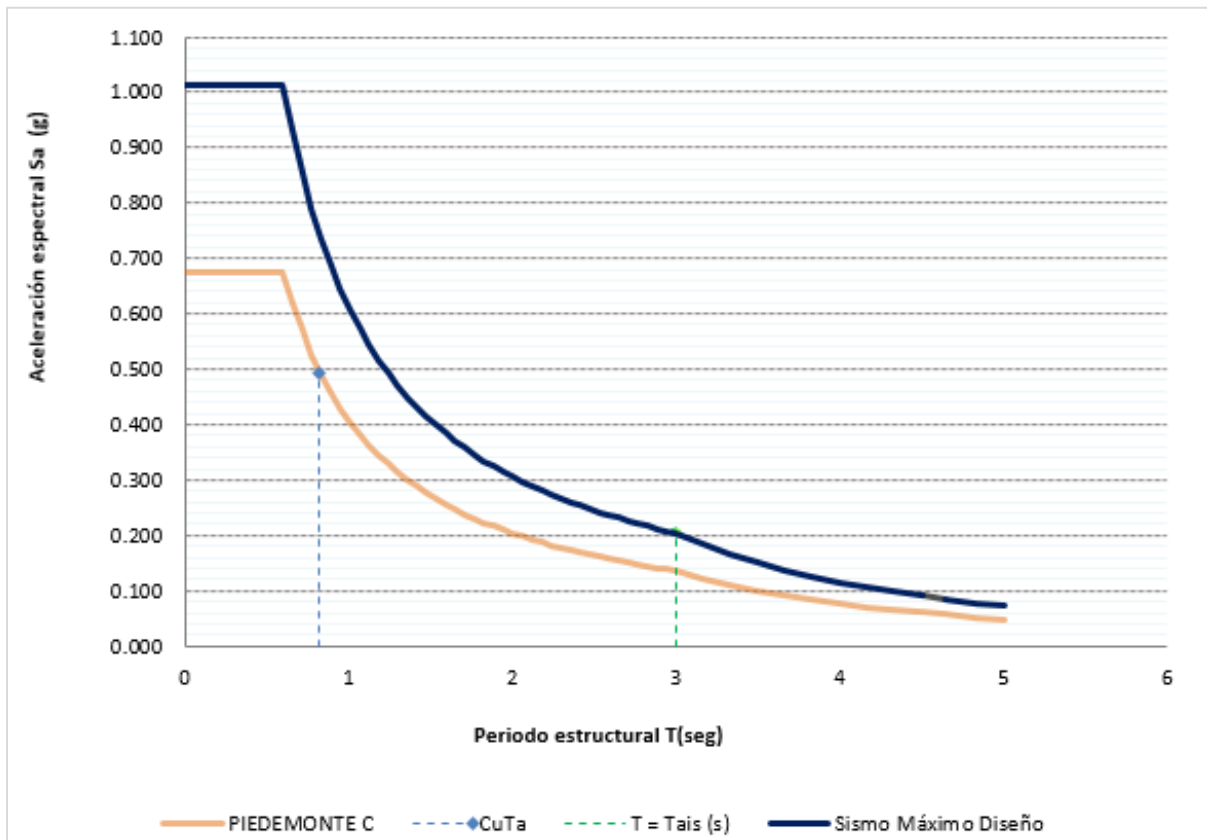


Figura 55. Espectros Elástico de Diseño y Sismo Máximo Piedemonte C en fracción de g, determinación de S_{aM} . Fuente: Propia.

Se calcula entonces según la Ecuación 20, el desplazamiento lateral máximo

$$D_M = \frac{S_{aM} g (T_{Ais})^2}{4\pi^2 B_M}$$

Ecuación 20. Desplazamiento máximo para FHE

D_M 33.04 cm Traslacional

D_{TM} 38.00 cm Para predimensionar (Incluye efectos Traslacionales y Torsionales) $D_{TM} = 1.15D_M$

Siguiendo el proceso de predimensionamiento, se usarán las combinaciones:

$P_{servicio} = D + 0.5L$... Para prediseño de los dispositivos.

$P_{m\acute{a}x.} = 1.25(D+L) + 1.0(E_H + E_V) + 0.2G$ Análisis de Estabilidad Dispositivos

$P_{m\acute{i}n.} = 0.9D - 1.0(E_H + E_V)$... Evitar tracciones en los dispositivos

Del modelado preliminar de la estructura con el valor de la rigidez efectiva promedio por aislador, el espectro correspondiente al sismo máximo y las combinaciones antes mencionadas, se obtienen los siguientes resultados para el modelo aislado.

Se realiza el balance torsional, aunque la estructura es regular para comprobar que no existe excentricidad natural.

Story	Joint Label	Unique Name	Load Case/Combo	FZ	X	Y	Keff	P*X	P*Y	Keff*X	Keff*Y
				tonf	m	m	tonf/m	tonf*m	tonf*m	Tonf	tonf
Base	1	56	Pservicio=D+0.5L	82.79	0.00	0.00	60.26	0.00	0.00	0.00	0.00
Base	2	212	Pservicio=D+0.5L	133.50	0.00	6.00	60.26	0.00	800.98	0.00	361.54
Base	3	217	Pservicio=D+0.5L	137.18	0.00	12.00	60.26	0.00	1646.18	0.00	723.07
Base	4	222	Pservicio=D+0.5L	133.50	0.00	18.00	60.26	0.00	2402.95	0.00	1084.61
Base	5	227	Pservicio=D+0.5L	82.79	0.00	24.00	60.26	0.00	1986.95	0.00	1446.15
Base	6	63	Pservicio=D+0.5L	133.50	6.00	0.00	60.26	800.98	0.00	361.54	0.00
Base	7	213	Pservicio=D+0.5L	220.27	6.00	6.00	60.26	1321.63	1321.63	361.54	361.54
Base	8	218	Pservicio=D+0.5L	226.19	6.00	12.00	60.26	1357.16	2714.33	361.54	723.07
Base	9	223	Pservicio=D+0.5L	220.27	6.00	18.00	60.26	1321.63	3964.90	361.54	1084.61
Base	10	228	Pservicio=D+0.5L	133.50	6.00	24.00	60.26	800.98	3203.93	361.54	1446.15
Base	11	70	Pservicio=D+0.5L	137.18	12.00	0.00	60.26	1646.18	0.00	723.07	0.00
Base	12	214	Pservicio=D+0.5L	226.19	12.00	6.00	60.26	2714.33	1357.16	723.07	361.54
Base	13	219	Pservicio=D+0.5L	232.39	12.00	12.00	60.26	2788.73	2788.73	723.07	723.07
Base	14	224	Pservicio=D+0.5L	226.19	12.00	18.00	60.26	2714.33	4071.49	723.07	1084.61
Base	15	229	Pservicio=D+0.5L	137.18	12.00	24.00	60.26	1646.18	3292.35	723.07	1446.15
Base	16	77	Pservicio=D+0.5L	133.50	18.00	0.00	60.26	2402.95	0.00	1084.61	0.00
Base	17	215	Pservicio=D+0.5L	220.27	18.00	6.00	60.26	3964.90	1321.63	1084.61	361.54
Base	18	220	Pservicio=D+0.5L	226.19	18.00	12.00	60.26	4071.49	2714.33	1084.61	723.07
Base	19	225	Pservicio=D+0.5L	220.27	18.00	18.00	60.26	3964.90	3964.90	1084.61	1084.61

Story	Joint Label	Unique Name	Load Case/Combo	FZ	X	Y	Keff	P*X	P*Y	Keff*X	Keff*Y
				tonf	m	m	tonf/m	tonf*m	tonf*m	Tonf	tonf
Base	20	230	Pservicio=D+0.5L	133.50	18.00	24.00	60.26	2402.95	3203.93	1084.61	1446.15
Base	21	84	Pservicio=D+0.5L	82.79	24.00	0.00	60.26	1986.95	0.00	1446.15	0.00
Base	22	216	Pservicio=D+0.5L	133.50	24.00	6.00	60.26	3203.93	800.98	1446.15	361.54
Base	23	221	Pservicio=D+0.5L	137.18	24.00	12.00	60.26	3292.35	1646.18	1446.15	723.07
Base	24	226	Pservicio=D+0.5L	133.50	24.00	18.00	60.26	3203.93	2402.95	1446.15	1084.61
Base	25	231	Pservicio=D+0.5L	82.79	24.00	24.00	60.26	1986.95	1986.95	1446.15	1446.15
			Σ	3966.12			1506.40	47593.43	47593.43	18076.86	18076.86

Tabla 10. Carga axial en los nodos de la base debido a la combinación Pservicio (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia con Análisis en ETABS.

XCM	YCM	XCR	YCR
12	12	12	12
Excentricidad Natural		Se controla con la ubicación de los dispositivos	
e_x	0	m	
e_y	0	m	
Excentricidad Accidental		Reglamento NSR - 10	
e_x (5%)	1.2	m	
e_y (5%)	1.2	m	
Excentricidad Total			
e_x total	1.2	m	
e_y total	1.2	m	

Tabla 11. Centros de Masa y Rigidez - Cálculo de excentricidades (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia con Análisis en ETABS.

Los valores de la Tabla 10 para x e y, fueron tomados de las coordenadas en planta de los joints presentadas en la Figura 56.

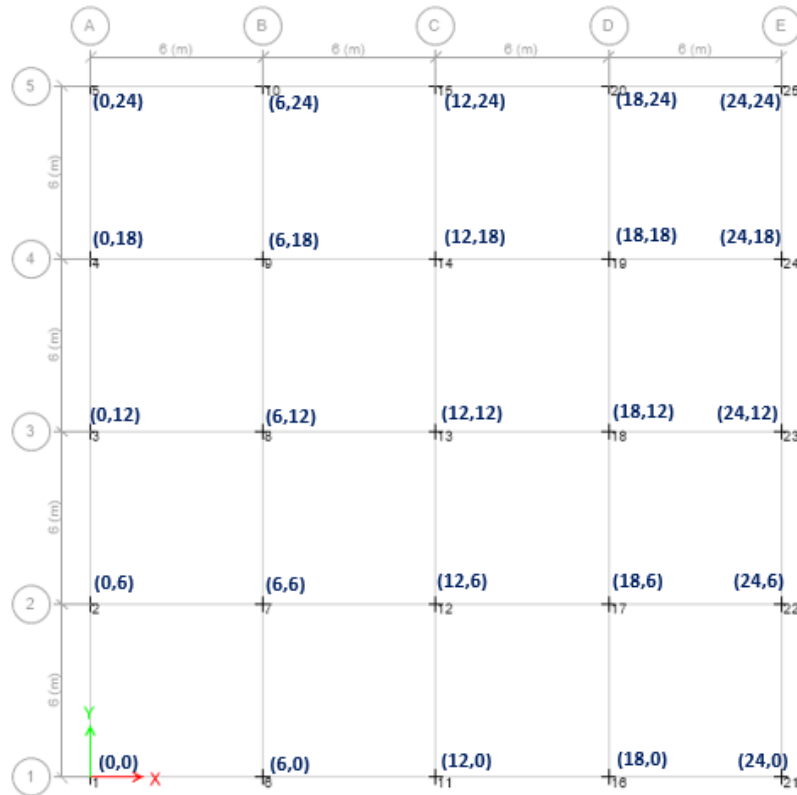


Figura 56. Localización Joints en planta. Fuente: Propia.

Del análisis se obtuvieron los siguientes valores para cargas axiales en los nodos ubicados en las esquinas, borde e interior para las combinaciones $P_{serv.}$, $P_{máx.}$ y $P_{mín.}$

	Interior	Borde	Esquina
P_{serv}	232.4	137.2	82.8
$P_{máx}$	396.7	259.2	173.2
$P_{mín}$	107.9	39.7	7.9

Tabla 12. Valores de cargas axiales para diseño de Aisladores (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia con Análisis en ETABS.

Como se evidencia el menor valor de la combinación $P_{mín}$ fue de 7.9 tonf de compresión, por tanto, no se presentan tracciones en los aisladores en el modelo del edificio con estos dispositivos.

A continuación, se muestra el cálculo de parámetros adicionales para el diseño de la superestructura y del sistema de aislamiento.

Rigidez elástica edificación fija

$$K_{sx} = 13120.66 \text{ tonf/m}$$

$$K_{sy} = 13120.66 \text{ tonf/m}$$

$$K_s = \left(\frac{2\pi}{T_{Bf}} \right)^2 M_s$$

Ecuación 21. Cálculo Rigidez Edificación Fija

Por tanto, se tiene un contraste de rigideces entre la edificación fija y la aislada de 8.7, lo que asegurará un comportamiento como un sistema de 1 grado de libertad desacoplado.

Fuerza sísmica lateral del sistema de aislamiento (Cortante sistema de aislamiento).

$$V_b = K_{Ais} \times D_M$$

Ecuación 22. Cálculo Cortante Sistema de Aislamiento

$$V_b = 497.77 \text{ tonf}$$

Que corresponde aproximadamente a un 14.8% del peso total de la edificación.

Fuerza cortante no reducida de la superestructura

$$V_{st} = 450.18 \text{ tonf}$$

$$V_{st} = V_b \times \left(\frac{M_s}{M_T} \right)^{1-2.5\beta_M}$$

Ecuación 23. Cálculo Fuerza Cortante No Reducida Superestructura

Valor del coeficiente de reducción

$$R_0 = 5.00$$

$$R_a = 1.88$$

$$R_a = \left(\frac{3}{8} \right) R_0 \quad 1 \leq R_a \leq 2$$

Ecuación 24. Cálculo del factor de reducción

Fuerza cortante reducida de la superestructura

$$V_s = 240.10 \text{ tonf}$$

$$V_s = \frac{V_{st}}{R_a}$$

Ecuación 25. Cálculo de la fuerza cortante reducida de la superestructura

Cortante Base Fija

$$V_f = 117.04 \text{ tonf}$$

$$V_f = \frac{S_{aM} \times g \times M_s}{R}$$

Ecuación 26. Cálculo de la fuerza cortante reducida base fija

Diseño del Aislador Tipo LRB.

Para las cargas de servicio y máxima con los valores más altos correspondientes a las de los nodos de columnas interiores se diseña el primer tipo de aislador. Se escoge un aislador circular porque tiene las mismas propiedades en todas las direcciones.

Aislador LRB - 1

Demandas

Pserv. 232.4 tonf

Pmáx. 396.7 tonf

Propiedades Materiales

τ_{py} 800 tonf/m² Esfuerzo de fluencia del Plomo

K 200000 tonf/m² Módulo volumétrico de la goma

G 50 tonf/m² Módulo de Corte de la Goma

σ_{adm} 1000 tonf/m² Esfuerzo axial permisible del Aislador (aproximado, fabricante)

F 4 Proveedor, valor recomendado

K 0.75 Depende de G (Valores de referencia 0.65 - 0.9)

E₀ 200 tonf/m² E₀ = fG Módulo elástico de la goma

E_c 131372.5 tonf/m² E_c = E₀(1 + 2kS²) Módulo de compresión del aislador

Características de los aisladores

Espesor de lámina

t_r 0.8 cm

Cantidad de láminas y espesor de la goma

N 30 un

T_r 24 cm

Recubrimiento

C_s 1.5 cm

Cálculo del diámetro mínimo del aislador

$D_0 > 1.5D_{TM} = 57cm$

$$A > \frac{P_{serv}}{\sigma_{m\acute{a}x}} = 0.232m^2$$

$$D_0 > \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = 0.544m \approx 54.4cm$$

Se asume un diámetro de 72 cm luego de realizar iteraciones para cumplir los requerimientos en cuanto a cargas axiales y deformaciones por corte.

$$D_0 = 72 \text{ cm}$$

Diámetro del núcleo de plomo

Se debe cumplir que: $\frac{D_0}{6} < D_i < \frac{D_0}{3}$

$$\frac{72cm}{6} < D_i < \frac{72cm}{3}$$

$$12cm < D_i < 24cm$$

Se escogió como diámetro del núcleo de plomo $D_i = 12 \text{ cm}$.

Se establece el valor del recubrimiento C_s de 1.5 cm para la protección de las placas de acero de los efectos ambientales. El diámetro efectivo del aislador será entonces:

$$D_e = D_0 - 2C_s = 72 \text{ cm} - 3 \text{ cm} = 69 \text{ cm}.$$

Ahora se calculan las diferentes áreas necesarias para hallar los demás parámetros.

$A_a = 0.4072 \text{ m}^2$	<p>Área del aislador (A_a): Área transversal del aislador, se calcula con base en el diámetro D_0.</p> $A_a = \frac{\pi}{4}(D_0)^2$
$A_n = 0.3626 \text{ m}^2$	<p>Área neta (A_n): Considera el área transversal que corresponde a la goma, es decir el diámetro sin considerar el núcleo de plomo ni el recubrimiento.</p> $A_n = A_e - A_p$
$A_g = 0.3958 \text{ m}^2$	<p>Área goma (A_g): Considera el área transversal de la goma del aislador, tomando el diámetro sin considerar el núcleo de plomo. Equivale al área total menos el área del núcleo de plomo.</p> $A_g = A_a - A_p$
$A_p = 0.0113 \text{ m}^2$	<p>Área del núcleo de plomo (A_p): Área transversal correspondiente al núcleo de plomo.</p> $A_p = \frac{\pi}{4}(D_i)^2$

$A_e = 0.3739 \quad \text{m}^2$	<p>Área efectiva aislador (A_e): Área transversal correspondiente al diámetro efectivo del aislador (sin recubrimiento).</p> $A_e = \frac{\pi}{4}(D_e)^2$
---------------------------------	--

*Tabla 13. Áreas paramétricas del aislador LRB (Microzona Piedemonte C).
Fuente: Propia.*

Cuando el aislador se deforma y alcanza el desplazamiento máximo total, el área de la goma que resiste la carga axial máxima se ve reducida como se muestra a continuación.

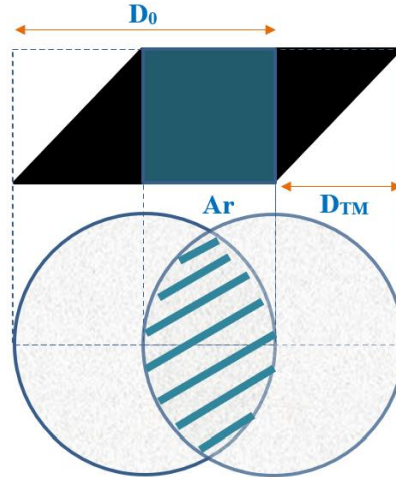


Figura 57. Representación gráfica Área Reducida Aislador LRB. Fuente: Propia.

$$A_R = A_a \times 2 \times \frac{\left[D_e^2 \arcsen \left(\frac{\sqrt{D_e^2 - D_{TM}^2}}{D_e} \right) - D_{TM} \sqrt{D_e^2 - D_{TM}^2} \right]}{\pi D_e^2}$$

Ecuación 27. Área Reducida Aislador Circular LRB.

$$A_R = 0.1368 \quad \text{m}^2$$

Que representa una reducción de

$$\frac{A_R(\Delta)}{A_g} = 34.6\%$$

Para esa área reducida el aislador puede soportar una carga crítica de pandeo de:

$$P_{cr} = \frac{\pi}{\sqrt{8}} \times S \times G \times \frac{D_e}{T_r} \times A_R$$

Ecuación 28. Carga crítica de pandeo para Aislador Circular LRB.

Donde,

$$P_{m\acute{a}x} \leq \frac{P_{cr}}{FS}$$

$$S = \frac{\text{Área cargada}}{\text{Área libre de carga}} = \frac{A_n}{\pi D_e t_r}$$

Ecuación 29. Factor de Forma S: Relación de Áreas cargada vs. no cargada para Aislador Circular LRB.

$$S = 20.91$$

$$P_{\text{crit.}} = 456.81 \text{ tonf}$$

Se calcula el factor de seguridad.

$$FS = \frac{P_{cr}}{P_{\text{máx}}} = 1.15$$

El cual es mayor que el factor de seguridad recomendado de 1.1.

Se comprobarán ahora las deformaciones por corte:

Deformación por corte debido a deformación:

$$\gamma_D = \frac{D_{TM}}{T_r} = 1.58 \leq 2.5$$

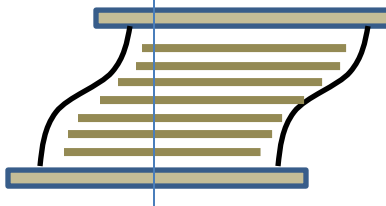


Figura 58. Representación gráfica Deformación por Corte por Deformación. Fuente: Propia.

Deformación por corte debido a compresión:

$$\gamma_C = \frac{6 \times P \times S}{E_c \times A_R} = 2.77$$

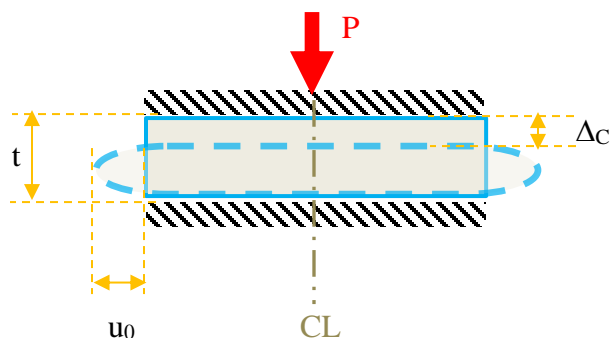


Figura 59. Representación gráfica Deformación por Corte debido a Compresión. Fuente: Propia.

Deformación por corte debido a deformación angular:

$$\gamma_{\theta} = \frac{0.375 \times D_e^2 \times \theta}{t_r \times T_r} = 0.279$$

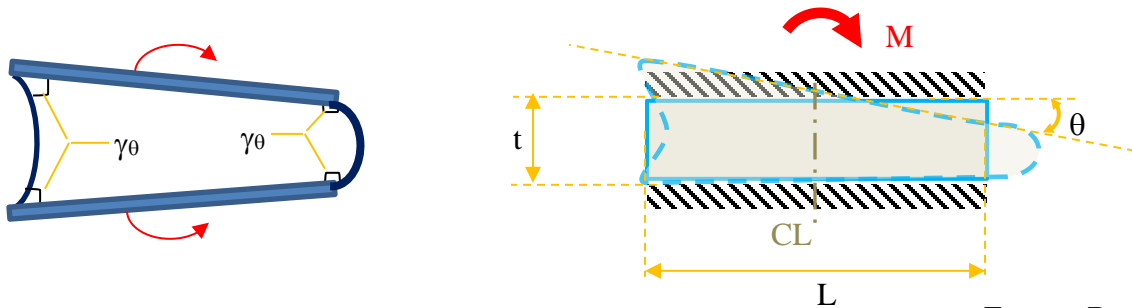


Figura 60. Representación gráfica Deformación por Corte debido a Deformación Angular. Fuente: Propia.

Donde θ se tomó como 0.003 radianes, valor mínimo permisible.

La deformación total por corte corresponderá a la suma de los aportes de los 3 parámetros anteriores.

$$\gamma_T = \gamma_D + \gamma_C + 0.5\gamma_{\theta} = 1.58 + 2.77 + 0.5 \times 0.279 = 4.49$$

Se compara con el valor límite de 6, y se calcula el factor de seguridad que debe ser mayor que 1.1.

$$FS = \frac{6}{4.49} = 1.34 > 1.1$$

El aislador cumple por carga crítica y por deformaciones por cortante, el diámetro obtenido fue el resultado de iteraciones hasta satisfacer los criterios anteriores.

Cálculo de los parámetros para el análisis no lineal del aislador, propiedades histeréticas.

Rigidez Post Fluencia

$$K_2 = K_d = \frac{G \times A_{goma}}{T_r} = \frac{50 \times 0.3958}{0.24} = 82.47 \frac{tonf}{m}$$

Resistencia Característica o Fuerza histerética

$$Q_d = A_p \tau_{py} = 0.0113 \times 800 = 9.05 \text{ tonf}$$

Rigidez inicial o elástica

$$K_1 = \alpha K_2 = 10 \times 82.47 = 824.67 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

Donde $\alpha = 10$

Fuerza de fluencia

$$F_y = \frac{K_1}{K_1 - K_2} Q_d = \frac{824.67}{824.67 - 82.47} \times 9.05 = 10.05 \text{ tonf}$$

Desplazamiento de fluencia

$$D_y = \frac{F_y}{K_1} = \frac{10.05}{824.67} = 0.0122\text{m} = 1.22 \text{ cm}$$

Rigidez efectiva

$$K_{ef} = K_d + \frac{Q_d}{D_M} = 82.47 + \frac{9.05}{0.3304} = 109.85 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

Se observa un aumento de rigidez de 1.8 veces con respecto al cálculo inicial.

Energía disipada por ciclo

$$EDC = 4Q_d(D_M - D_y) = 4 \times 9.05 \times (0.3304 - 0.0122) = 11.52 \text{ tonf} \cdot \text{m}$$

Fuerza de restitución para un desplazamiento igual a $0.5D_M$

$$F_R = K_2 \frac{D_M}{2} = 82.47 \times \frac{0.3304}{2} = 13.63 \text{ tonf}$$

Con estos datos se construye el diagrama histerético idealizado para los aisladores tipo LRB, pero antes se explica la conformación de dicho diagrama.

Un diagrama típico de la relación idealizada de la Fuerza-Desplazamiento en un sistema de aislación se muestra en la Figura 61, y en la Figura 62 se muestran los puntos que definen la curva bilineal idealizada, con el apoyo de ambas figuras se pueden describir los siguientes parámetros previamente ya calculados, la fuerza característica es aquella que se debe vencer en el sistema para que ocurra el movimiento lateral, se alcanza luego un desplazamiento de fluencia con una correspondiente fuerza de fluencia (la pendiente de la línea que conecta al origen con este punto de coordenadas (D_y, F_y) representa la rigidez inicial o elástica del aislador), a partir de allí ocurre la post fluencia y la pendiente cae en un factor de 1/10 hasta llegar al punto de máximo desplazamiento y máxima Fuerza (D_M, F_M) . La pendiente de la línea que empieza en el origen y llega hasta la coordenada (D_M, F_M) representa la rigidez efectiva del aislador. Para cuando el sistema se descarga lo hace con pendiente elástica hasta un desplazamiento equivalente al desplazamiento máximo menos dos veces el desplazamiento de fluencia. A partir de allí se completa el loop, tal como se observa en la Figura 62.

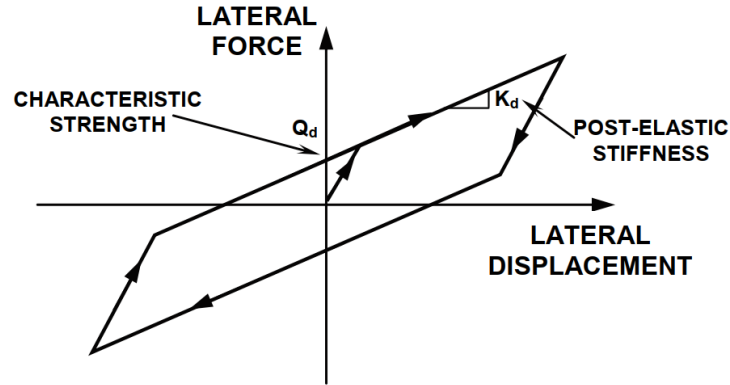


Figura 61. Relación Fuerza – Desplazamiento Idealizada de un sistema de aislamiento típico. Fuente: (Constantinou, Kalpakidis, & Filiatrault, 2011).

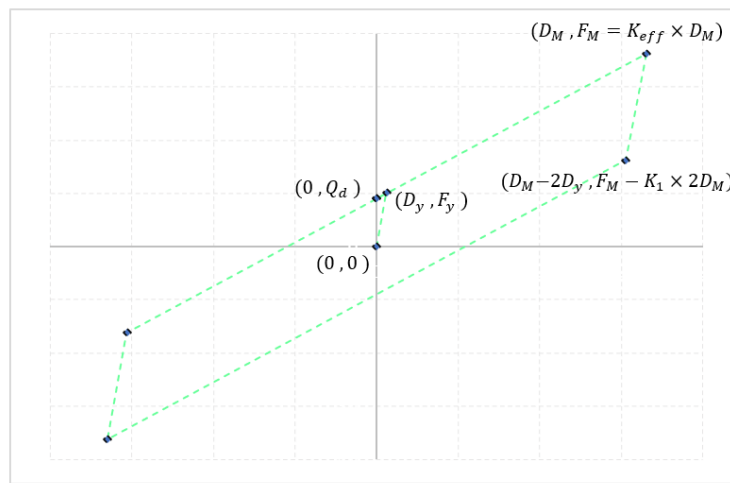


Figura 62. Puntos que definen la Curva Bilineal Histéretica Aislador Tipo LRB. Fuente: Propia.

Con esta información ya presentada se construye el diagrama histéretico idealizado para el aislador tipo LRB – 1 que se muestra en la Figura 63.

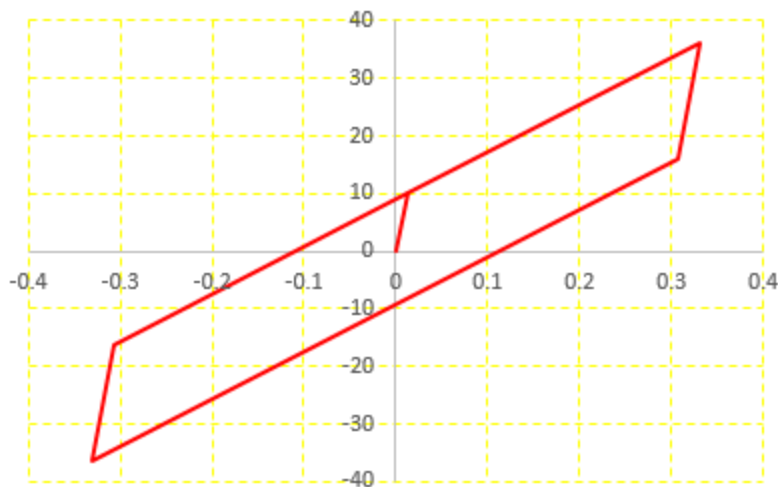


Figura 63. Curva Bilineal Histéretica Aislador LRB – 1 (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia.

Se realiza el mismo proceso para el predimensionamiento y prediseño de un aislador LRB – 2 cambiando las demandas de las cargas axiales a los siguientes valores:

Aislador LRB - 2

Demandas

Pserv. 137.2 Tonf

Pmáx. 259.2 Tonf

Se obtienen los siguientes parámetros base para el análisis no lineal.

Rigidez Post Fluencia

$$K_2 = K_d = 71.09 \frac{tonf}{m}$$

Resistencia Característica o Fuerza histerética

$$Q_d = 9.05 tonf$$

Rigidez inicial o elástica

$$K_1 = 710.95 \frac{tonf}{m}$$

Fuerza de fluencia

$$F_y = 10.05 tonf$$

Desplazamiento de fluencia

$$D_y = 1.41 cm$$

Rigidez efectiva

$$K_{ef} = 98.48 \frac{tonf}{m}$$

Se observa un aumento de rigidez de 1.6 veces con respecto al cálculo inicial.

Energía disipada por ciclo

$$EDC = 11.45 tonf.m$$

Fuerza de restitución para un desplazamiento igual a $0.5D_M$

$$F_R = 11.75 tonf$$

Con estos datos se construye el diagrama histérico idealizado para el aislador tipo LRB – 2, que se muestra en la Figura 64.

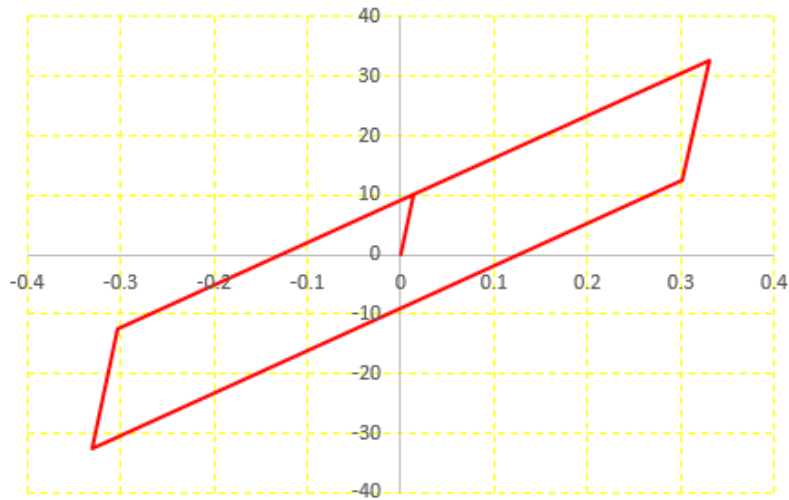


Figura 64. Curva Bilineal Histérica Aislador LRB – 2 (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia.

En orden de poder realizar un buen balance torsional y adecuada distribución de los aisladores en planta, así como también la disminución de la fuerza de restitución del sistema, se necesitó la incorporación de deslizadores.

Deslizador SL

Demandas

Pserv.	137.2 tonf
Pmáx.	259.2 tonf

Propiedades Materiales

$\mu = 5\%$

Características Deslizador

$Q_d =$	6.86 tonf	$Q_d = \mu \times P_{serv.} = 0.05 \times 137.2 tonf$
$F_y =$	6.86 tonf	$F_y = \mu \times P_{serv.} = 0.05 \times 137.2 tonf$
$K_{ef} =$	20.76 tonf/m	$K_{ef} = \frac{F_y}{D_M} = \frac{6.86}{0.3304}$
EDC =	9.07 tonf*m	$EDC = 4F_y(D_M) = 4 \times 6.86 \times (0.3304)$
$F_R =$	0.00 tonf	No presenta

Con estos datos se construye el diagrama histérico idealizado para el deslizador tipo SL. Su loop histérico es diferente porque no es un aislador y una vez se vence la fricción del plato, simplemente alcanzará el valor de la fuerza característica y se mantendrá constante hasta el desplazamiento máximo como se aprecia en la Figura 65.

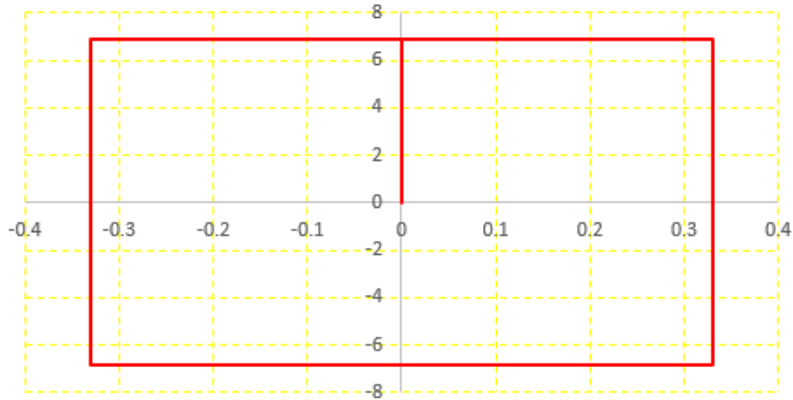


Figura 65. Curva Bilineal Histerética Deslizador SL (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia.

Con estas propiedades se asignan al modelo de ETABS según la distribución en planta mostrada a continuación en la Figura 66, que fue la configuración que arrojó los resultados más cercanos a los valores de parámetros objetivos y la conservación de la excentricidad natural en cero.

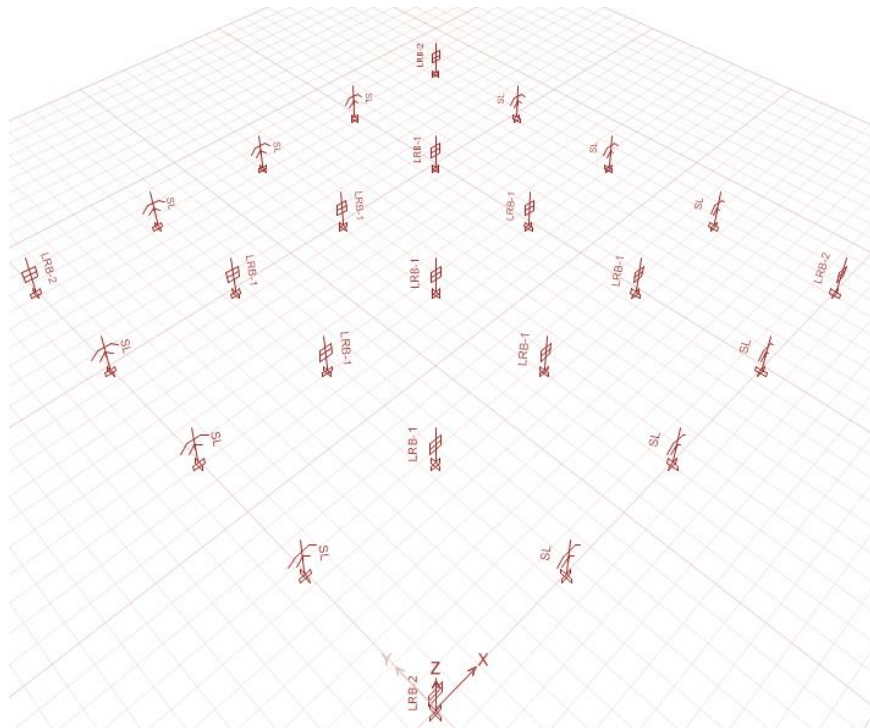


Figura 66. Distribución en Planta Aisladores tipo LRB y deslizador SL (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia.

Diseño del Aislador Tipo HDR.

Aislador HDR - 1

Demandas

Pserv. 232.4 tonf

Pmáx. 396.7 tonf

Propiedades Materiales

τ_{py}	800	tonf/m ²	Esfuerzo de fluencia del Plomo
K	200000	tonf/m ²	Módulo volumétrico de la goma
G	37	tonf/m ²	Módulo de Corte de la Goma
σ_{adm}	1000	tonf/m ²	Esfuerzo axial permisible del Aislador (aproximado, fabricante)
F	4		Proveedor, valor recomendado
K	0.85		Depende de G (Valores de referencia 0.65 - 0.9)
$\sigma_{adm,s}$	18000	tonf/m ²	$\sigma_{adm,s} = 0.75\sigma_y$ Módulo elástico de la goma
σ_y	24000	tonf/m ²	Esfuerzo de fluencia acero de placas

Características de los aisladores

Espesor de lámina goma

$$t_r = 0.8 \text{ cm}$$

Espesor de lámina acero

$$t_s = 0.3 \text{ cm}$$

$$\sigma_s = 1.5 \frac{t_r}{t_s} \sigma_{adm}$$

$$\sigma_s = 4000 \text{ tonf/m}^2$$

$$\sigma_s < \sigma_{adm,s}$$

Cantidad de láminas y espesor de la goma

$$N = 30 \text{ un}$$

$$T_r = 24 \text{ cm}$$

Cantidad de láminas y espesor de las placas de acero

$$(N-1) = 29 \text{ un}$$

$$T_s = 8.7 \text{ cm}$$

Altura aislador

$$H_{ef} = T_r + T_s = 32.7 \text{ cm}$$

$$H_T = H_{ef} + 2 \times 2 \text{ cm} = 36.7 \text{ cm}$$

Recubrimiento

$$C_s = 1.5 \text{ cm}$$

Cálculo del diámetro mínimo del aislador

$$D_0 > 1.5D_{TM} = 57cm$$

$$A > \frac{P_{max}}{\sigma_{adm}} = 0.397m^2$$

$$D_0 > \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = 0.711 m \approx 71.1 cm$$

Se asume un diámetro de 85 cm luego de realizar iteraciones para cumplir los requerimientos en cuanto a cargas axiales y deformaciones por corte.

$$D_0 = 85 \text{ cm}$$

Diámetro de la sección anular

Se debe cumplir que: $\frac{D_0}{6} < D_i < \frac{D_0}{3}$

$$\frac{85 \text{ cm}}{6} < D_i < \frac{85 \text{ cm}}{3}$$

$$14cm < D_i < 28cm$$

Se escogió como diámetro de la sección anular de $D_i = 15 \text{ cm}$.

Se establece el valor del recubrimiento C_s de 1.5 cm para la protección de las placas de acero de los efectos ambientales. El diámetro efectivo del aislador será entonces:

$$D_e = D_0 - 2C_s = 85 \text{ cm} - 3 \text{ cm} = 82 \text{ cm}.$$

Cálculo de la rigidez y frecuencia vertical

$$K_v = \frac{E_c A}{T_r}$$

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{6GS^2} + \frac{4}{3K}$$

$$S = \frac{D_e - D_i}{4t_r} > 10$$

$$S = 20.94$$

$$E_c = 59024.79 \text{ tonf/m}^2$$

$$K_v = 97553.612 \text{ tonf/m}$$

$$f_v = \sqrt{6S}f_h \geq 10\text{Hz}$$

$$f_v \quad 17.09 \text{ Hz}$$

Deformación angular máxima.

$$\gamma_{\text{máx}} = \gamma_s + \gamma_c + \gamma_b \approx \gamma_s + \gamma_c \leq 3.12 \text{ para un } FS \geq 1.5$$

$$\gamma_s = \frac{D_{TM}}{T_r}$$

$$\gamma_s \quad 1.58$$

$$\gamma_c = 6S\varepsilon_c$$

$$\varepsilon_c = \frac{P_{\text{max}}}{AE_0(1 + 2kS^2)}$$

$$E_0 = fG$$

$$E_0 \quad 148 \quad \text{tonf/m}^2$$

$$\varepsilon_c \quad 0.00905$$

$$\gamma_c \quad 1.14$$

$$\gamma_{\text{max}} \quad 2.72 < 3.12$$

Verificación al pandeo

$$P_{\text{crit}} = \frac{P_s}{2} \left(\sqrt{1 + 4 \frac{P_E}{P_s}} - 1 \right)$$

Cálculo de P_s o rigidez de corte efectiva

$$P_s = GA_s$$

Ahora se calcula el área de corte efectiva A_s .

$$A_s = A \frac{H_{ef}}{T_r}$$

$$A_s \quad 0.540 \text{ m}^2$$

$$P_s \quad 20.00 \text{ tonf}$$

La carga de pandeo P_E

$$P_E = \frac{\pi^2 (EI)_{ef}}{(H_{ef})^2}$$

Cálculo de la rigidez a la inclinación

$$(EI)_{ef} = \frac{1}{3} E_c I$$

$$I = \frac{\pi}{4} \left[\left(\frac{D_e}{2} \right)^4 - \left(\frac{D_i}{2} \right)^4 \right]$$

I	0.02217 m ⁴
(EI) _{ef}	436.17 tonf.m ²
P _E	40258.4 tonf
P _{crit.}	720.38 tonf

$$FS = \frac{P_{crit}}{P_{max}} > 2$$

FS = 2.2

Verificación al volcamiento

$$D_{max} = \frac{P_{min} D_0}{P_{min} + K_{ef} H_{ef}}$$

$$FS = \frac{D_{max}}{D_M} > 2$$

P _{min}	107.86
D _{max}	0.72
FS	2.17

Es importante que la conexión del aislador sea fija y pernada para evitar el volcamiento y no depender de este chequeo.

Desplazamiento de fluencia

D_y 0.024 m

$$D_y = 0.1 T_r$$

ξ 0.15

Energía disipada por ciclo

$$EDC = 2\pi K_{ef} D_M^2 \xi$$

EDC 6.29 tonf.m

Resistencia Característica

$$Q_d = \frac{EDC}{4(D_M - D_y)}$$

Q_d 5.13 tonf

Rigidez Post Fluencia

$$K_2 = K_{ef} - \frac{Q_d}{D_M}$$

K₂ 45.61 tonf/m

Rigidez inicial o elástica

$$K_1 = \frac{Q_d}{D_y} + K_2$$

K₁ 259.53 tonf/m

Fuerza de fluencia

$$F_y = Q_d + K_2 D_y$$

F_y 6.23 tonf

Rigidez efectiva

$$K_{ef} = 61.15 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

Fuerza máxima para un desplazamiento igual a D_M

$$F_m = K_{ef} D_M$$

F_m 20.21 tonf

Fuerza de restitución para un desplazamiento igual a 0.5D_M

$$F_R = 7.54 \text{ tonf}$$

Se construye en la Figura 68, un modelo bilineal para este tipo de aislador HDR aclarando que no representa un comportamiento tan acertado debido a las características de los materiales usados para lograr el alto amortiguamiento, lo que conlleva a relaciones esfuerzos de corte y deformación unitaria no lineales, y endurecimiento cuando se excede el 200% de la deformación unitaria a cortante. Estas consideraciones se tienen en cuenta en el modelo matemático desarrollado en

versiones ETABS V17 y posteriores del elemento nonlinear link High Damping Rubber Isolator, donde se solicitan unos parámetros adicionales para incluir estos efectos, para el modelado matemático se usaran los siguientes proporcionados por la manufacturera Bridgestone para el estudio desarrollado por (MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH CENTER, 2020).

Table 6. Material input parameters for DHI model

Property	Nominal	UB	LB
Added Elastic Stiffness - G_e (MPa)	0.5257	0.8136	0.5262
Control Strength 1 - g_1 (MPa)	2.468	3.364	1.999
Control Strength 2 - g_2 (MPa)	0.3564	0.4858	0.2887
Control Strain 1 - l_1	0.03591	0.03591	0.03591
Control Strain 2 - l_2	0.5	0.5	0.5
Resistance Ratio - θ	0.4598	0.4598	0.4598
Damage Parameter - γ_a	0.4181	0.4181	0.4181

Figura 67. Parámetros adicionales modelado HDR ETABS V19. Fuente: (MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH CENTER, 2020)

Con estos datos se construye el diagrama histerético idealizado para el aislador tipo HDR – 1.

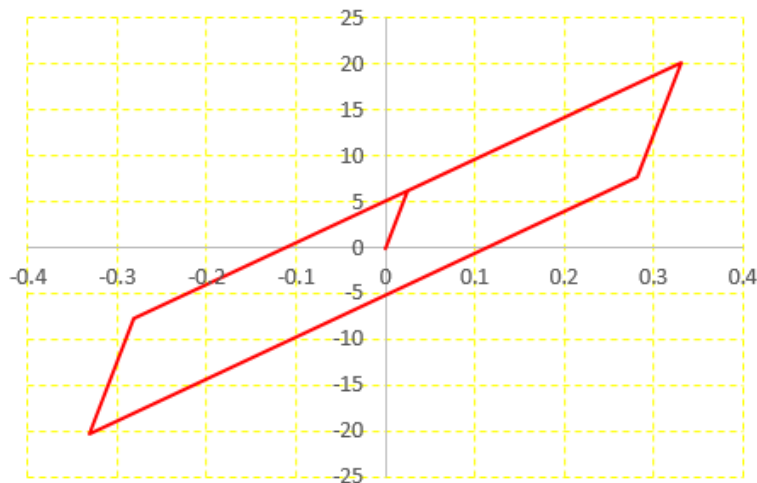


Figura 68. Curva Bilineal Histerética Aislador HDR – 1 (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia

Aislador HDR - 2

Demandas

Pserv.	137.2	tonf
Pmáx.	259.2	tonf

Propiedades Materiales

τ_{py}	800	tonf/m ²	Esfuerzo de fluencia del Plomo
K	200000	tonf/m ²	Módulo volumétrico de la goma
G	50	tonf/m ²	Módulo de Corte de la Goma
σ_{adm}	1000	tonf/m ²	Esfuerzo axial permisible del Aislador (aproximado, fabricante)
F	4		Proveedor, valor recomendado
K	0.75		Depende de G (Valores de referencia 0.65 - 0.9)
$\sigma_{adm,s}$	18000	tonf/m ²	$\sigma_{adm,s} = 0.75\sigma_y$ Módulo elástico de la goma
σ_y	24000	tonf/m ²	Esfuerzo de fluencia acero de placas

Características de los aisladores

Espesor de lámina goma

$$t_r = 0.8 \text{ cm}$$

Espesor de lámina acero

$$t_s = 0.3 \text{ cm}$$

$$\sigma_s = 1.5 \frac{t_r}{t_s} \sigma_{adm}$$

$$\sigma_s = 4000 \text{ tonf/m}^2$$

$$\sigma_s < \sigma_{adm,s}$$

Cantidad de láminas y espesor de la goma

$$N = 26 \text{ un}$$

$$T_r = 20.8 \text{ cm}$$

Cantidad de láminas y espesor de las placas de acero

$$(N-1) = 25 \text{ un}$$

$$T_s = 7.5 \text{ cm}$$

Altura aislador

$$H_{ef} = T_r + T_s = 28.3 \text{ cm}$$

$$H_T = H_{ef} + 2 \times 2 \text{ cm} = 32.3 \text{ cm}$$

Recubrimiento

$$C_s = 1.5 \text{ cm}$$

Cálculo del diámetro mínimo del aislador

$$D_0 > 1.5D_{TM} = 57 \text{ cm}$$

$$A > \frac{P_{max}}{\sigma_{adm}} = 0.259m^2$$

$$D_0 > \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = 0.5745 m \approx 57.45 cm$$

Se asume un diámetro de 70 cm luego de realizar iteraciones para cumplir los requerimientos en cuanto a cargas axiales y deformaciones por corte.

$$D_0 = 70 \text{ cm}$$

Diámetro de la sección anular

Se debe cumplir que: $\frac{D_0}{6} < D_i < \frac{D_0}{3}$

$$\frac{70 \text{ cm}}{6} < D_i < \frac{70 \text{ cm}}{3}$$

$$11.7cm < D_i < 23.3cm$$

Se escogió como diámetro de la sección anular de $D_i = 12 \text{ cm}$.

Se establece el valor del recubrimiento C_s de 1.5 cm para la protección de las placas de acero de los efectos ambientales. El diámetro efectivo del aislador será entonces:

$$D_e = D_0 - 2C_s = 70 \text{ cm} - 3 \text{ cm} = 67 \text{ cm}.$$

Cálculo de la rigidez y frecuencia vertical

$$K_v = \frac{E_c A}{T_r}$$

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{6GS^2} + \frac{4}{3K}$$

$$S = \frac{D_e - D_i}{4t_r} > 10$$

$$S = 17.19$$

$$E_c = 55709.02 \text{ tonf/m}^2$$

$$K_v = 69417.84 \text{ tonf/m}$$

$$f_v = \sqrt{6S} f_h \geq 10 \text{ Hz}$$

$$f_v \quad 14.03 \text{ Hz}$$

Deformación angular máxima.

$$\gamma_{\text{máx}} = \gamma_s + \gamma_c + \gamma_b \approx \gamma_s + \gamma_c \leq 3.12 \text{ para un } FS \geq 1.5$$

$$\gamma_s = \frac{D_{TM}}{T_r}$$

$$\gamma_s \quad 1.83$$

$$\gamma_c = 6S \varepsilon_c$$

$$\varepsilon_c = \frac{P_{\text{max}}}{AE_0(1 + 2kS^2)}$$

$$E_0 = fG$$

$$E_0 \quad 200 \quad \text{tonf/m}^2$$

$$\varepsilon_c \quad 0.011258$$

$$\gamma_c \quad 1.16$$

$$\gamma_{\text{max}} \quad 2.99 < 3.12$$

Verificación al pandeo

$$P_{\text{crit}} = \frac{P_s}{2} \left(\sqrt{1 + 4 \frac{P_E}{P_s}} - 1 \right)$$

Cálculo de P_s o rigidez de corte efectiva

$$P_s = GA_s$$

Ahora se calcula el área de corte efectiva A_s .

$$A_s = A \frac{H_{ef}}{T_r}$$

$$A_s \quad 0.353 \text{ m}^2$$

$$P_s \quad 17.63 \text{ tonf}$$

La carga de pandeo P_E

$$P_E = \frac{\pi^2 (EI)_{ef}}{(H_{ef})^2}$$

Cálculo de la rigidez a la inclinación

$$(EI)_{ef} = \frac{1}{3} E_c I$$

$$I = \frac{\pi}{4} \left[\left(\frac{D_e}{2} \right)^4 - \left(\frac{D_i}{2} \right)^4 \right]$$

I	0.0099	m ⁴
(EI) _{ef}	183.496	tonf.m ²
P _E	22612.74	tonf
P _{crit.}	622.68	tonf

$$FS = \frac{P_{crit}}{P_{max}} > 2$$

FS = 2.4

Verificación al volcamiento

$$D_{max} = \frac{P_{min} D_0}{P_{min} + K_{ef} H_{ef}}$$

$$FS = \frac{D_{max}}{D_M} > 2$$

P _{min}	39.7
D _{max}	0.485
FS	1.47

Es importante que la conexión del aislador sea fija y Pernada para evitar el volcamiento y no depender de este chequeo.

Desplazamiento de fluencia

D_y 0.0208 m

$$D_y = 0.1 T_r$$

ξ 0.15

Energía disipada por ciclo

$$EDC = 2\pi K_{ef} D_M^2 \xi$$

EDC 6.41 tonf.m

Resistencia Característica

$$Q_d = \frac{EDC}{4(D_M - D_y)}$$

Q_d 5.18 tonf

Rigidez Post Fluencia

$$K_2 = K_{ef} - \frac{Q_d}{D_M}$$

K₂ 46.64 tonf/m

Rigidez inicial o elástica

$$K_1 = \frac{Q_d}{D_y} + K_2$$

K₁ 295.52 tonf/m

Fuerza de fluencia

$$F_y = Q_d + K_2 D_y$$

F_y 6.15 tonf

Rigidez efectiva

$$K_{ef} = 62.3 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

Fuerza máxima para un desplazamiento igual a D_M

$$F_m = K_{ef} D_M$$

F_m 20.59 tonf

Fuerza de restitución para un desplazamiento igual a 0.5D_M

$$F_R = 7.71 \text{ tonf}$$

Se construye en la Figura 70, un modelo bilineal para este tipo de aislador HDR aclarando que no representa un comportamiento tan acertado debido a las características de los materiales usados para lograr el alto amortiguamiento, lo que conlleva a relaciones esfuerzos de corte y deformación

unitaria no lineales, y endurecimiento cuando se excede el 200% de la deformación unitaria a cortante. Estas consideraciones se tienen en cuenta en el modelo matemático desarrollado en versiones ETABS V17 y posteriores del elemento nonlinear link High Damping Rubber Isolator, donde se solicitan unos parámetros adicionales para incluir estos efectos, para el modelado matemático se usaran los siguientes proporcionados por la manufacturera Bridgestone para el estudio desarrollado por (MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH CENTER, 2020).

Table 6. Material input parameters for DHI model

Property	Nominal	UB	LB
Added Elastic Stiffness - G_e (MPa)	0.5257	0.8136	0.5262
Control Strength 1 - g_1 (MPa)	2.468	3.364	1.999
Control Strength 2 - g_2 (MPa)	0.3564	0.4858	0.2887
Control Strain 1 - l_1	0.03591	0.03591	0.03591
Control Strain 2 - l_2	0.5	0.5	0.5
Resistance Ratio - θ	0.4598	0.4598	0.4598
Damage Parameter - γ_a	0.4181	0.4181	0.4181

Figura 69. Parámetros adicionales modelado HDR ETABS V19. Fuente: (MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH CENTER, 2020)

Con estos datos se construye el diagrama histerético idealizado para el aislador tipo HDR – 2.

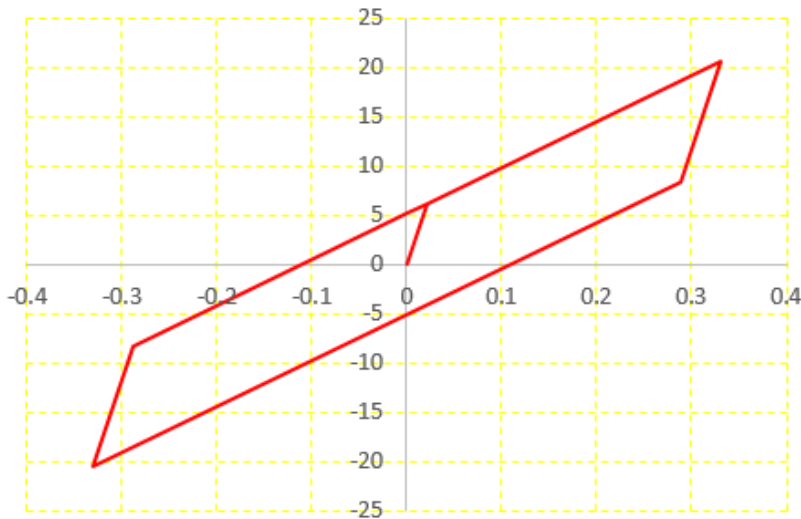


Figura 70. Curva Bilineal Histerética Aislador HDR – 2 (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia

Con estas propiedades se asignan al modelo de ETABS según la distribución en planta mostrada a continuación en la Figura 71, que fue la configuración que arrojó los resultados más cercanos a los valores de parámetros objetivos y la conservación de la excentricidad natural en cero.

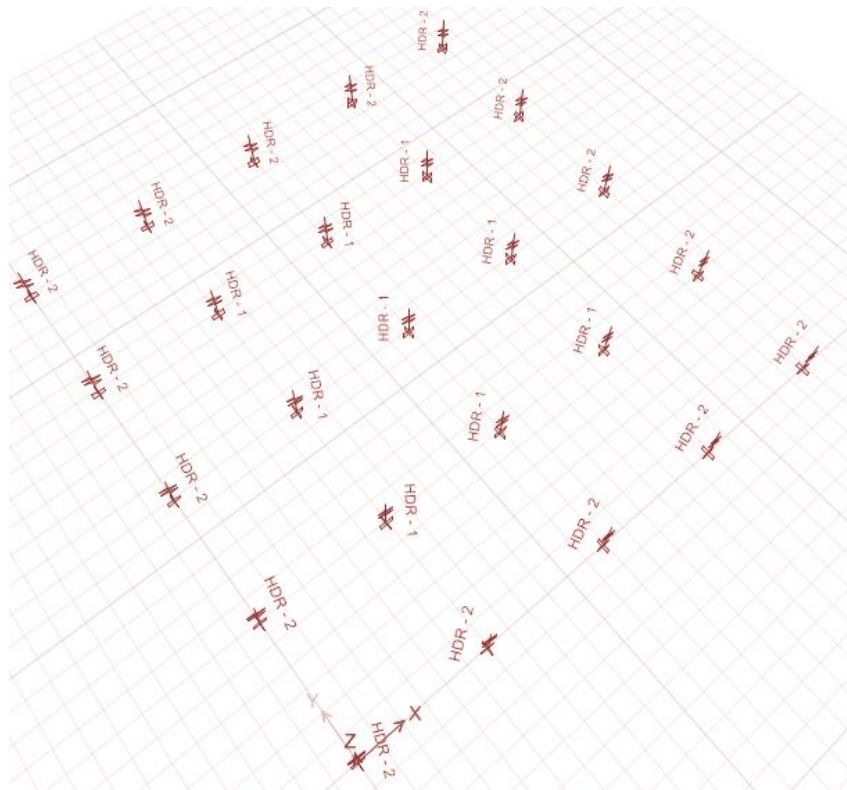


Figura 71. Distribución en Planta Aisladores tipo HDR (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia.

Diseño del Aislador Tipo FPS o de primera generación.

Se presentan los cálculos resumidos en tablas para los 3 tipos de aisladores por fricción pendulares simples, que se calcularon según los valores de carga axial usando las ecuaciones que se relacionan a continuación.

$$R_{mín.} = g \left(\frac{T_{Ais}}{2\pi} \right)^2$$

$$R_{máx.} = 20D_M$$

$R_{ef.}$ = Valor colocado de radio efectivo aislador

μ = Valor coeficiente de fricción de la superficie aislador

Resistencia característica:

$$Q_d = \mu \times P_{serv.}$$

Rigidez post fluencia

$$K_d = \frac{P_{serv.}}{R_{ef}}$$

Rigidez efectiva:

$$K_{ef} = K_d + \frac{Q_d}{D_M}$$

Energía disipada por ciclo:

$$EDC = 4Q_d D_M$$

Fuerza máxima:

$$F_m = K_{ef} D_M$$

Fuerza para un valor de desplazamiento de la mitad del máximo:

$$F_{0.5D_M} = K_d(0.5D_M) + Q_d$$

Fuerza de restitución:

$$F_R = F_m - F_{0.5D_M}$$

Tipo 3 FPS 1			Tipo 2 FPS 1			Tipo 1 FPS 1		
μ_1	3.0%		μ_1	3.0%		μ_1	4.0%	
DM	33.04	cm	DM	33.04	cm	DM	33.04	cm
$R_{max: 20DM}$	6.61	m	$R_{max: 20DM}$	6.61	m	$R_{max: 20DM}$	6.61	m
R_{ef}	2.90	m	R_{ef}	2.90	m	R_{ef}	2.90	m
$R_{mín}$	2.24	m	$R_{mín}$	2.24	m	$R_{mín}$	2.24	m
P_{serv}	82.79	tonf	P_{serv}	137.18	tf	P_{serv}	232.39	tf
P_{max}	173.20	tonf	P_{max}	259.18	tf	P_{max}	396.66	tf
F_f	2.48	tonf	F_f	4.12	tf	F_f	9.30	tf
Fase 1			Fase 1			Fase 1		
Q_d	2.48	tonf	Q_d	4.12	tonf	Q_d	9.30	tonf
K_d	28.55	tonf/m	K_d	47.30	tonf/m	K_d	80.14	tonf/m
K_{ef}	36.06	tonf/m	K_{ef}	59.76	tonf/m	K_{ef}	108.27	tonf/m
EDC	3.28	tonf-m	EDC	5.44	tonf-m	EDC	12.29	tonf-m
$F_{m(0.5DM)}$	7.20	tonf	$F_{m(0.5DM)}$	11.93	tonf	$F_{(0.5DM)}$	22.54	tonf
F_R	4.72	tonf	F_R	7.82	tonf	F_R	13.24	tonf
F_m	11.92	tonf	F_m	19.75	tonf	F_m	35.78	tonf

Tabla 14. Propiedades calculadas para el aislador FPS Simple para 3 tipos diferentes (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia.

Para cada tipo de aislador FPS simple se conforma su curva idealizada histerética. De manera similar a lo explicado en cuanto a la construcción del diagrama bilinear de la relación Fuerza – Desplazamiento idealizada para el sistema de aislación de la Figura 61, en la Figura 72 se muestra un esquema con los puntos de interés, dónde se asume un valor de $D_y = 2 \text{ mm}$ (para las placas de soporte en aisladores tipo fricción pendulares simples y dobles, la literatura indica que se tienen desplazamientos de fluencia muy pequeños en orden de magnitud entre 1 mm a 2 mm), con base en ello se completa el loop y con base en esta información se realiza la construcción de las gráficas de la Figura 73, Figura 74 y Figura 75.

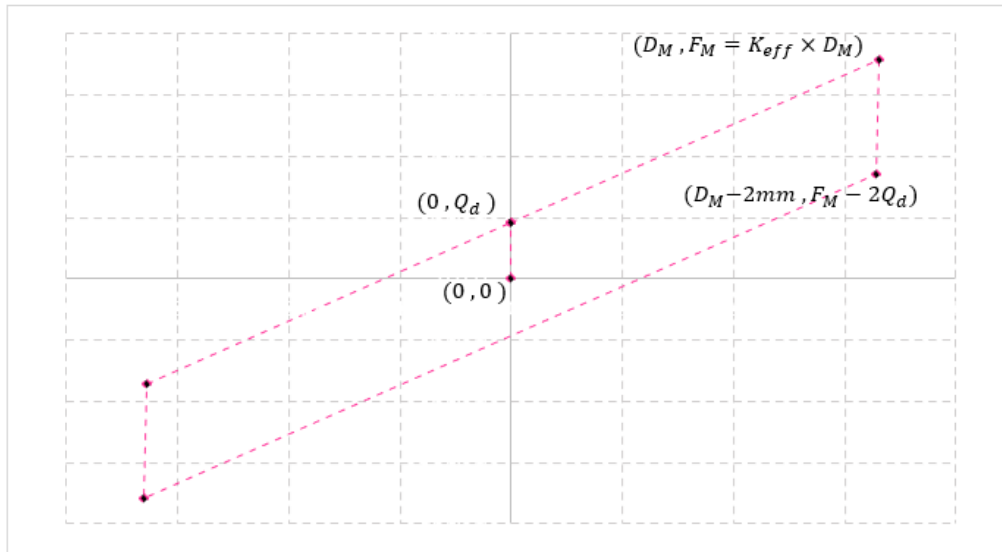


Figura 72. Puntos que definen la Curva Bilineal Histerética Aislador Tipo FPS. Fuente: Propia.

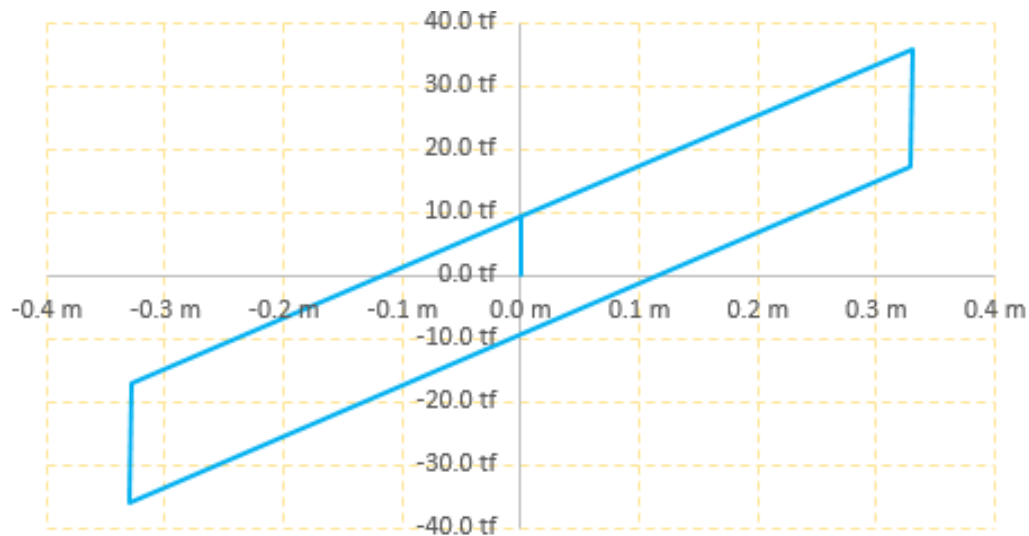


Figura 73. Curva Bilineal Histerética Aislador FPS-1 Tipo 1 (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia.

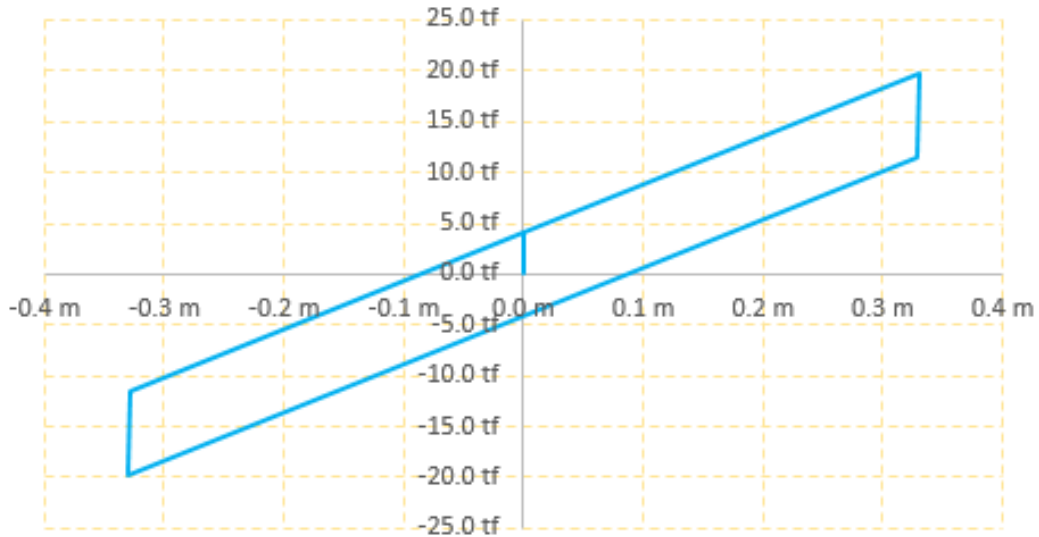


Figura 74. Curva Bilineal Histerética Aislador FPS-1 Tipo 2 (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia.

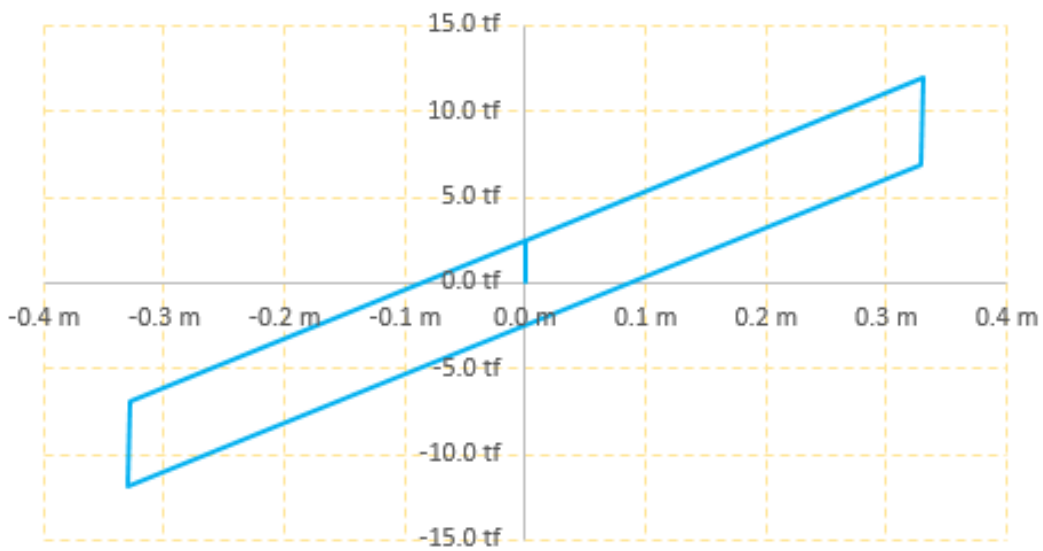


Figura 75. Curva Bilineal Histerética Aislador FPS-1 Tipo 3 (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia.

Con estas propiedades se asignan al modelo de ETABS según la distribución en planta mostrada a continuación en la Figura 76, que fue la configuración que arrojó los resultados más cercanos a los valores de parámetros objetivos y la conservación de la excentricidad natural en cero.

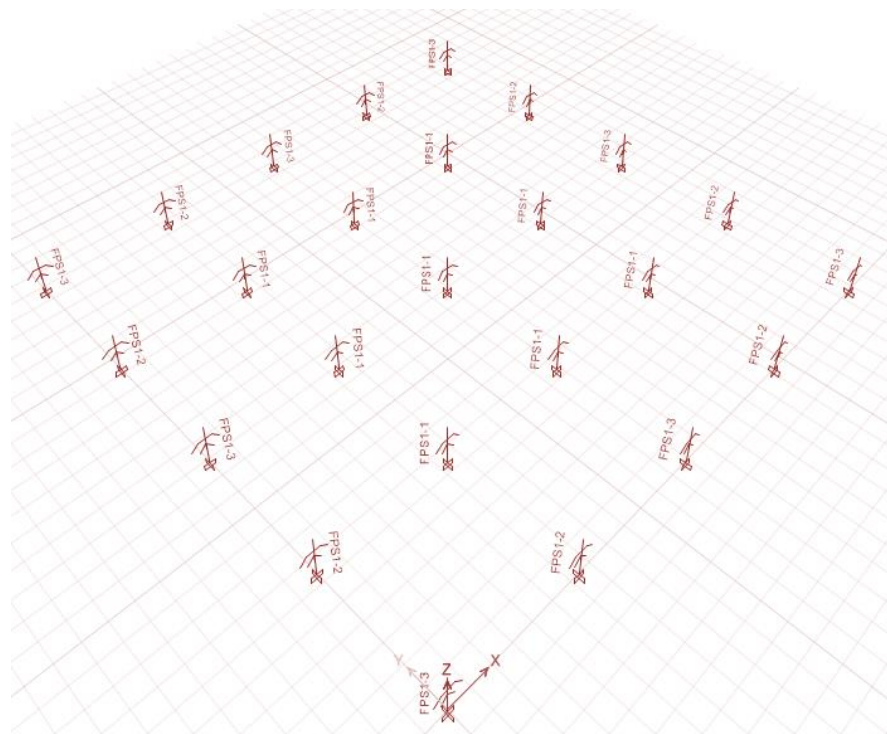


Figura 76. Distribución en Planta Aisladores tipo FPS (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia.

Diseño del Aislador Tipo DFPS o de segunda generación.

Se presentan los cálculos resumidos en tablas para los 3 tipos de aisladores por fricción pendulares de doble curvatura, que se calcularon según los valores de carga axial usando las ecuaciones que se relacionan a continuación.

$$R_{mín.} = g \left(\frac{T_{Ais}}{2\pi} \right)^2$$

$$R_{máx.} = 20D_M$$

$$R_{máx.posible} = \frac{20D_M}{2}$$

$R_{ef.}$ = Valor colocado de radio efectivo aislador superficies 1 y 2

μ = Valor coeficiente de fricción de las superficies 1 y 2 del aislador

Fuerzas de fricción en cada plato

$$F_{f1} = \mu_1 \times P_{serv.}$$

$$F_{f2} = \mu_2 \times P_{serv.}$$

Fase ó Régimen 1 de movimiento: Caso $\mu_1 < \mu_2$ y $R_{ef1} = R_{ef2}$

Fuerza a vencer en el primer movimiento:

$$F_{f1} = \mu_1 \times P_{serv.}$$

Desplazamiento inicial en Fase 1:

$$D'_u = (\mu_2 - \mu_1) \times R_{ef1}$$

Fase ó Régimen 2 de movimiento:

Fuerza a vencer en la superficie 2:

$$F_{f2} = \mu_2 \times P_{serv.}$$

Cálculo de la fricción equivalente:

$$\mu_e = \frac{\mu_1 R_{ef1} + \mu_2 R_{ef2}}{R_{ef1} + R_{ef2}}$$

Resistencia característica:

$$Q_d = \mu_e \times P_{serv.}$$

Rigidez post fluencia:

$$K_d = \frac{P_{serv.}}{R_{ef1} + R_{ef2}}$$

Rigidez efectiva:

$$K_{ef} = K_d + \frac{Q_d}{D_M}$$

Energía disipada por ciclo:

$$EDC = 4Q_d D_M$$

Fuerza máxima:

$$F_m = K_{ef} D_M$$

Fuerza para un desplazamiento igual a la mitad del máximo.

$$F_{0.5D_M} = K_d(0.5D_M) + Q_d$$

Fuerza de restitución:

$$F_R = F_m - F_{0.5D_M}$$

Desplazamientos en las superficies 1 y 2:

$$D_{u1} = (F_m - F_{f1}) \frac{R_{ef1}}{P_{serv}}$$

$$D_{u2} = (F_m - F_{f2}) \frac{R_{ef2}}{P_{serv}}$$

$$D_M = D_{u1} + D_{u2}$$

Tipo 3 FPS 2			Tipo 2 FPS 2			Tipo 1 FPS 2		
μ_1	2.5%		μ_1	2.5%		μ_1	3.5%	
μ_2	3.0%		μ_2	3.0%		μ_2	4.0%	
μ_e	2.75%		μ_e	2.75%		μ_e	3.75%	
DM	33.04	cm	DM	33.04	cm	DM	33.04	cm
20DM	6.61	m	20DM	6.61	m	20DM	6.61	m
R_{ef1}	2.40	m	R_{ef1}	2.40	m	R_{ef1}	2.40	m
R_{ef2}	2.40	m	R_{ef2}	2.40	m	R_{ef2}	2.40	m
R_{efmin}	1.12	m	R_{efmin}	1.12	m	R_{efmin}	1.12	m
R_{efmax}	3.30	m	R_{efmax}	3.30	m	R_{efmax}	3.30	m
P_{serv}	82.79	tf	P_{serv}	137.18	tf	P_{serv}	232.39	tf
P_{max}	173.20	tf	P_{max}	259.18	tf	P_{max}	396.66	tf
F_{f1}	2.07	tf	F_{f1}	3.43	tf	F_{f1}	8.13	tf
F_{f2}	2.48	tf	F_{f2}	4.12	tf	F_{f2}	9.30	tf
Fase 1			Fase 1			Fase 1		
F_{f1}	2.07	tf	F_{f1}	3.43	tf	F_{f1}	8.13	tf
D'_u	1.20	cm	D'_u	1.20	cm	D'_u	1.20	cm
Fase 2			Fase 2			Fase 2		
F_{f2}	2.48	tf	F_{f2}	4.12	tf	F_{f2}	9.30	tf
Q_d	2.28	tf	Q_d	3.77	tf	Q_d	8.71	tf
K_d	17.25	tf/m	K_d	28.58	tf/m	K_d	48.42	tf/m
K_{ef}	24.14	tf/m	K_{ef}	40.00	tf/m	K_{ef}	74.79	tf/m
F	7.98	tf	F	13.22	tf	F	24.71	tf
E_{DC}	3.01	tf-m	E_{DC}	4.99	tf-m	E_{DC}	11.52	tf-m
E_E	1.32	tf-m	E_E	2.18	tf-m	E_E	4.08	tf-m
β	18.17%		β	18.17%		β	22.45%	
Desplazamientos en las superficies 1 y 2			Desplazamientos en las superficies 1 y 2			Desplazamientos en las superficies 1 y 2		
D_{u1}	17.12	cm	D_{u1}	17.12	cm	D_{u1}	17.12	cm
D_{u2}	15.92	cm	D_{u2}	15.92	cm	D_{u2}	15.92	cm

Tipo 3 FPS 2			Tipo 2 FPS 2			Tipo 1 FPS 2		
$D_{u1} + D_{u2}$	33.04	cm	$D_{u1} + D_{u2}$	33.04	cm	$D_{u1} + D_{u2}$	33.04	cm
Fuerza de restitución a DM			Fuerza de restitución a DM			Fuerza de restitución a DM		
F	7.98	tf	F	13.22	tf	F	24.71	tf
$F_{0.5DM}$	5.13	tf	$F_{0.5DM}$	8.49	tf	$F_{0.5DM}$	16.71	tf
F_R	2.85	tf	F_R	4.72	tf	F_R	8.00	tf

Tabla 15. . Propiedades calculadas para el aislador DFP para 3 tipos diferentes (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia.

Para cada tipo de aislador DFP se conforma su curva idealizada histerética que se pueden ver en la Figura 78, la Figura 79 y la Figura 80, con base en los puntos identificados en la Figura 77.

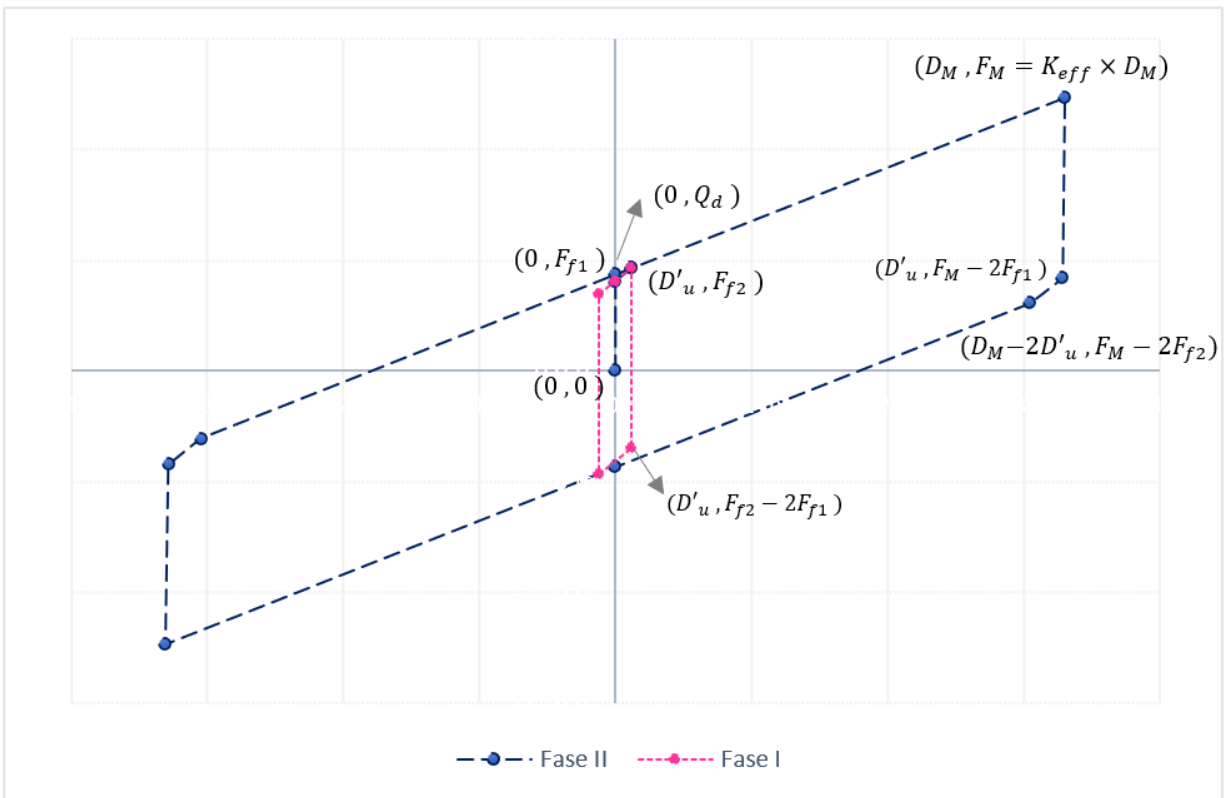


Figura 77. Puntos que definen la Curva Bilineal Histerética Aislador Tipo DFP. Fuente: Propia.

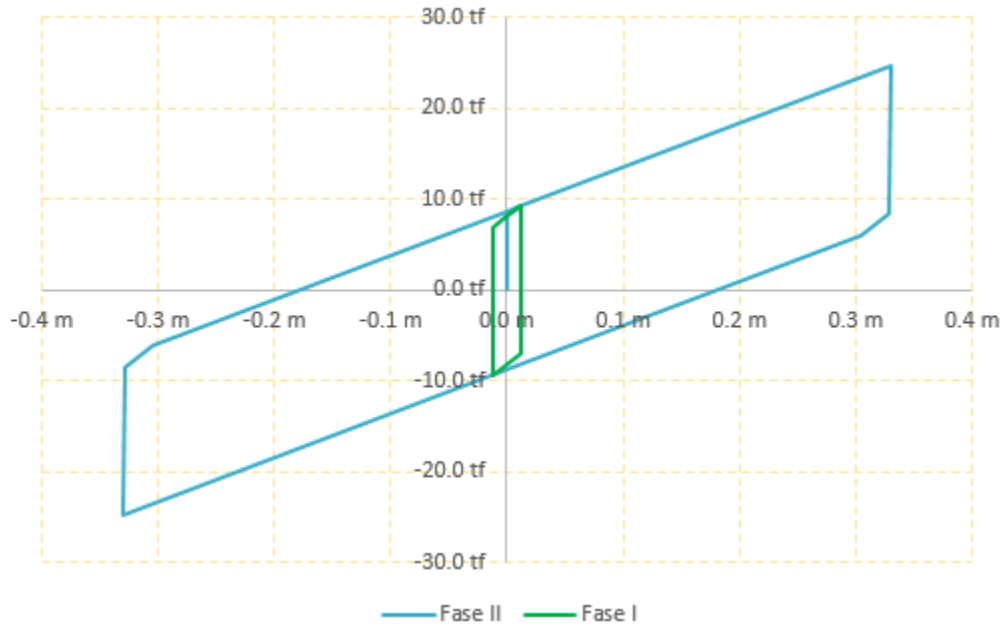


Figura 78. Curva Bilineal Histerética Aislador DFP - Tipo 1 (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia.

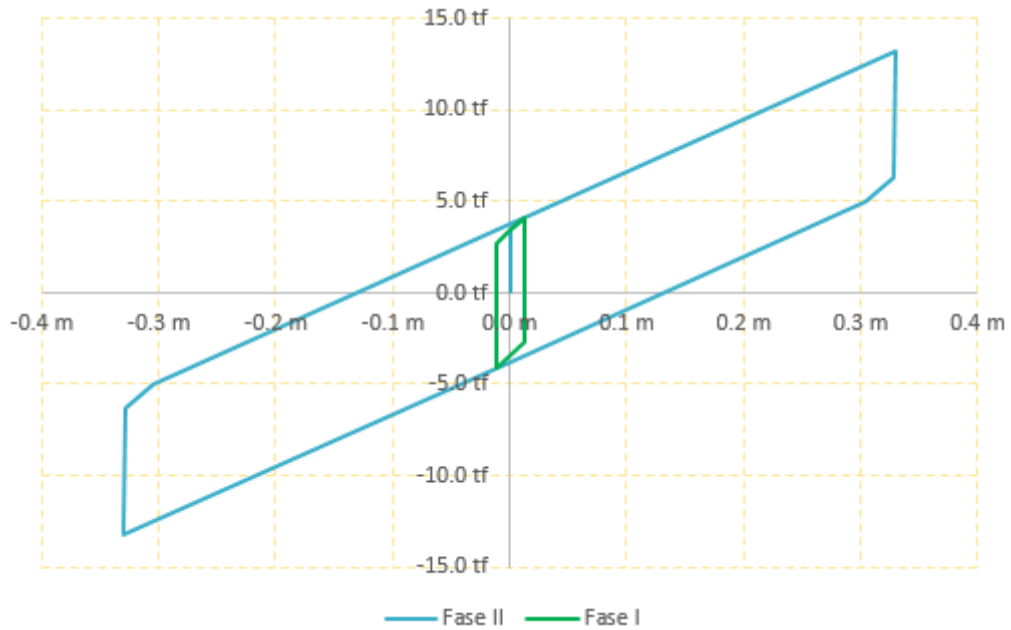


Figura 79. Curva Bilineal Histerética Aislador DFP - Tipo 2 (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia.

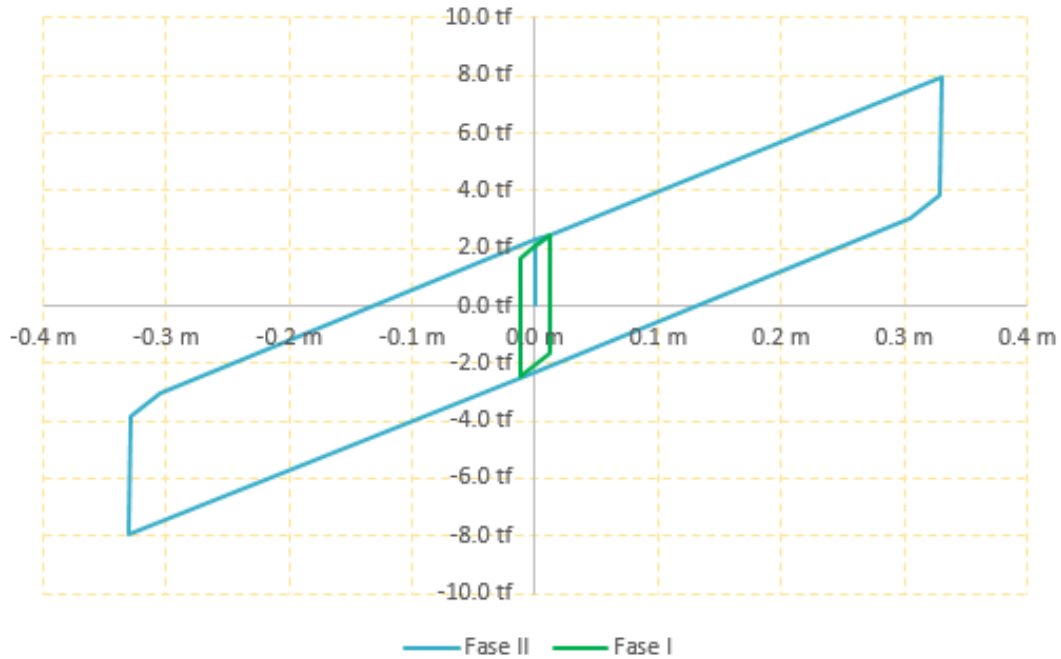


Figura 80. Curva Bilineal Histerética Aislador DFP - Tipo 3 (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia.

Con estas propiedades se asignan al modelo de ETABS según la distribución en planta mostrada a continuación en la Figura 81, que fue la configuración que arrojó los resultados más cercanos a los valores de parámetros objetivos y la conservación de la excentricidad natural en cero.

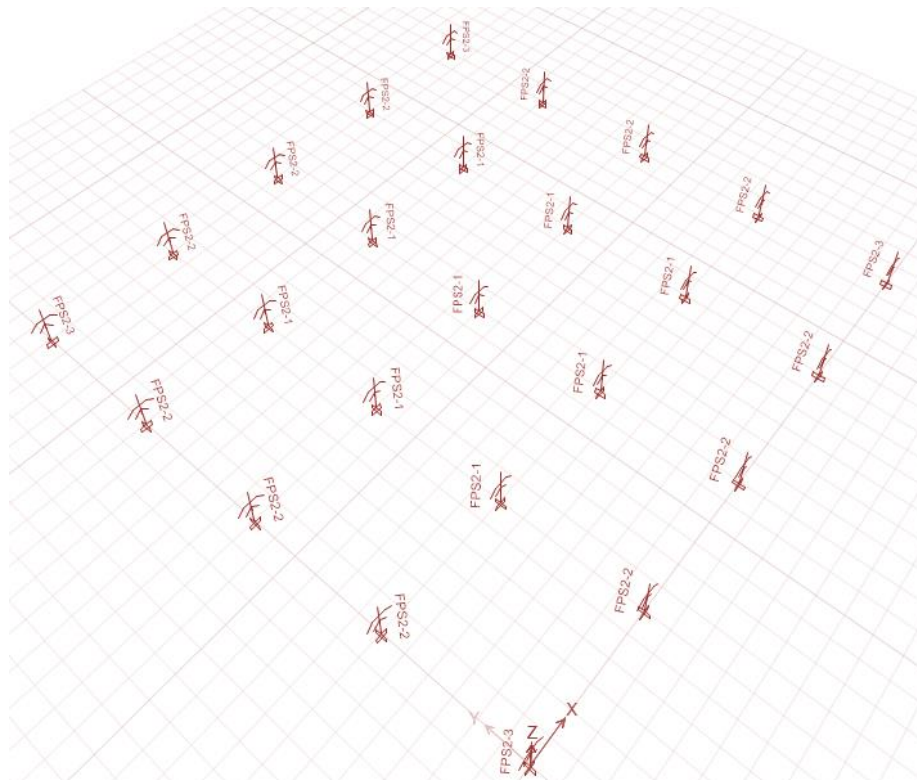


Figura 81. Distribución en Planta Aisladores tipo DFP (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia.

Diseño del Aislador Tipo TFPS o de tercera generación.

Se presentan los cálculos resumidos en tablas para los 3 tipos de aisladores por fricción de triple péndulo, que se calcularon según los valores de carga axial usando las ecuaciones que se relacionan a continuación.

Caso $\mu_1 = \mu_4 > \mu_2 = \mu_3$ y $R_{ef1} = R_{ef4}$ y $R_{ef2} = R_{ef3}$

$$R_{m\acute{a}x.} = 20D_M$$

$R_{ef.}$ = Valor colocado de radio efectivo aislador superficies 1, 2, 3 y 4

$$R_{ef2} = \frac{R_{ef1}}{8}$$

μ = Valor coeficiente de fricción de las superficies 1, 2, 3 y 4 del aislador

Fuerzas de fricción en cada plato

$$F_{f1} = \mu_1 \times P_{serv.}$$

$$F_{f2} = \mu_2 \times P_{serv.}$$

$$F_{f3} = \mu_3 \times P_{serv.}$$

$$F_{f4} = \mu_4 \times P_{serv.}$$

Capacidades de desplazamiento de cada interfase de deslizamiento:

$$d_{1,min}^* = M\acute{a}x \left\{ (\mu_4 - \mu_1) \times R_{ef1}; \frac{D_M}{4} \right\}$$

$$d_{1,max}^* = \left\{ \frac{D_M}{2} - (\mu_4 - \mu_3) \times R_{ef3} \right\}$$

$$d_1^* = d_4^* = Colocado$$

$$d_2^* = d_3^* = \frac{D_M}{2} - d_1^*$$

Fase ó Régimen 1 de movimiento: Deslizamiento en superficies 2 y 3.

Fuerza a vencer en el primer movimiento:

$$Q_{d1} = \mu_2 \times P_{serv.} = F_{f2}$$

Desplazamiento inicial en Fase 1:

$$u^* = (\mu_1 - \mu_2) \times R_{ef2} + (\mu_1 - \mu_3) \times R_{ef3} = 2(\mu_1 - \mu_2) \times R_{ef2}$$

Fuerza máxima en fase 1:

$$F_{m1} = F_{f1}$$

Energía disipada por ciclo:

$$EDC_1 = 2F_{m1}u^*$$

Fase ó Régimen 2 de movimiento: Movimiento en superficies 2 y 3 se detiene, deslizamiento en superficies 1 y 4.

Válido hasta alcanzar un desplazamiento:

$$u_{dr1} = u^* + d_1^* \left(1 + \frac{R_{ef4}}{R_{ef1}} \right) - (\mu_4 - \mu_1) \times (R_{ef1} + R_{ef4}) = u^* + 2d_1^*$$

Fuerza máxima en fase 2:

$$F_{m2} = F_{dr1} = \frac{P_{serv}}{R_{ef1}} d_1^* + F_{f1}$$

Rigidez efectiva:

$$K_{ef2} = \frac{F_{m2}}{u_{dr1}}$$

Energía disipada por ciclo:

$$EDC_2 = 4(F_{f2}u^* - F_{m2}u^* + F_{f1}u_{dr1})$$

Fase ó Régimen 3 de movimiento: Movimiento en superficies 1 y 4 alcanza su máximo posible y se detiene, deslizamiento restante en superficies 2 y 3 hasta alcanzar la máxima capacidad.

Desplazamiento máximo:

$$u_{max} = 2d_1^* + 2d_2^*$$

Fuerza máxima en fase 3:

$$F_{m3} = \frac{P_{serv}}{R_{ef2} + R_{ef3}} (u_{max} - u_{dr1}) + \frac{P_{serv}}{R_{ef4}} d_4^* + F_{f4}$$

$$F_{m3} = \frac{P_{serv}}{2R_{ef2}} (u_{max} - u_{dr1}) + \frac{P_{serv}}{R_{ef4}} d_4^* + F_{f4}$$

Se hace claridad que un péndulo de fricción triple puede trabajar en 5 fases, pero que en las fases 4 y 5 se presentan cambios abruptos en las rigideces, por ello se prefiere que el dispositivo funcione ya sea en fase II o fase III, considerando propiedades iguales para las superficies 2, 3 por un lado y las superficies 3, 4 por el otro.

Para esta última Fase 3 se computan los valores de las demás propiedades que resultan relevantes para la construcción de la curva histerética, balance de energía y modelación en ETABS.

Rigidez efectiva:

$$K_{ef} = \frac{F_{m3}}{u_{max}}$$

Rigidez post fluencia:

$$K_d = \frac{F_{m2} - F_{f1}}{u_{dr1} - u^*}$$

Resistencia característica:

$$Q_d = F_{f1} - K_d u^*$$

Energía disipada por ciclo:

$$EDC_3 = 2EDC_1 + EDC_2$$

Fuerza máxima:

$$F_m = F_{m3}$$

Fuerza para un desplazamiento igual a la mitad del máximo.

$$F_{0.5D_M} = \frac{P_{serv}}{2R_{ef1}} (0.5D_M - u^*) + F_{f1}$$

Fuerza de restitución:

$$F_R = F_m - F_{0.5D_M}$$

Desplazamiento de fluencia:

$$D_y = (\mu_1 - \mu_2) \times R_{ef2}$$

Rigidez superficies externas superior e inferior:

$$K_{ot} = K_{ob} = \frac{\mu_1 P_{serv}}{D_y}$$

Rigidez superficies internas superior e inferior:

$$K_{it} = K_{ib} = \frac{\mu_2 P_{serv}}{D_y}$$

	Tipo 3 FPS 3		Tipo 2 FPS 3		Tipo 1 FPS 3
μ_1	4.7%	μ_1	4.7%	μ_1	3.2%
μ_2	3.0%	μ_2	3.0%	μ_2	2.5%
μ_3	3.0%	μ_3	3.0%	μ_3	2.5%
μ_4	4.7%	μ_4	4.7%	μ_4	3.2%

Tipo 3 FPS 3			Tipo 2 FPS 3			Tipo 1 FPS 3		
DM	33.04	cm	DM	33.04	cm	DM	33.04	cm
20DM	6.61	m	20DM	6.61	m	20DM	6.61	m
R_{ef1}	2.40	m	R_{ef1}	2.40	m	R_{ef1}	2.40	m
R_{ef2}	0.30	m	R_{ef2}	0.30	m	R_{ef2}	0.30	m
R_{ef3}	0.30	m	R_{ef3}	0.30	m	R_{ef3}	0.30	m
R_{ef4}	2.40	m	R_{ef4}	2.40	m	R_{ef4}	2.40	m
R_{efmax}	3.30	m	R_{efmax}	3.30	m	R_{efmax}	3.30	m
P_{serv}	109.985	tf	P_{serv}	137.18	tf	P_{serv}	232.39	tf
P_{max}	173.20	tf	P_{max}	259.18	tf	P_{max}	396.66	tf
F _{f1}	5.17	tf	F _{f1}	6.45	tf	F _{f1}	7.44	tf
F _{f2}	3.30	tf	F _{f2}	4.12	tf	F _{f2}	5.81	tf
F _{f3}	3.30	tf	F _{f3}	4.12	tf	F _{f3}	5.81	tf
F _{f4}	5.17	tf	F _{f4}	6.45	tf	F _{f4}	7.44	tf
Fase 1			Fase 1			Fase 1		
F _{m1}	5.17	tf	F _{m1}	6.45	tf	F _{m1}	7.44	tf
u*	1.02	cm	u*	1.02	cm	u*	0.42	cm
E_{DC1}	0.11	tf-m	E_{DC1}	0.13	tf-m	E_{DC1}	0.0625	tf-m
Fase 2			Fase 2			Fase 2		
u _{dr1}	0.3004	m	u _{dr1}	0.3003	m	u _{dr1}	0.2943	m
K_{ef}	39.34	tf/m	K_{ef}	49.08	tf/m	K_{ef}	72.99	tf/m
F _{dr1}	11.82	tf	F _{dr1}	14.74	tf	F _{dr1}	21.48	tf
E_{DC2}	5.86	tf-m	E_{DC2}	7.31	tf-m	E_{DC2}	8.49	tf-m
E _E	1.78	tf-m	E _E	2.21	tf-m	E _E	3.16	tf-m
β	26.29%		β	26.29%		β	21.38%	
Fase 3			Fase 3			Fase 3		
u _{max}	0.3304	m	u _{max}	0.3304	m	u _{max}	0.3304	m
Q_d	4.94	tf	Q_d	6.16	tf	Q_d	7.23	tf
K_d	22.91	tf/m	K_d	28.58	tf/m	K_d	48.42	tf/m
K_{ef}	52.43	tf/m	K_{ef}	65.45	tf/m	K_{ef}	107.37	tf/m
F _{m3}	17.32	tf	F _{m3}	21.63	tf	F _{m3}	35.48	tf
E_{DC3}	6.07	tf-m	E_{DC3}	7.57	tf-m	E_{DC3}	8.62	tf-m
E _E	2.86	tf-m	E _E	3.57	tf-m	E _E	5.86	tf-m
β	16.89%		β	16.87%		β	11.70%	
Fuerza de restitución a DM			Fuerza de restitución a DM			Fuerza de restitución a DM		

Tipo 3 FPS 3			Tipo 2 FPS 3			Tipo 1 FPS 3		
F_{m3}	17.32	tf	F_{m3}	21.63	tf	F_{m3}	35.48	tf
$F_{0.5DM}$	8.72	tf	$F_{0.5DM}$	10.88	tf	$F_{0.5DM}$	15.23	tf
F_R	8.60	tf	F_R	10.75	tf	F_R	20.25	tf
Desplazamiento de fluencia			Desplazamiento de fluencia			Desplazamiento de fluencia		
D_y	0.0051	m	D_y	0.0051	m	D_y	0.0021	m
Rigidez superficies externas superior e inferior:			Rigidez superficies externas superior e inferior:			Rigidez superficies externas superior e inferior:		
$K_{ot} = K_{ob}$	1013.59	tf/m	$K_{ot} = K_{ob}$	1264.21	tf/m	$K_{ot} = K_{ob}$	3541.24	tf/m
$K_{it} = K_{ib}$	646.97	tf/m	$K_{it} = K_{ib}$	806.94	tf/m	$K_{it} = K_{ib}$	2766.60	tf/m

Tabla 16. . Propiedades calculadas para el aislador TFP para 3 tipos diferentes (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia.

Para cada tipo de aislador TFP se conforma su curva idealizada histerética que se muestran en la Figura 83, Figura 84 y Figura 85, con base en la información de los puntos de interés que se identifican en la Figura 82.

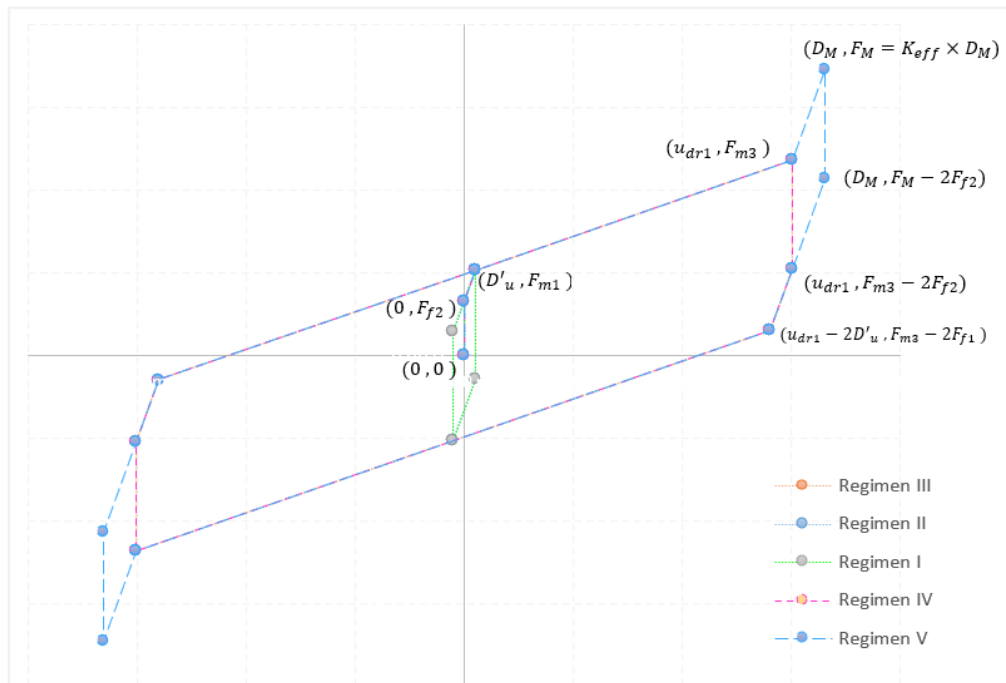


Figura 82. Puntos que definen la Curva Histerética Idealizada Aislador Tipo TFP. Fuente: Propia.

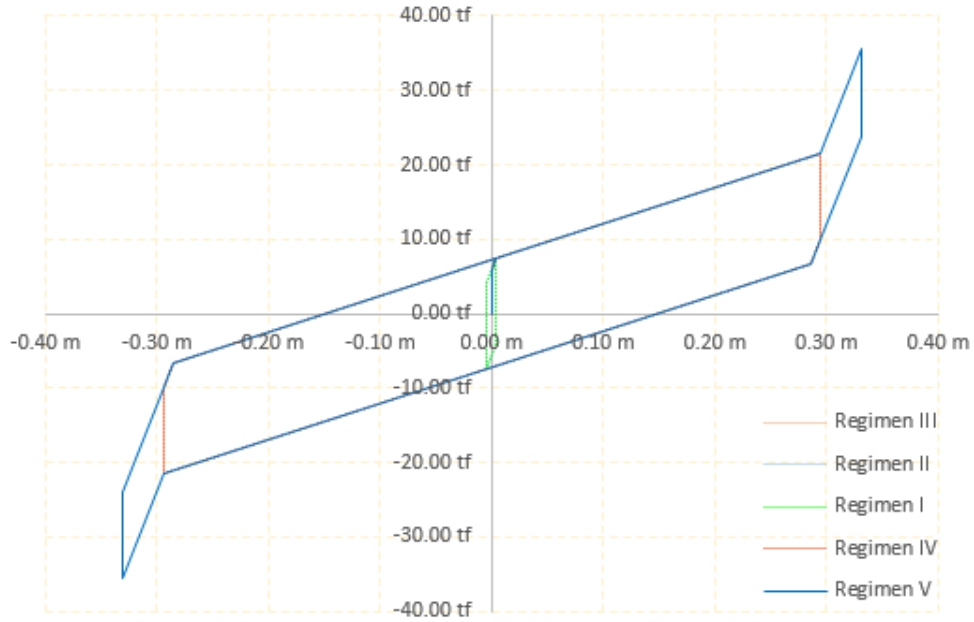


Figura 83. Curva Bilineal Histerética Aislador TFP - Tipo 1 (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia.

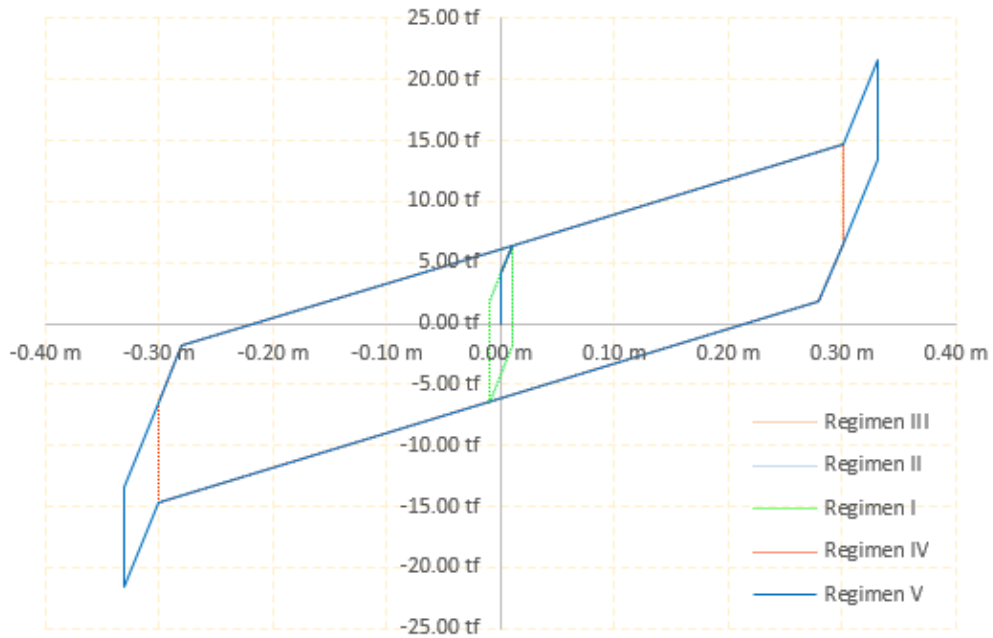


Figura 84. Curva Bilineal Histerética Aislador TFP - Tipo 2 (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia.

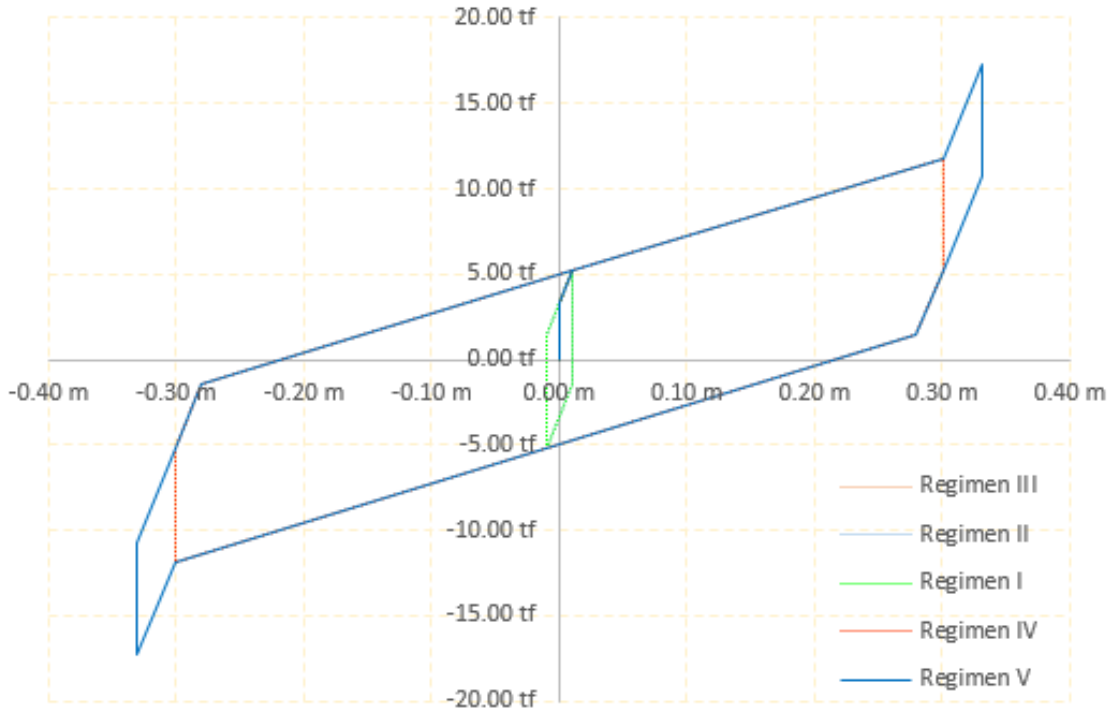


Figura 85. Curva Bilineal Histerética Aislador TFP - Tipo 3 (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia.

Con estas propiedades se asignan al modelo de ETABS según la distribución en planta mostrada a continuación en la Figura 86, que fue la configuración que arrojó los resultados más cercanos a los valores de parámetros objetivos y la conservación de la excentricidad natural en cero.

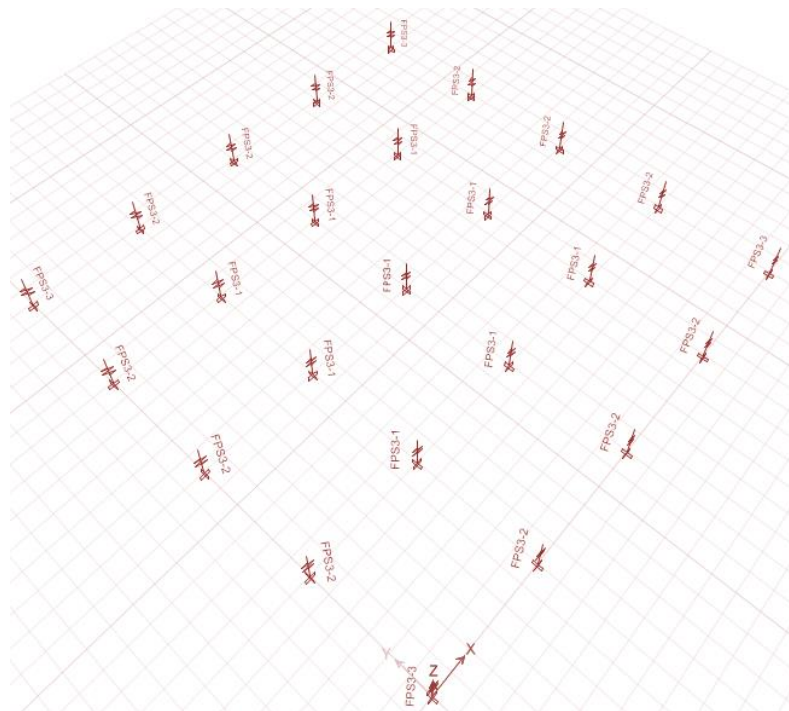


Figura 86. Distribución en Planta Aisladores tipo TFP (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia.

Microzona Lacustre 200.

S_{aM} 0.42 g Para TAIS = 3 s Aisladores tipo LRB y Deslizador SL

S_{aM} 0.315 g Para TAIS = 4 s Aisladores tipo FPS

De la Figura 87 se obtuvieron los valores anteriores con lecturas para periodos de 3 s y 4 s para el sismo máximo esperado.

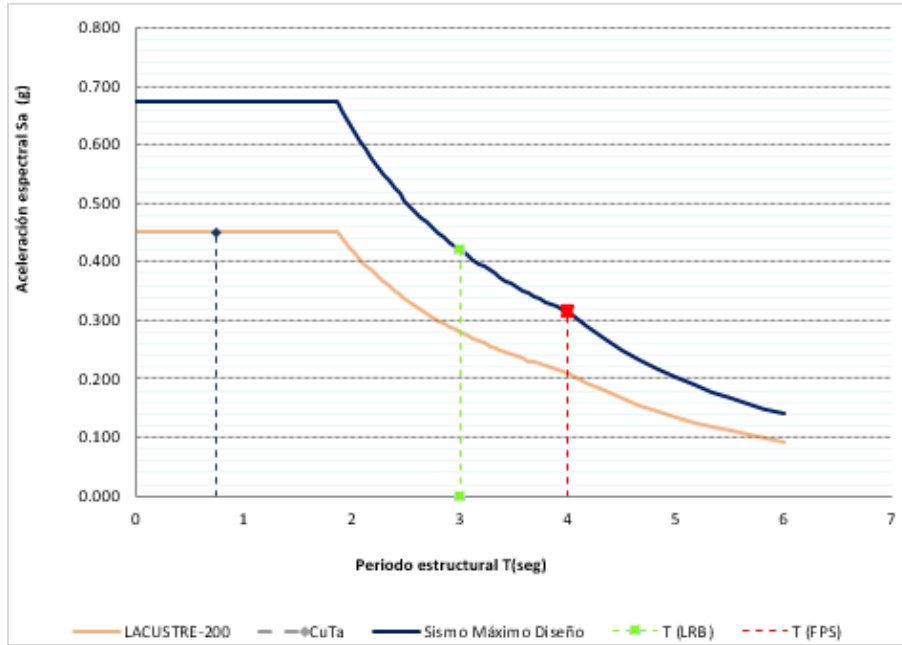


Figura 87. Espectros Elástico de Diseño y Sismo Máximo Lacustre 200 en fracción de g, determinación de S_{aM} . Fuente: Propia.

Se calcula entonces según la Ecuación 30, el desplazamiento lateral máximo

$$D_M = \frac{S_{aM} g (T_{Ais})^2}{4\pi^2 B_M}$$

Ecuación 30. Desplazamiento máximo para FHE

Aisladores tipo LRB y Deslizador SL.

D_M 51.75 cm Traslacional

D_{TM} 59.52 cm Para predimensionar (Incluye efectos Traslacionales y Torsionales) $D_{TM} = 1.15D_M$

Aisladores tipo FPS.

D_M 69.01 cm Traslacional

D_{TM} 79.36 cm Para predimensionar (Incluye efectos Traslacionales y Torsionales) $D_{TM} = 1.15D_M$

Siguiendo el proceso de predimensionamiento, se usarán las combinaciones:

Pservicio = $D + 0.5L$... Para prediseño de los dispositivos.

$P_{\text{máx.}} = 1.25 (D+L) + 1.0(E_H + E_V) + 0.2G$ Análisis de Estabilidad Dispositivos

$P_{\text{mín.}} = 0.9D - 1.0(E_H + E_V)$... Evitar tracciones en los dispositivos

Del modelado preliminar de la estructura con el valor de la rigidez efectiva promedio por aislador, el espectro correspondiente al sismo máximo y las combinaciones antes mencionadas, se obtienen los siguientes resultados para el modelo aislado. Se realiza el balance torsional, aunque la estructura es regular para comprobar que no existe excentricidad natural. Los valores para las coordenadas x e y se obtuvieron de la Figura 88.

Story	Joint Label	Unique Name	Load Case/Combo	FZ	X	Y	Keff	P*X	P*Y	Keff*X	Keff*Y
				tonf	m	m	tonf/m	tonf*m	tonf*m	tonf	tonf
Base	1	56	Pservicio=D+0.5L	82.79	0.00	0.00	60.26	0.00	0.00	0.00	0.00
Base	2	212	Pservicio=D+0.5L	133.50	0.00	6.00	60.26	0.00	800.98	0.00	361.54
Base	3	217	Pservicio=D+0.5L	137.18	0.00	12.00	60.26	0.00	1646.18	0.00	723.07
Base	4	222	Pservicio=D+0.5L	133.50	0.00	18.00	60.26	0.00	2402.95	0.00	1084.61
Base	5	227	Pservicio=D+0.5L	82.79	0.00	24.00	60.26	0.00	1986.95	0.00	1446.15
Base	6	63	Pservicio=D+0.5L	133.50	6.00	0.00	60.26	800.98	0.00	361.54	0.00
Base	7	213	Pservicio=D+0.5L	220.27	6.00	6.00	60.26	1321.63	1321.63	361.54	361.54
Base	8	218	Pservicio=D+0.5L	226.19	6.00	12.00	60.26	1357.16	2714.33	361.54	723.07
Base	9	223	Pservicio=D+0.5L	220.27	6.00	18.00	60.26	1321.63	3964.90	361.54	1084.61
Base	10	228	Pservicio=D+0.5L	133.50	6.00	24.00	60.26	800.98	3203.93	361.54	1446.15
Base	11	70	Pservicio=D+0.5L	137.18	12.00	0.00	60.26	1646.18	0.00	723.07	0.00
Base	12	214	Pservicio=D+0.5L	226.19	12.00	6.00	60.26	2714.33	1357.16	723.07	361.54
Base	13	219	Pservicio=D+0.5L	232.39	12.00	12.00	60.26	2788.73	2788.73	723.07	723.07
Base	14	224	Pservicio=D+0.5L	226.19	12.00	18.00	60.26	2714.33	4071.49	723.07	1084.61
Base	15	229	Pservicio=D+0.5L	137.18	12.00	24.00	60.26	1646.18	3292.35	723.07	1446.15
Base	16	77	Pservicio=D+0.5L	133.50	18.00	0.00	60.26	2402.95	0.00	1084.61	0.00
Base	17	215	Pservicio=D+0.5L	220.27	18.00	6.00	60.26	3964.90	1321.63	1084.61	361.54
Base	18	220	Pservicio=D+0.5L	226.19	18.00	12.00	60.26	4071.49	2714.33	1084.61	723.07
Base	19	225	Pservicio=D+0.5L	220.27	18.00	18.00	60.26	3964.90	3964.90	1084.61	1084.61
Base	20	230	Pservicio=D+0.5L	133.50	18.00	24.00	60.26	2402.95	3203.93	1084.61	1446.15
Base	21	84	Pservicio=D+0.5L	82.79	24.00	0.00	60.26	1986.95	0.00	1446.15	0.00
Base	22	216	Pservicio=D+0.5L	133.50	24.00	6.00	60.26	3203.93	800.98	1446.15	361.54
Base	23	221	Pservicio=D+0.5L	137.18	24.00	12.00	60.26	3292.35	1646.18	1446.15	723.07
Base	24	226	Pservicio=D+0.5L	133.50	24.00	18.00	60.26	3203.93	2402.95	1446.15	1084.61
Base	25	231	Pservicio=D+0.5L	82.79	24.00	24.00	60.26	1986.95	1986.95	1446.15	1446.15
			Σ	3966.12			1506.40	47593.43	47593.43	18076.86	18076.86

Tabla 17. Carga axial en los nodos de la base debido a la combinación $P_{\text{servicio Taislado}} = 3s$ (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia con Análisis en ETABS.

Story	Joint Label	Unique Name	Load Case/Combo	FZ	X	Y	Keff	P*X	P*Y	Keff*X	Keff*Y
				tonf	m	m	tonf/m	tonf*m	tonf*m	tonf	tonf
Base	1	56	Pservicio=D+0.5L	82.79	0.00	0.00	33.89	0.00	0.00	0.00	0.00
Base	2	212	Pservicio=D+0.5L	133.50	0.00	6.00	33.89	0.00	800.98	0.00	203.36
Base	3	217	Pservicio=D+0.5L	137.18	0.00	12.00	33.89	0.00	1646.18	0.00	406.73
Base	4	222	Pservicio=D+0.5L	133.50	0.00	18.00	33.89	0.00	2402.95	0.00	610.09
Base	5	227	Pservicio=D+0.5L	82.79	0.00	24.00	33.89	0.00	1986.95	0.00	813.46
Base	6	63	Pservicio=D+0.5L	133.50	6.00	0.00	33.89	800.98	0.00	203.36	0.00
Base	7	213	Pservicio=D+0.5L	220.27	6.00	6.00	33.89	1321.63	1321.63	203.36	203.36
Base	8	218	Pservicio=D+0.5L	226.19	6.00	12.00	33.89	1357.16	2714.33	203.36	406.73
Base	9	223	Pservicio=D+0.5L	220.27	6.00	18.00	33.89	1321.63	3964.90	203.36	610.09
Base	10	228	Pservicio=D+0.5L	133.50	6.00	24.00	33.89	800.98	3203.93	203.36	813.46
Base	11	70	Pservicio=D+0.5L	137.18	12.00	0.00	33.89	1646.18	0.00	406.73	0.00
Base	12	214	Pservicio=D+0.5L	226.19	12.00	6.00	33.89	2714.33	1357.16	406.73	203.36
Base	13	219	Pservicio=D+0.5L	232.39	12.00	12.00	33.89	2788.73	2788.73	406.73	406.73
Base	14	224	Pservicio=D+0.5L	226.19	12.00	18.00	33.89	2714.33	4071.49	406.73	610.09
Base	15	229	Pservicio=D+0.5L	137.18	12.00	24.00	33.89	1646.18	3292.35	406.73	813.46
Base	16	77	Pservicio=D+0.5L	133.50	18.00	0.00	33.89	2402.95	0.00	610.09	0.00
Base	17	215	Pservicio=D+0.5L	220.27	18.00	6.00	33.89	3964.90	1321.63	610.09	203.36
Base	18	220	Pservicio=D+0.5L	226.19	18.00	12.00	33.89	4071.49	2714.33	610.09	406.73
Base	19	225	Pservicio=D+0.5L	220.27	18.00	18.00	33.89	3964.90	3964.90	610.09	610.09
Base	20	230	Pservicio=D+0.5L	133.50	18.00	24.00	33.89	2402.95	3203.93	610.09	813.46
Base	21	84	Pservicio=D+0.5L	82.79	24.00	0.00	33.89	1986.95	0.00	813.46	0.00
Base	22	216	Pservicio=D+0.5L	133.50	24.00	6.00	33.89	3203.93	800.98	813.46	203.36
Base	23	221	Pservicio=D+0.5L	137.18	24.00	12.00	33.89	3292.35	1646.18	813.46	406.73
Base	24	226	Pservicio=D+0.5L	133.50	24.00	18.00	33.89	3203.93	2402.95	813.46	610.09
Base	25	231	Pservicio=D+0.5L	82.79	24.00	24.00	33.89	1986.95	1986.95	813.46	813.46
			Σ	3966.12			847.35	47593.43	47593.43	10168.23	10168.23

Tabla 18. Carga axial en los nodos de la base debido a la combinación Pservicio Taislado = 4 s (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia con Análisis en ETABS.

XCM	YCM	XCR	YCR
12	12	12	12
Excentricidad Natural		Se controla con la ubicación de los dispositivos	
e_x	0	m	
e_y	0	m	
Excentricidad Accidental		Reglamento NSR - 10	

e_x (5%)	1.2	m	
e_y (5%)	1.2	m	
Excentricidad Total			
e_x total	1.2	m	
e_y total	1.2	m	

Tabla 19. Centros de Masa y Rigidez - Cálculo de excentricidades Taislado = $3s$ y $4s$ (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia con Análisis en ETABS.

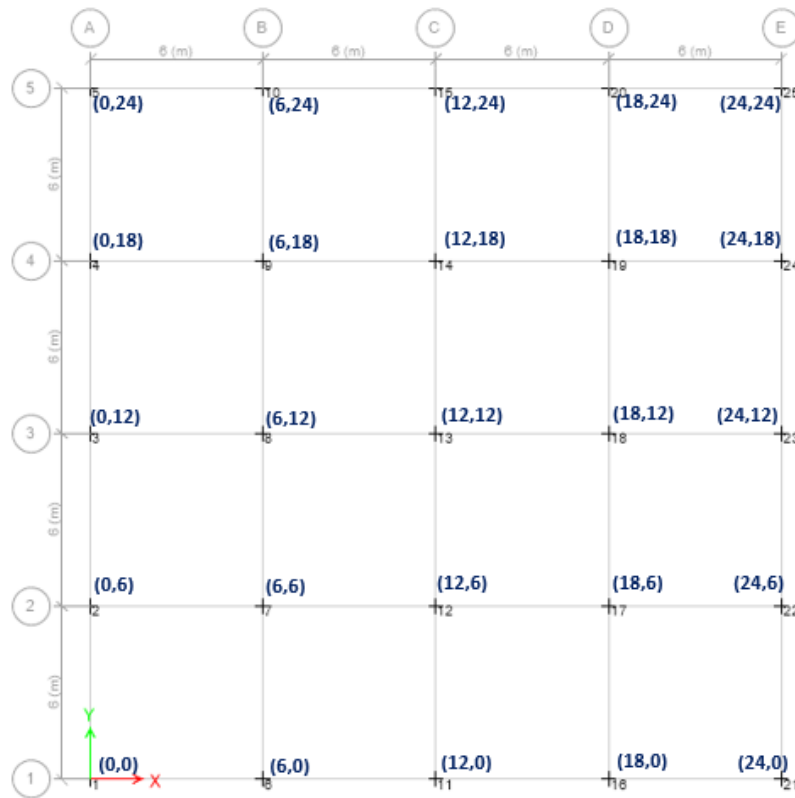


Figura 88. Localización Joints en planta. Fuente: Propia.

Del análisis se obtuvieron los siguientes valores para cargas axiales en los nodos ubicados en las esquinas, borde e interior para las combinaciones $P_{serv.}$, $P_{máx.}$ y $P_{mín.}$

	Interior	Borde	Esquina
$P_{serv.}$	232.4	137.2	82.8
$P_{máx.}$	396.7	304.6	231.0
$P_{mín.}$	107.9	-5.8	-49.9

Tabla 20. Valores de cargas axiales para diseño de Aisladores (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia con Análisis en ETABS.

Como se evidencia para la Microzona Lacustre 200, el menor valor de la combinación P_{min} fue de -49.9 tonf, por tanto, se presentan tracciones en los aisladores de esquina y borde, sin embargo, esto se debe a que se está usando lo indicado en la Norma Peruana que es muy conservadora al momento de considerar el sismo vertical como un porcentaje muy alto de la carga muerta (33.75%D), si se siguiera lo expresado en el ASCE 07-16 (American Society of Civil Engineers, 2017) en cuanto a la inclusión del sismo vertical en las combinaciones se estaría usando alrededor de 9% del valor de carga muerta; en la NSR-10 (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA , 2017) no se tiene una expresión explícita aún para el cálculo del componente vertical del sismo, pero se dan unas indicaciones de porcentajes entre el 15% y 30% para voladizos dependiendo de la sismicidad de la zona o tomarlo como 2/3 del espectro de máximo de diseño de los movimientos horizontales. Se continuará con el proceso por ahora, para evitar cambiar a secciones más robustas de columnas y vigas, se verificarán las tracciones más adelante, en la respuesta local de los aisladores con respecto a los análisis tiempo historia no lineales.

A continuación, se muestra el cálculo de parámetros adicionales para el diseño de la superestructura y del sistema de aislamiento, usando las fórmulas ya mencionadas anteriormente.

Rigidez elástica edificación fija

$$K_{sx} = 13120.66 \text{ tonf/m}$$

$$K_{sy} = 13120.66 \text{ tonf/m}$$

Fuerza sísmica lateral del sistema de aislamiento (Cortante sistema de aislamiento).

Para $T_{aislado} = 3 \text{ s}$

$$V_b = 779.63 \text{ tonf}$$

Para $T_{aislado} = 4 \text{ s}$

$$V_b = 584.72 \text{ tonf}$$

Que corresponde aproximadamente a un 23.14% del peso total de la edificación.

Fuerza cortante no reducida de la superestructura

Para $T_{aislado} = 3 \text{ s}$

$$V_{st} = 748.92 \text{ tonf}$$

Para $T_{aislado} = 4 \text{ s}$

$$V_{st} = 561.69 \text{ tonf}$$

Valor del coeficiente de reducción

$$R_0 = 5.00$$

$$R_a = 1.875$$

Fuerza cortante reducida de la superestructura

Para $T_{\text{aislado}} = 3 \text{ s}$
 $V_s = 399.42 \text{ tonf}$

Para $T_{\text{aislado}} = 4 \text{ s}$
 $V_s = 299.57 \text{ tonf}$

Cortante Base Fija

Para $T_{\text{aislado}} = 3 \text{ s}$
 $V_f = 240.96 \text{ tonf}$

Para $T_{\text{aislado}} = 4 \text{ s}$
 $V_f = 180.72 \text{ tonf}$

Diseño del Aislador Tipo LRB.

Para las cargas de servicio y máxima con los valores más altos correspondientes a las de los nodos de columnas interiores se diseña el primer tipo de aislador. Se escoge un aislador circular porque tiene las mismas propiedades en todas las direcciones.

Aislador LRB - 1

Demandas

$P_{\text{serv.}}$ 110.0 tonf - Se usó un valor promedio de las cargas axiales de borde y esquina.
 $P_{\text{máx.}}$ 304.6 Tonf – Se usó el valor máximo entre la carga axial de borde y esquina

Propiedades Materiales

τ_{py} 800 tonf/m² Esfuerzo de fluencia del Plomo
 K 200000 tonf/m² Módulo volumétrico de la goma
 G 50 tonf/m² Módulo de Corte de la Goma
 σ_{adm} 1000 tonf/m² Esfuerzo axial permisible del Aislador (aproximado, fabricante)
 f 4 Proveedor, valor recomendado
 k 0.75 Depende de G (Valores de referencia 0.65 - 0.9)
 E_0 200 tonf/m² $E_0 = fG$ Módulo elástico de la goma
 E_c 208960.4 tonf/m² $E_c = E_0(1 + 2kS^2)$ Módulo de compresión del aislador

Características de los aisladores

Espesor de lámina

t_r 0.8 cm

Cantidad de láminas y espesor de la goma

N 30 un
 T_r 24 cm

Recubrimiento

$$C_s = 1.5 \text{ cm}$$

Cálculo del diámetro mínimo del aislador

$$D_0 > 1.5D_{TM} = 89.28 \text{ cm}$$

$$A > \frac{P_{serv}}{\sigma_{m\acute{a}x}} = 0.11 \text{ m}^2$$

$$D_0 > \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = 0.374 \text{ m} \approx 37.4 \text{ cm}$$

Se asume un diámetro de 90 cm luego de realizar iteraciones para cumplir los requerimientos en cuanto a cargas axiales y deformaciones por corte.

$$D_0 = 90 \text{ cm}$$

Diámetro del núcleo de plomo

$$\text{Se debe cumplir que: } \frac{D_0}{6} < D_i < \frac{D_0}{3}$$

$$\frac{90 \text{ cm}}{6} < D_i < \frac{90 \text{ cm}}{3}$$

$$15 \text{ cm} < D_i < 30 \text{ cm}$$

Se escogió como diámetro del núcleo de plomo $D_i = 15 \text{ cm}$.

Se establece el valor del recubrimiento C_s de 1.5 cm para la protección de las placas de acero de los efectos ambientales. El diámetro efectivo del aislador será entonces:

$$D_e = D_0 - 2C_s = 90 \text{ cm} - 3 \text{ cm} = 87 \text{ cm}.$$

Ahora se calculan las diferentes áreas necesarias para hallar los demás parámetros.

$A_a = 0.636 \text{ m}^2$	<p>Área del aislador (A_a): Área transversal del aislador, se calcula con base en el diámetro D_0.</p> $A_a = \frac{\pi}{4} (D_0)^2$
$A_n = 0.577 \text{ m}^2$	<p>Área neta (A_n): Considera el área transversal que corresponde a la goma, es decir el diámetro sin considerar el núcleo de plomo ni el recubrimiento.</p> $A_n = A_e - A_p$

$A_g = 0.619$ m^2	<p>Área goma (A_g): Considera el área transversal de la goma del aislador, tomando el diámetro sin considerar el núcleo de plomo. Equivale al área total menos el área del núcleo de plomo.</p> $A_g = A_a - A_p$
$A_p = 0.018$ m^2	<p>Área del núcleo de plomo (A_p): Área transversal correspondiente al núcleo de plomo.</p> $A_p = \frac{\pi}{4}(D_i)^2$
$A_e = 0.594$ m^2	<p>Área efectiva aislador (A_e): Área transversal correspondiente al diámetro efectivo del aislador (sin recubrimiento).</p> $A_e = \frac{\pi}{4}(D_e)^2$

Tabla 21. Áreas paramétricas del aislador LRB (Microzona Lacustre 200).
Fuente: Propia.

Cuando el aislador se deforma y alcanza el desplazamiento máximo total, el área de la goma que resiste la carga axial máxima se ve reducida como se muestra a continuación.

$$A_R = 0.129 \quad m^2$$

Que representa una reducción de

$$\frac{A_R(\Delta)}{A_g} = 20.9\%$$

Para esa área reducida el aislador puede soportar una carga crítica de pandeo de:

$$S = 26.38$$

$$P_{crit.} = 684.9 \quad \text{tonf}$$

Se calcula el factor de seguridad.

$$FS = \frac{P_{cr}}{P_{máx}} = 2.2$$

El cual es mayor que el factor de seguridad recomendado de 1.1.

Se comprobarán ahora las deformaciones por corte:

Deformación por corte debido a deformación:

$$\gamma_D = \frac{D_{TM}}{T_r} = 2.48 \leq 2.5$$

Deformación por corte debido a compresión:

$$\gamma_C = \frac{6 \times P \times S}{E_c \times A_R} = 1.79$$

Deformación por corte debido a deformación angular:

$$\gamma_\theta = \frac{0.375 \times D_e^2 \times \theta}{t_r \times T_r} = 0.44$$

Donde θ se tomó como 0.003 radianes, valor mínimo permisible.

La deformación total por corte corresponderá a la suma de los aportes de los 3 parámetros anteriores.

$$\gamma_T = \gamma_D + \gamma_C + 0.5\gamma_\theta = 2.48 + 1.79 + 0.5 \times 0.443 = 4.49$$

Se compara con el valor límite de 6, y se calcula el factor de seguridad que debe ser mayor que 1.1.

$$FS = \frac{6}{4.49} = 1.34 > 1.1$$

El aislador cumple por carga crítica y por deformaciones por cortante, el diámetro obtenido fue el resultado de iteraciones hasta satisfacer los criterios anteriores.

Cálculo de los parámetros para el análisis no lineal del aislador, propiedades histeréticas.

Rigidez Post Fluencia

$$K_2 = K_d = 128.85 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

Resistencia Característica o Fuerza histerética

$$Q_d = 14.14 \text{ tonf}$$

Rigidez inicial o elástica

$$K_1 = 1288.54 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

Fuerza de fluencia

$$F_y = 15.71 \text{ tonf}$$

Desplazamiento de fluencia

$$D_y = 0.0122\text{m} = 1.22 \text{ cm}$$

Rigidez efectiva

$$K_{ef} = 156.17 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

Se observa un aumento de rigidez de 2.6 veces con respecto al cálculo inicial.

Energía disipada por ciclo

$$EDC = 28.58 \text{ tonf} \cdot \text{m}$$

Fuerza de restitución para un desplazamiento igual a $0.5D_M$

$$F_R = 33.34 \text{ tonf}$$

Con estos datos se construye el diagrama histerético idealizado para el aislador tipo LRB – 1 que se muestra en la Figura 89.

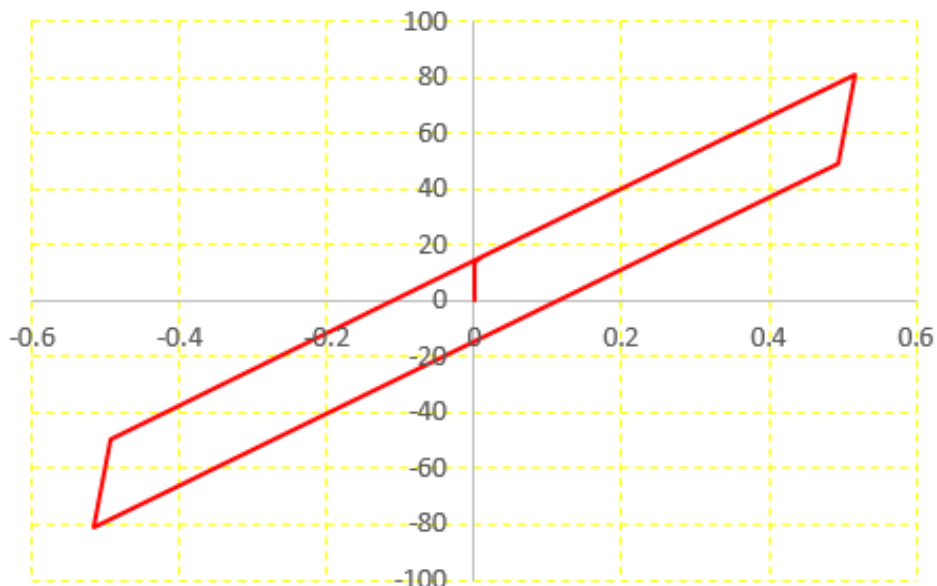


Figura 89. Curva Bilineal Histerética Aislador LRB – 1 (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia.

En orden de poder realizar un buen balance torsional y adecuada distribución de los aisladores en planta, así como también la disminución de la fuerza de restitución y rigidez del sistema, se necesitó la incorporación de deslizadores.

Deslizador SL

Demandas

Pserv. 232.4 tonf

Pmáx. 396.7 tonf

Propiedades Materiales

$\mu = 7\%$

Características Deslizador

$Q_d = 16.27$ tonf

$F_y = 16.27$ tonf

$K_{ef.} = 31.43$ tonf/m

EDC = 33.68 tonf*m

$F_R = 0.00$ tonf No presenta

Con estos datos se construye el diagrama histerético idealizado para el deslizador tipo SL.

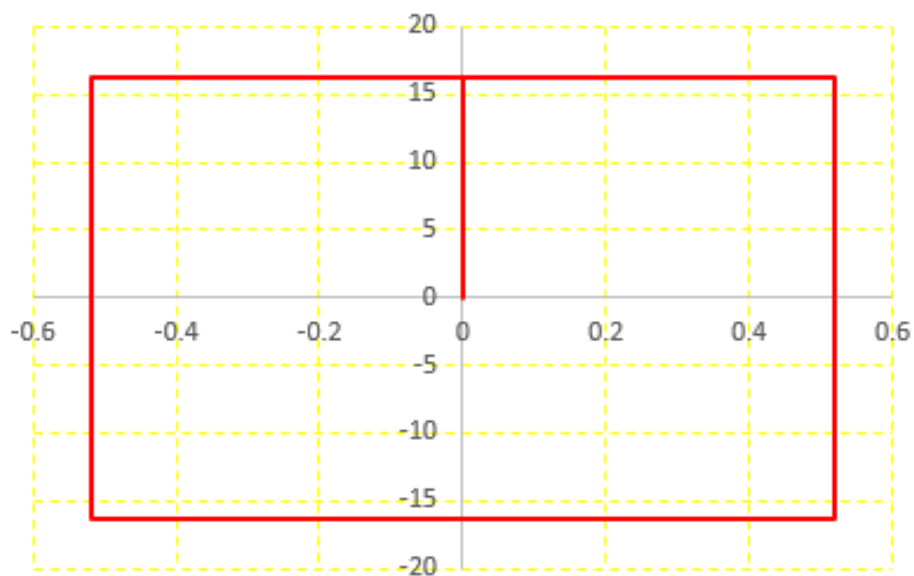


Figura 90. Curva Bilineal Histerética Deslizador SL (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia.

Con estas propiedades se asignan al modelo de ETABS según la distribución en planta mostrada a continuación en la Figura 91, que fue la configuración que arrojó los resultados más cercanos a los valores de parámetros objetivos y la conservación de la excentricidad natural en cero.

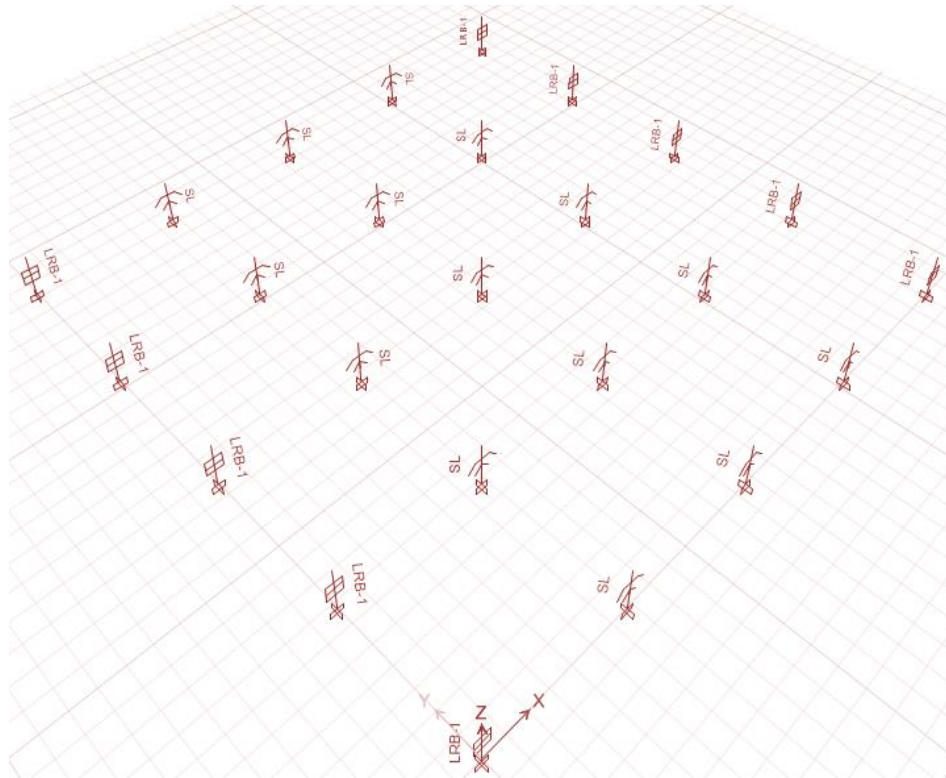


Figura 91. Distribución en Planta Aisladores tipo LRB y deslizador SL (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia.

Diseño del Aislador Tipo HDR.

Aislador HDR - 1

Demandas

Pserv. 232.4 tonf

Pmáx. 396.7 tonf

Propiedades Materiales

τ_{py}	800 tonf/m ²	Esfuerzo de fluencia del Plomo
K	200000 tonf/m ²	Módulo volumétrico de la goma
G	37 tonf/m ²	Módulo de Corte de la Goma
σ_{adm}	850 tonf/m ²	Esfuerzo axial permisible del Aislador (aproximado, fabricante)
f	4	Proveedor, valor recomendado
k	0.85	Depende de G (Valores de referencia 0.65 - 0.9)
$\sigma_{adm,s}$	18000 tonf/m ²	$\sigma_{adm,s} = 0.75\sigma_y$ Módulo elástico de la goma
σ_y	24000 tonf/m ²	Esfuerzo de fluencia acero de placas

Características de los aisladores

Espesor de lámina goma

t_r 0.8 cm

Espesor de lámina acero

$$t_s = 0.3 \text{ cm}$$

$$\sigma_s = 1.5 \frac{t_r}{t_s} \sigma_{adm}$$

$$\sigma_s = 4000 \text{ tonf/m}^2$$

$$\sigma_s < \sigma_{adm,s}$$

Cantidad de láminas y espesor de la goma

$$N = 36 \text{ un}$$

$$T_r = 28.8 \text{ cm}$$

Cantidad de láminas y espesor de las placas de acero

$$(N-1) = 35 \text{ un}$$

$$T_s = 10.5 \text{ cm}$$

Altura aislador

$$H_{ef} = T_r + T_s = 39.3 \text{ cm}$$

$$H_T = H_{ef} + 2 \times 2 \text{ cm} = 43.3 \text{ cm}$$

Recubrimiento

$$C_s = 1.5 \text{ cm}$$

Cálculo del diámetro mínimo del aislador

$$D_0 > 1.5 D_{TM} = 89.28 \text{ cm}$$

$$A > \frac{P_{max}}{\sigma_{adm}} = 0.467 \text{ m}^2$$

$$D_0 > \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = 0.771 \text{ m} \approx 77.1 \text{ cm}$$

Se asume un diámetro de 95 cm luego de realizar iteraciones para cumplir los requerimientos en cuanto a cargas axiales y deformaciones por corte.

$$D_0 = 95 \text{ cm}$$

Diámetro de la sección anular

Se debe cumplir que: $\frac{D_0}{6} < D_i < \frac{D_0}{3}$

$$\frac{95 \text{ cm}}{6} < D_i < \frac{95 \text{ cm}}{3}$$

$$15.8 \text{ cm} < D_i < 31.7 \text{ cm}$$

Se escogió como diámetro de la sección anular de $D_i = 16 \text{ cm}$.

Se establece el valor del recubrimiento C_s de 1.5 cm para la protección de las placas de acero de los efectos ambientales. El diámetro efectivo del aislador será entonces:

$$D_e = D_0 - 2C_s = 95 \text{ cm} - 3 \text{ cm} = 92 \text{ cm}.$$

Cálculo de la rigidez y frecuencia vertical

$$K_v = \frac{E_c A}{T_r}$$

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{6GS^2} + \frac{4}{3K}$$

$$S = \frac{D_e - D_i}{4t_r} > 10$$

$$S \quad 23.75$$

$$E_c \quad 68247.78 \quad \text{tonf/m}^2$$

$$K_v \quad 110585.26 \quad \text{tonf/m}$$

$$f_v = \sqrt{6S} f_h \geq 10 \text{ Hz}$$

$$f_v \quad 19.4 \quad \text{Hz}$$

Deformación angular máxima.

$$\gamma_{\text{máx}} = \gamma_s + \gamma_c + \gamma_b \approx \gamma_s + \gamma_c \leq 3.12 \text{ para un } FS \geq 1.5$$

$$\gamma_s = \frac{D_{TM}}{T_r}$$

$$\gamma_s \quad 2.07$$

$$\gamma_c = 6S\varepsilon_c$$

$$\varepsilon_c = \frac{P_{max}}{AE_0(1 + 2kS^2)}$$

$$E_0 = fG$$

$$E_0 \quad 148 \quad \text{tonf/m}^2$$

$$\varepsilon_c \quad 0.00598$$

$$\gamma_c \quad 0.85$$

$$\gamma_{max} \quad 2.92 < 3.12$$

Verificación al pandeo

$$P_{crit} = \frac{P_s}{2} \left(\sqrt{1 + 4 \frac{P_E}{P_s}} - 1 \right)$$

Cálculo de P_s o rigidez de corte efectiva

$$P_s = GA_s$$

Ahora se calcula el área de corte efectiva A_s .

$$A_s = A \frac{H_{ef}}{T_r}$$

$$A_s \quad 0.637 \quad \text{m}^2$$

$$P_s \quad 23.56 \quad \text{tonf}$$

La carga de pandeo P_E

$$P_E = \frac{\pi^2 (EI)_{ef}}{(H_{ef})^2}$$

Cálculo de la rigidez a la inclinación

$$(EI)_{ef} = \frac{1}{3} E_c I$$

$$I = \frac{\pi}{4} \left[\left(\frac{D_e}{2} \right)^4 - \left(\frac{D_i}{2} \right)^4 \right]$$

$$I \quad 0.035 \quad \text{m}^4$$

$(EI)_{ef}$	799.3 tonf.m ²
P_E	51074.68 tonf
$P_{crit.}$	1085.28 tonf

$$FS = \frac{P_{crit}}{P_{max}} > 2$$

$$FS = 2.7$$

Verificación al volcamiento

$$D_{max} = \frac{P_{min}D_0}{P_{min} + K_{ef}H_{ef}}$$

$$FS = \frac{D_{max}}{D_M} > 2$$

P_{min}	107.86
D_{max}	0.7796
FS	1.5

Es importante que la conexión del aislador sea fija y pernada para evitar el volcamiento y no depender de este chequeo.

Desplazamiento de fluencia

D_y	0.0288 m	$D_y = 0.1T_r$
-------	----------	----------------

ξ	0.15
-------	------

Energía disipada por ciclo

$$EDC = 2\pi K_{ef} D_M^2 \xi$$

EDC	15.13 tonf.m
-----	--------------

Resistencia Característica

$$Q_d = \frac{EDC}{4(D_M - D_y)}$$

Q_d	7.74 tonf
-------	-----------

Rigidez Post Fluencia

$$K_2 = K_{ef} - \frac{Q_d}{D_M}$$

K_2 45.0 tonf/m

Rigidez inicial o elástica

$$K_1 = \frac{Q_d}{D_y} + K_2$$

K_1 313.8 tonf/m

Fuerza de fluencia

$$F_y = Q_d + K_2 D_y$$

F_y 9.04 tonf

Rigidez efectiva

$$K_{ef} = 59.95 \frac{tonf}{m}$$

Fuerza máxima para un desplazamiento igual a D_M

$$F_m = K_{ef} D_M$$

F_m 31.03 tonf

Fuerza de restitución para un desplazamiento igual a $0.5D_M$

$$F_R = 11.64 \text{ tonf}$$

Se construye un modelo bilineal para este tipo de aislador HDR aclarando que no representa un comportamiento tan acertado debido a las características de los materiales usados para lograr el alto amortiguamiento, lo que conlleva a relaciones esfuerzos de corte y deformación unitaria no lineales, y endurecimiento cuando se excede el 200% de la deformación unitaria a cortante. Estas consideraciones se tienen en cuenta en el modelo matemático desarrollado en versiones ETABS V17 y posteriores del elemento nonlinear link High Damping Rubber Isolator, donde se solicitan unos parámetros adicionales para incluir estos efectos, para el modelado matemático se usaran los siguientes proporcionados por la manufacturera Bridgestone para el estudio desarrollado por (MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH CENTER, 2020).

Table 6. Material input parameters for DHI model

Property	Nominal	UB	LB
Added Elastic Stiffness - G_e (MPa)	0.5257	0.8136	0.5262
Control Strength 1 - g_1 (MPa)	2.468	3.364	1.999
Control Strength 2 - g_2 (MPa)	0.3564	0.4858	0.2887
Control Strain 1 - l_1	0.03591	0.03591	0.03591
Control Strain 2 - l_2	0.5	0.5	0.5
Resistance Ratio - θ	0.4598	0.4598	0.4598
Damage Parameter - γ_a	0.4181	0.4181	0.4181

Figura 92. Parámetros adicionales modelado HDR ETABS V19. Fuente: (MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH CENTER, 2020)

Con estos datos se construye el diagrama histerético idealizado para el aislador tipo HDR – 1, que se muestra en la Figura 93.

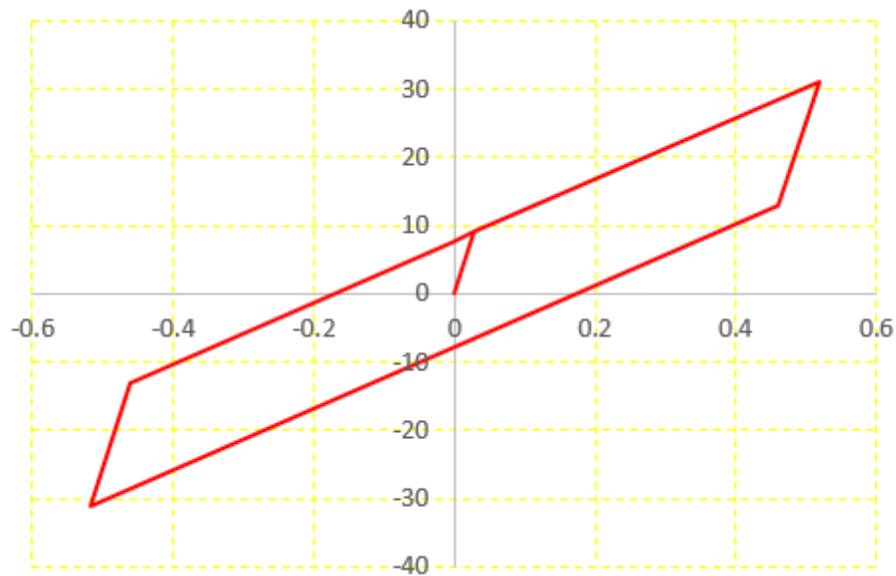


Figura 93. Curva Bilineal Histerética Aislador HDR – 1 (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia

Con estas propiedades se asignan al modelo de ETABS según la distribución en planta mostrada a continuación en la Figura 94, que fue la configuración que arrojó los resultados más cercanos a los valores de parámetros objetivos y la conservación de la excentricidad natural en cero.

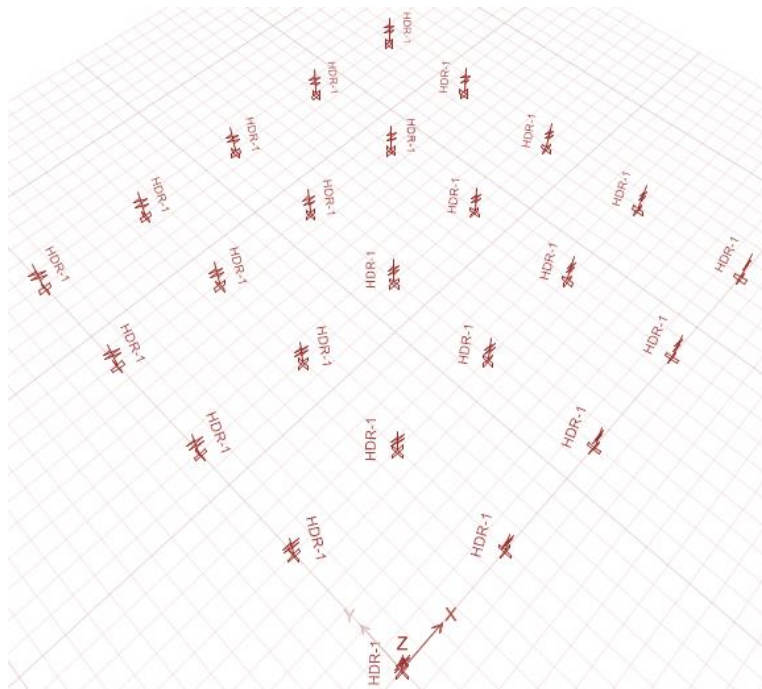


Figura 94. Distribución en Planta Aisladores tipo HDR (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia.

Diseño del Aislador Tipo FPS o de primera generación.

Tipo 3 FPS 1			Tipo 2 FPS 1			Tipo 1 FPS 1		
$\mu 1$	6.0%		$\mu 1$	2.0%		$\mu 1$	4.0%	
DM	69.01	cm	DM	69.01	cm	DM	69.01	cm
$R_{\max: 20DM}$	13.80	m	$R_{\max: 20DM}$	13.80	m	$R_{\max: 20DM}$	13.80	m
R_{ef}	7.0	m	R_{ef}	7.0	m	R_{ef}	7.0	m
R_{\min}	4.0	m	R_{\min}	4.0	m	R_{\min}	4.0	m
P_{serv}	82.79	tonf	P_{serv}	137.18	tf	P_{serv}	232.39	tf
P_{\max}	231.03	tonf	P_{\max}	304.64	tf	P_{\max}	396.66	tf
F_f	4.97	tonf	F_f	2.74	tf	F_f	9.30	tf
Fase 1			Fase 1			Fase 1		
Q_d	4.97	tonf	Q_d	2.74	tonf	Q_d	9.30	tonf
K_d	11.83	tonf/m	K_d	19.60	tonf/m	K_d	33.20	tonf/m
K_{ef}	19.03	tonf/m	K_{ef}	23.57	tonf/m	K_{ef}	46.67	tonf/m
EDC	13.71	tonf-m	EDC	7.57	tonf-m	EDC	25.66	tonf-m
$F_{m(0.5DM)}$	9.05	tonf	$F_{m(0.5DM)}$	9.51	tonf	$F_{(0.5DM)}$	20.75	tonf
F_R	4.08	tonf	F_R	6.76	tonf	F_R	11.45	tonf
F_m	13.13	tonf	F_m	16.27	tonf	F_m	32.21	tonf

Tabla 22. Propiedades calculadas para el aislador FPS Simple para 3 tipos diferentes (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia.

Para cada tipo de aislador FPS simple se conforma su curva idealizada histerética que se muestran en la Figura 95, Figura 96 y Figura 97.

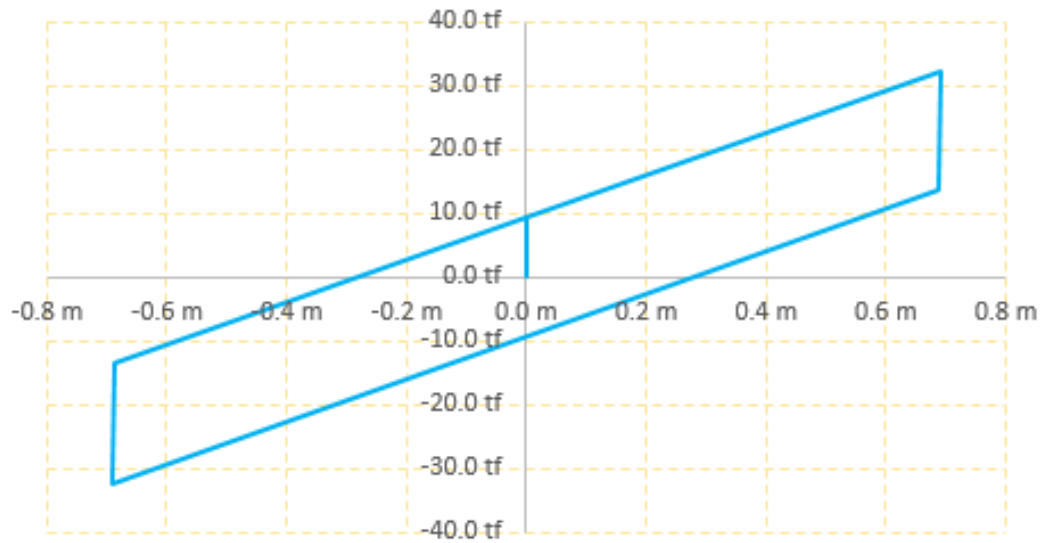


Figura 95. Curva Bilineal Histerética Aislador FPS-1 Tipo 1 (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia.

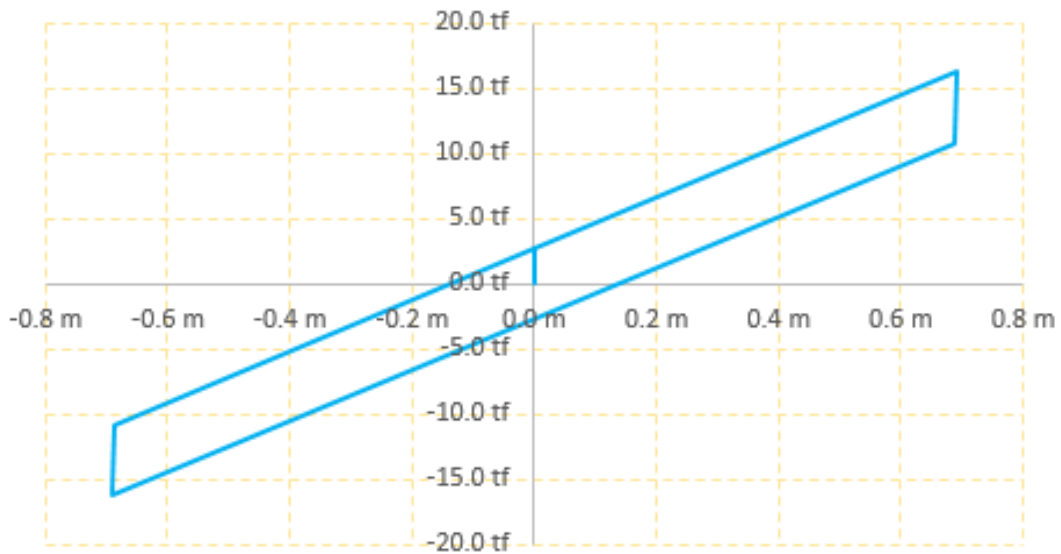


Figura 96. Curva Bilineal Histerética Aislador FPS-1 Tipo 2 (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia.

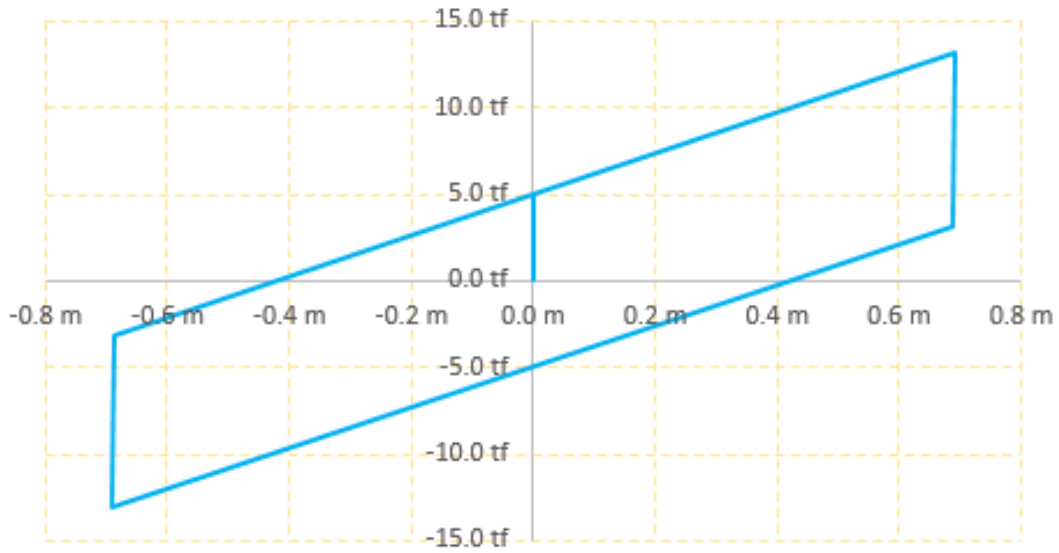


Figura 97. Curva Bilineal Histerética Aislador FPS-1 Tipo 3 (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia.

Con estas propiedades se asignan al modelo de ETABS según la distribución en planta mostrada a continuación en la Figura 98, que fue la configuración que arrojó los resultados más cercanos a los valores de parámetros objetivos y la conservación de la excentricidad natural en cero.

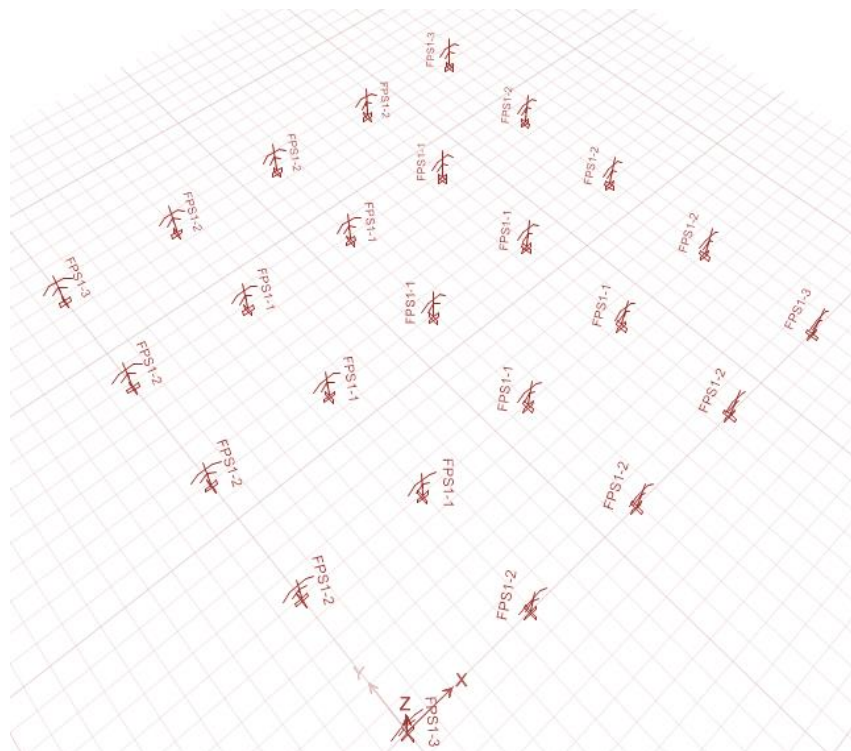


Figura 98. Distribución en Planta Aisladores tipo FPS (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia.

Diseño del Aislador Tipo DFPS o de segunda generación.

Tipo 3 FPS 2			Tipo 2 FPS 2			Tipo 1 FPS 2		
μ_1	3.0%		μ_1	3.0%		μ_1	3.5%	
μ_2	4.0%		μ_2	4.0%		μ_2	5.0%	
μ_e	3.5%		μ_e	3.5%		μ_e	4.25%	
DM	69.01	cm	DM	33.04	cm	DM	33.04	cm
20DM	13.80	m	20DM	6.61	m	20DM	6.61	m
R_{ef1}	3.50	m	R_{ef1}	3.50	m	R_{ef1}	3.50	m
R_{ef2}	3.50	m	R_{ef2}	3.50	m	R_{ef2}	3.50	m
R_{efmin}	2.0	m	R_{efmin}	2.0	m	R_{efmin}	2.0	m
R_{efmax}	6.90	m	R_{efmax}	6.90	m	R_{efmax}	6.90	m
P_{serv}	82.79	tf	P_{serv}	137.18	tf	P_{serv}	232.39	tf
P_{max}	231.03	tf	P_{max}	304.64	tf	P_{max}	396.66	tf
F_{f1}	2.48	tf	F_{f1}	4.12	tf	F_{f1}	8.13	tf
F_{f2}	3.31	tf	F_{f2}	5.49	tf	F_{f2}	11.62	tf
Fase 1			Fase 1			Fase 1		
F_{f1}	2.48	tf	F_{f1}	4.12	tf	F_{f1}	8.13	tf
D'_u	3.50	cm	D'_u	3.50	cm	D'_u	5.25	cm
Fase 2			Fase 2			Fase 2		
F_{f2}	3.31	tf	F_{f2}	5.49	tf	F_{f2}	11.62	tf
Q_d	2.90	tf	Q_d	4.80	tf	Q_d	9.88	tf
K_d	11.83	tf/m	K_d	19.60	tf/m	K_d	33.20	tf/m
K_{ef}	16.03	tf/m	K_{ef}	26.56	tf/m	K_{ef}	47.51	tf/m
F	11.06	tf	F	18.32	tf	F	32.79	tf
E_{DC}	8.00	tf-m	E_{DC}	13.25	tf-m	E_{DC}	27.26	tf-m
E_E	3.82	tf-m	E_E	6.32	tf-m	E_E	11.31	tf-m
β	16.68%		β	16.68%		β	19.18%	
Desplazamientos en las superficies 1 y 2			Desplazamientos en las superficies 1 y 2			Desplazamientos en las superficies 1 y 2		
D_{u1}	36.25	cm	D_{u1}	36.25	cm	D_{u1}	37.13	cm
D_{u2}	32.75	cm	D_{u2}	32.75	cm	D_{u2}	31.88	cm
$D_{u1} + D_{u2}$	69.01	cm	$D_{u1} + D_{u2}$	69.01	cm	$D_{u1} + D_{u2}$	69.01	cm
Fuerza de restitución a DM			Fuerza de restitución a DM			Fuerza de restitución a DM		
F	11.06	tf	F	18.32	tf	F	32.79	tf
$F_{0.5DM}$	6.98	tf	$F_{0.5DM}$	11.56	tf	$F_{0.5DM}$	21.33	tf
F_R	4.08	tf	F_R	6.76	tf	F_R	11.45	tf

Tabla 23. . Propiedades calculadas para el aislador DFP para 3 tipos diferentes (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia.

Para cada tipo de aislador DFP se conforma su curva idealizada histerética. que se muestran en la Figura 99, Figura 100 y Figura 101.

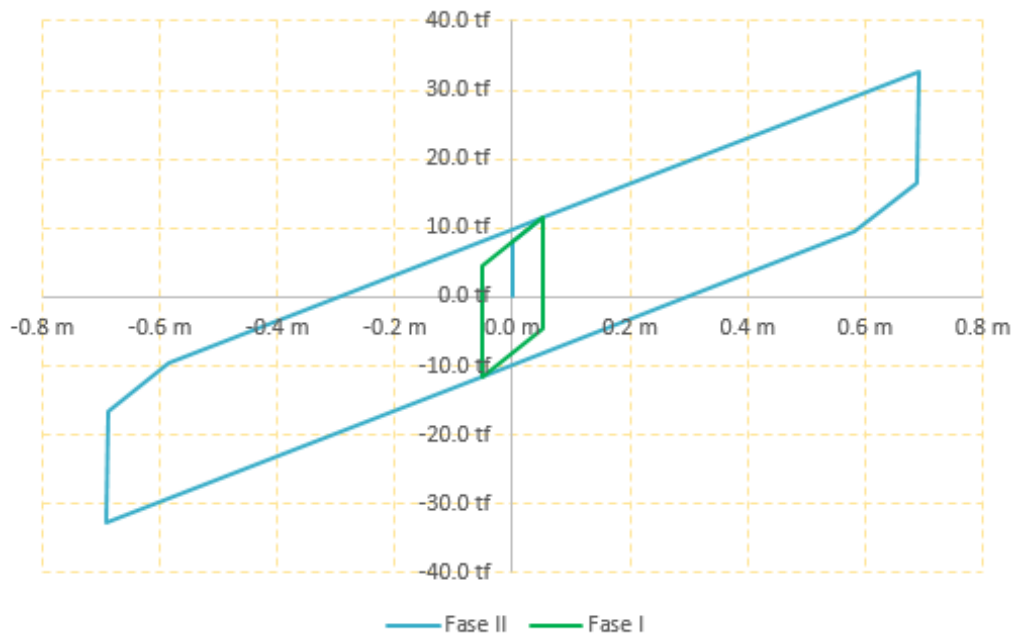


Figura 99. Curva Bilineal Histerética Aislador DFP - Tipo 1 (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia.

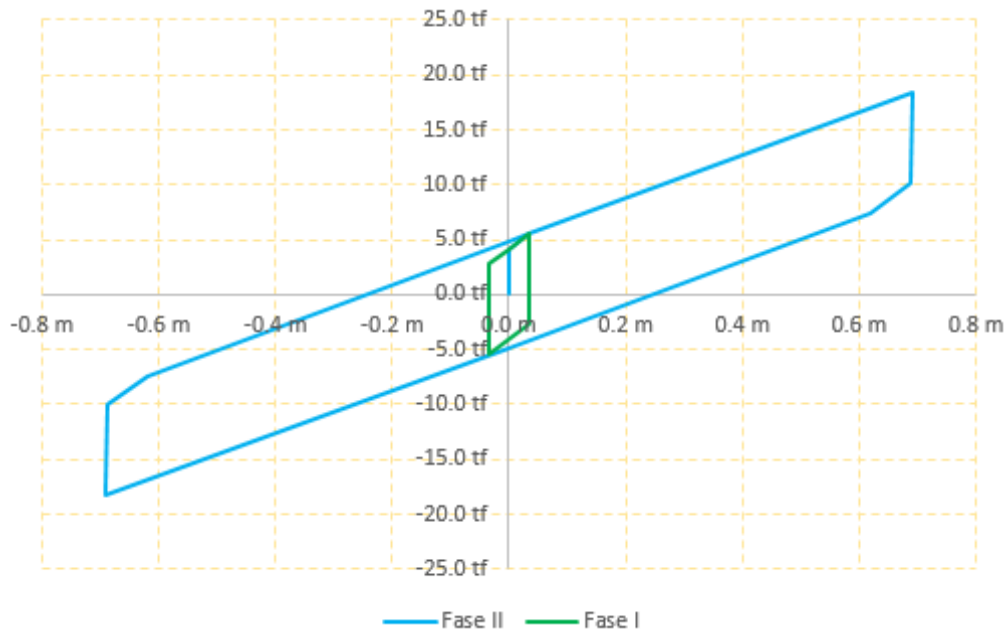


Figura 100. Curva Bilineal Histerética Aislador DFP - Tipo 2 (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia.

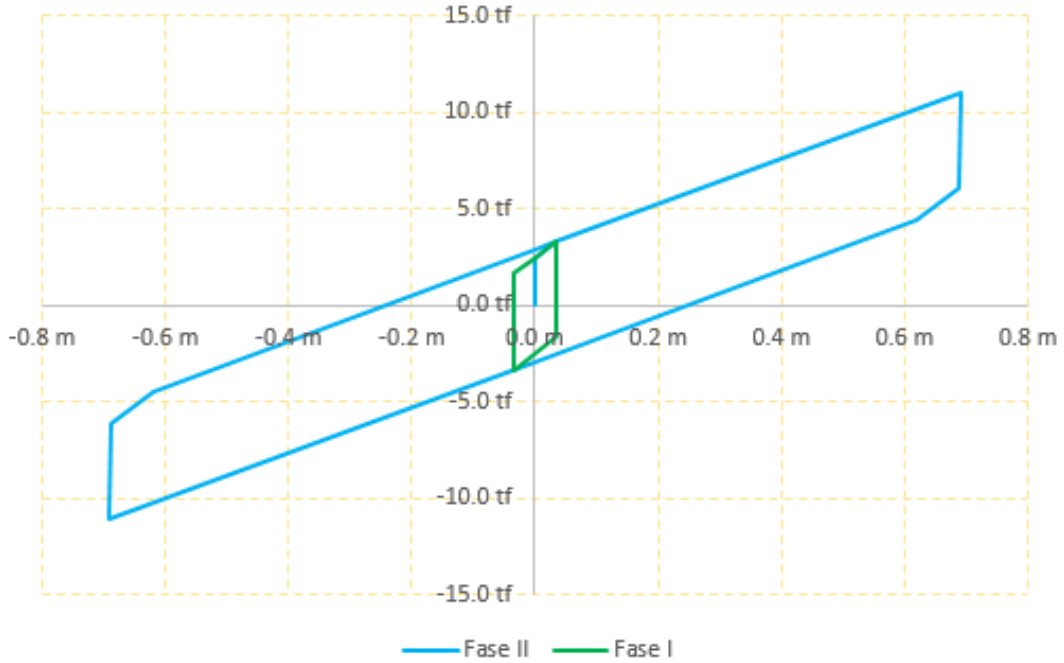


Figura 101. Curva Bilineal Histerética Aislador DFP - Tipo 3 (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia.

Con estas propiedades se asignan al modelo de ETABS según la distribución en planta mostrada a continuación en la Figura 102, que fue la configuración que arrojó los resultados más cercanos a los valores de parámetros objetivos y la conservación de la excentricidad natural en cero.

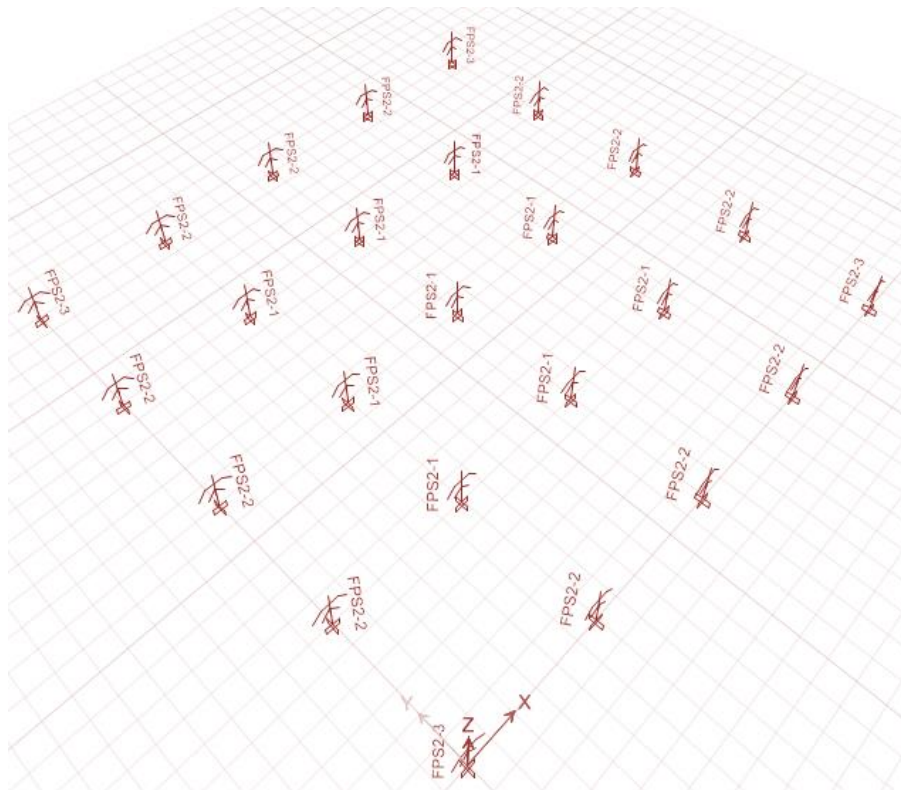


Figura 102. Distribución en Planta Aisladores tipo DFP (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia.

Diseño del Aislador Tipo TFPS o de tercera generación.

Tipo 3 FPS 3			Tipo 2 FPS 3			Tipo 1 FPS 3		
μ_1	5.0%		μ_1	5.0%		μ_1	4.0%	
μ_2	2.0%		μ_2	2.0%		μ_2	3.0%	
μ_3	2.0%		μ_3	2.0%		μ_3	3.0%	
μ_4	5.0%		μ_4	5.0%		μ_4	4.0%	
DM	69.01	cm	DM	69.01	cm	DM	69.01	cm
20DM	13.8	m	20DM	13.8	m	20DM	13.8	m
R_{ef1}	3.50	m	R_{ef1}	3.50	m	R_{ef1}	3.50	m
R_{ef2}	0.4375	m	R_{ef2}	0.4375	m	R_{ef2}	0.4375	m
R_{ef3}	0.4375	m	R_{ef3}	0.4375	m	R_{ef3}	0.4375	m
R_{ef4}	3.50	m	R_{ef4}	3.50	m	R_{ef4}	3.50	m
R_{efmax}	6.90	m	R_{efmax}	6.90	m	R_{efmax}	6.90	m
P_{serv}	109.985	tf	P_{serv}	147.83	tf	P_{serv}	232.39	tf
P_{max}	231.0	tf	P_{max}	304.6	tf	P_{max}	396.66	tf
F_{f1}	5.50	tf	F_{f1}	7.39	tf	F_{f1}	9.30	tf
F_{f2}	2.20	tf	F_{f2}	2.96	tf	F_{f2}	6.97	tf
F_{f3}	2.20	tf	F_{f3}	2.96	tf	F_{f3}	6.97	tf
F_{f4}	5.50	tf	F_{f4}	7.39	tf	F_{f4}	9.30	tf
Fase 1			Fase 1			Fase 1		
F_{m1}	5.50	tf	F_{m1}	7.39	tf	F_{m1}	9.30	tf
u^*	2.60	cm	u^*	2.60	cm	u^*	0.875	cm
E_{DC1}	0.29	tf-m	E_{DC1}	0.39	tf-m	E_{DC1}	0.16	tf-m
Fase 2			Fase 2			Fase 2		
u_{dr1}	0.68625	m	u_{dr1}	0.68625	m	u_{dr1}	0.66875	m
K_{ef}	23.12	tf/m	K_{ef}	31.08	tf/m	K_{ef}	46.67	tf/m
F_{dr1}	15.87	tf	F_{dr1}	21.33	tf	F_{dr1}	31.21	tf
E_{DC2}	13.66	tf-m	E_{DC2}	18.36	tf-m	E_{DC2}	24.02	tf-m
E_E	5.45	tf-m	E_E	7.32	tf-m	E_E	10.43	tf-m
β	19.96%		β	19.96%		β	18.32%	
Fase 3			Fase 3			Fase 3		
u_{max}	0.6901	m	u_{max}	0.6901	m	u_{max}	0.6901	m
Q_d	5.09	tf	Q_d	6.84	tf	Q_d	9.00	tf
K_d	15.71	tf/m	K_d	21.12	tf/m	K_d	33.20	tf/m
K_{ef}	23.69	tf/m	K_{ef}	31.84	tf/m	K_{ef}	53.43	tf/m
F_{m3}	16.35	tf	F_{m3}	21.97	tf	F_{m3}	36.87	tf

Tipo 3 FPS 3			Tipo 2 FPS 3			Tipo 1 FPS 3		
E_{DC3}	14.24	tf-m	E_{DC3}	19.14	tf-m	E_{DC3}	24.34	tf-m
E_E	5.64	tf-m	E_E	7.58	tf-m	E_E	12.72	tf-m
β	20.09%		β	20.09%		β	15.23%	
Fuerza de restitución a DM			Fuerza de restitución a DM			Fuerza de restitución a DM		
F_{m3}	16.35	tf	F_{m3}	21.97	tf	F_{m3}	36.87	tf
$F_{0.5DM}$	10.51	tf	$F_{0.5DM}$	14.12	tf	$F_{0.5DM}$	20.46	tf
F_R	5.84	tf	F_R	7.85	tf	F_R	16.41	tf
Desplazamiento de fluencia			Desplazamiento de fluencia			Desplazamiento de fluencia		
D_y	0.01313	m	D_y	0.01313	m	D_y	0.00438	m
Rigidez superficies externas superior e inferior:			Rigidez superficies externas superior e inferior:			Rigidez superficies externas superior e inferior:		
$K_{ot} = K_{ob}$	418.99	tf/m	$K_{ot} = K_{ob}$	563.16	tf/m	$K_{ot} = K_{ob}$	2124.75	tf/m
$K_{it} = K_{ib}$	167.60	tf/m	$K_{it} = K_{ib}$	225.26	tf/m	$K_{it} = K_{ib}$	1593.56	tf/m

Tabla 24. Propiedades calculadas para el aislador TFP para 3 tipos diferentes (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia.

Para cada tipo de aislador TFP se conforma su curva idealizada histerética que se muestran en la Figura 103, Figura 104 y Figura 105.

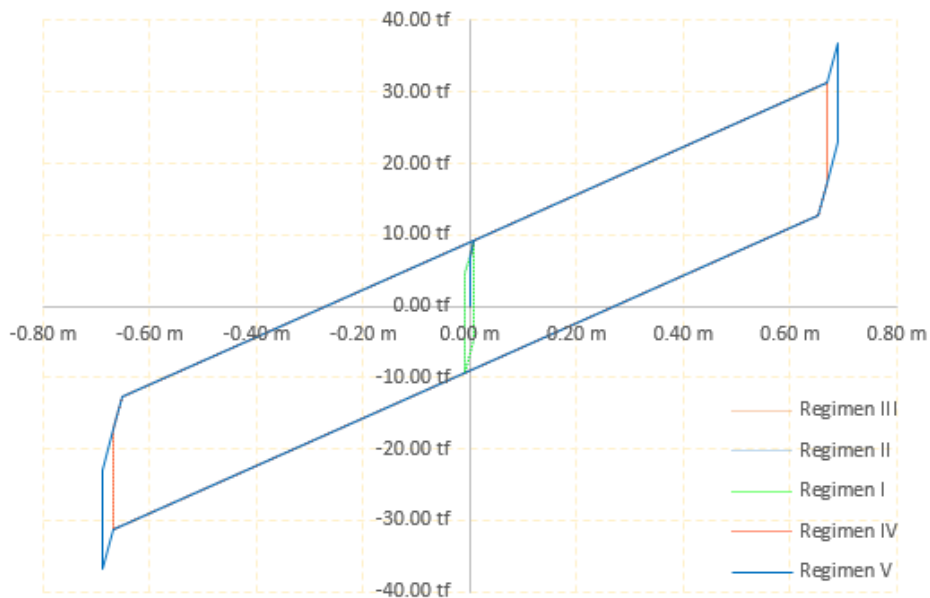


Figura 103. Curva Bilineal Histerética Aislador TFP - Tipo 1 (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia.



Figura 104. Curva Bilineal Histerética Aislador TFP - Tipo 2 (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia.

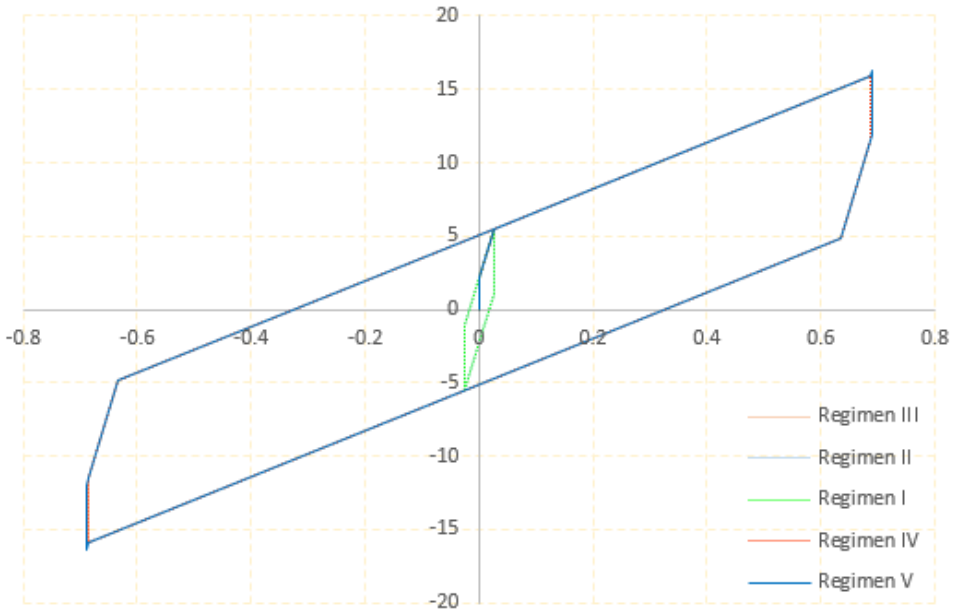


Figura 105. Curva Bilineal Histerética Aislador TFP - Tipo 3 (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia.

Con estas propiedades se asignan al modelo de ETABS según la distribución en planta mostrada a continuación en la Figura 106, que fue la configuración que arrojó los resultados más cercanos a los valores de parámetros objetivos y la conservación de la excentricidad natural en cero.

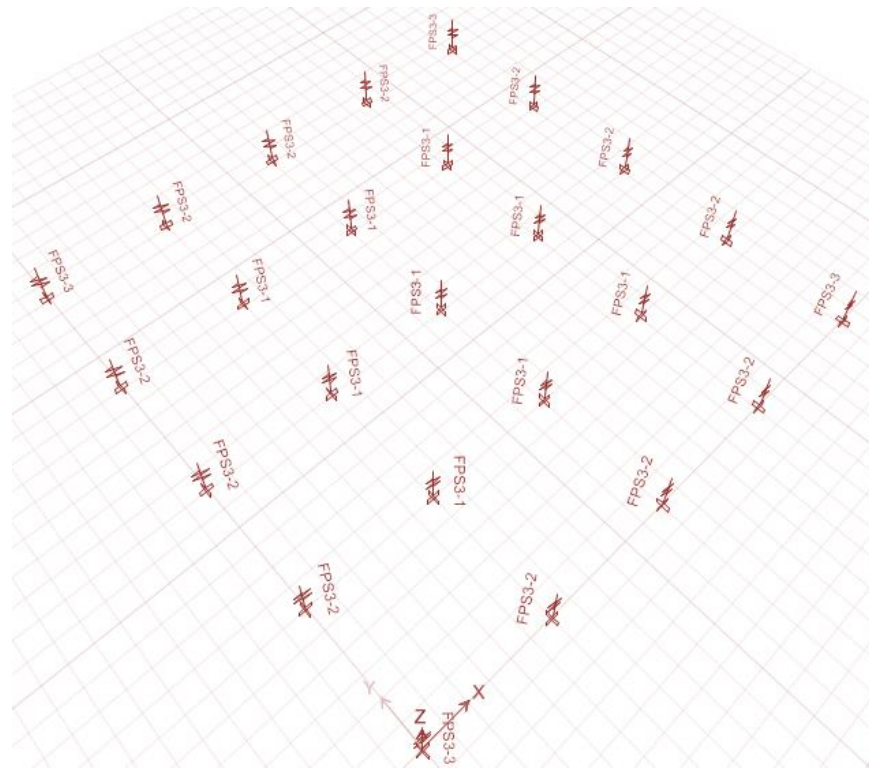


Figura 106. Distribución en Planta Aisladores tipo TFP (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia.

4.1.3 Selección y tratamiento de señales para análisis no lineal tiempo - historia.

Según el estudio presentado en el documento (FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIA , 2010), las señales sísmicas representativas de la amenaza en Bogotá D.C. son las que se muestran en la Figura 107.

Fecha	Nombre	Estación	Mw	PGA(g)
1970/09/12	MAMMOTH LAKES-USA	LONG VALU	5.7	0.127
1979/08/06	COYOTE LAKE-USA	GILROY-1	5.7	0.100
1980/05/26	LYTLE CREEK-USA	DEVILS CAN	5.3	0.081
2005/03/20	KYUSHU-JAPÓN	FKO001	6.6	0.251
2002/06/22	WESTERN IRAN-IRAN	RAZAN	6.5	0.164
1994/01/17	NORTHRIDGE YORB-USA	YORB.LIND.DIEM.B	6.7	0.073
	NORTHRIDGE DEER-USA	DEER CANYON	6.7	0.118
1985/09/19	HONSHU-JAPÓN	MYG005	7	0.175
2003/05/26	COSTA PERU-PERÚ	ZAR	6.5	0.149
2003/08/21	TARAPACA-CHILE	IQUIQUE	7.9	0.222
1974/01/05	FIORDLAND-NUEVA ZELANDA	JACS	7.2	0.113
2005/06/13	MICHOACAN-MEXICO	XALTIANGUIS	6.7	0.032

Tabla 3.4. Señales seleccionadas como representativas de la amenaza en Bogotá

Figura 107. Señales seleccionadas como representativas de la amenaza en Bogotá. Fuente: (FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIA , 2010)

De este listado se escogieron 7 registros los cuales se muestran en forma raw o cruda tal cual fue registrado por el acelerógrafo de la respectiva estación fuente, mediante el uso del software ViewWave (Figuras 108 al 114), más adelante se procedió a realizar los respectivos procesos de corrección por línea base y filtrado como primera medida.

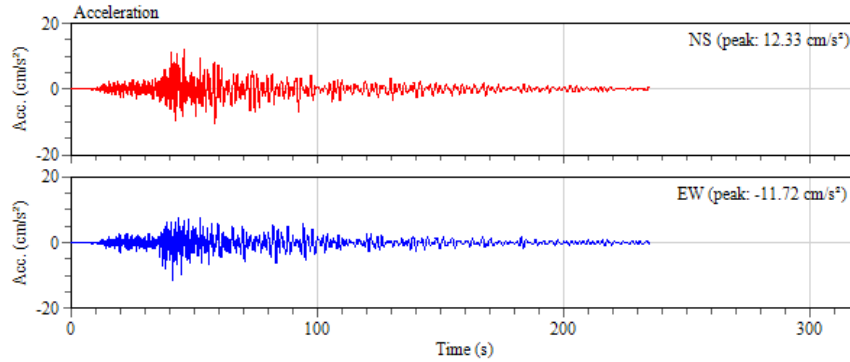


Figura 108. Registro Sísmico R1-HONSHU-JAPAN- Componentes EW-NS Raw Fuente: (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2022)

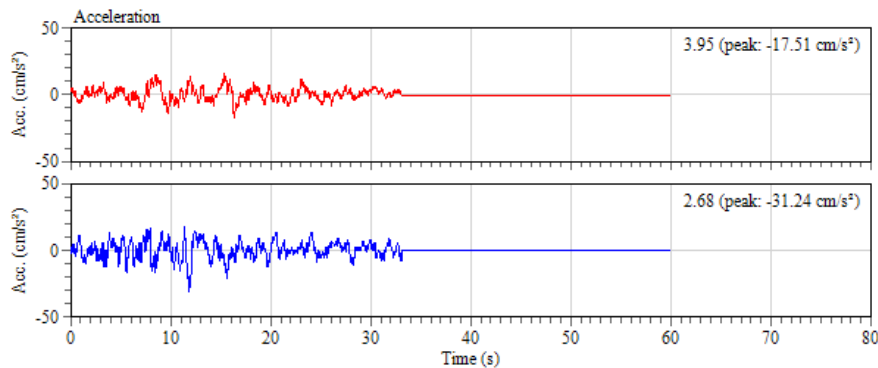


Figura 109. Registro Sísmico R2-MEXICO-XALT8509.191 - Componentes EW-NS Raw Fuente: (Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería (RAII-UNAM), 2022) “Los datos sísmicos fueron proporcionados por la Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería (RAII-UNAM), producto de las labores de instrumentación y procesamiento de la Unidad de Instrumentación Sísmica. Los datos son distribuidos a través del Sistema de Base de Datos Acelerográficos en web: <https://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/>”

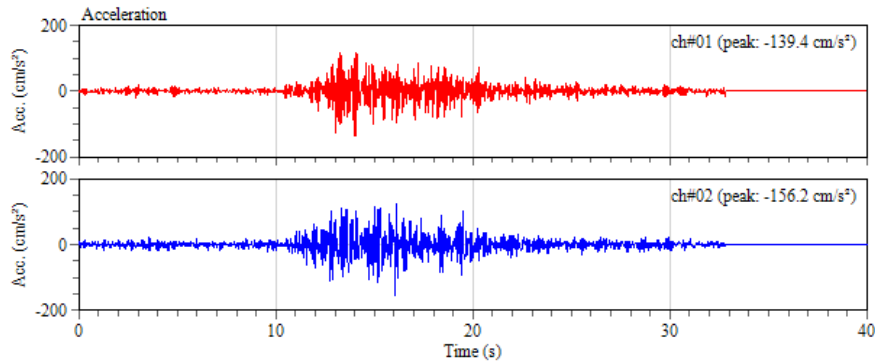


Figura 110. Registro Sísmico R3-PERU-COSTA PERU ZAR - Componentes EW-NS Raw Fuente: (Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID/FIC/UNI, 2022)

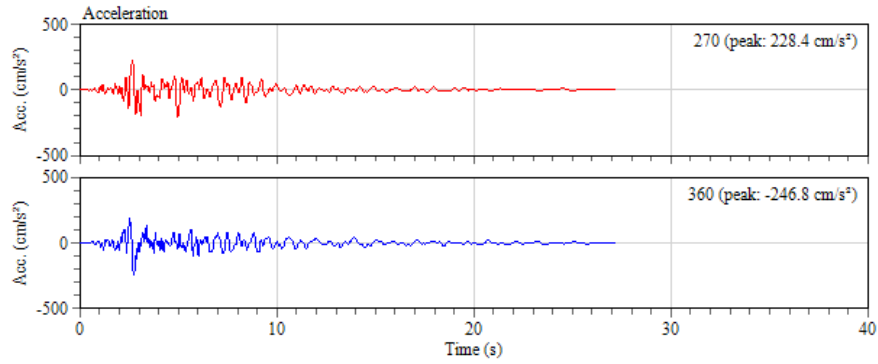


Figura 111. Registro Sísmico R4-USA-RSN149_COYOTELK_G04270 - Componentes EW-NS Raw Fuente: (PEER Ground Motion Database, 2022)

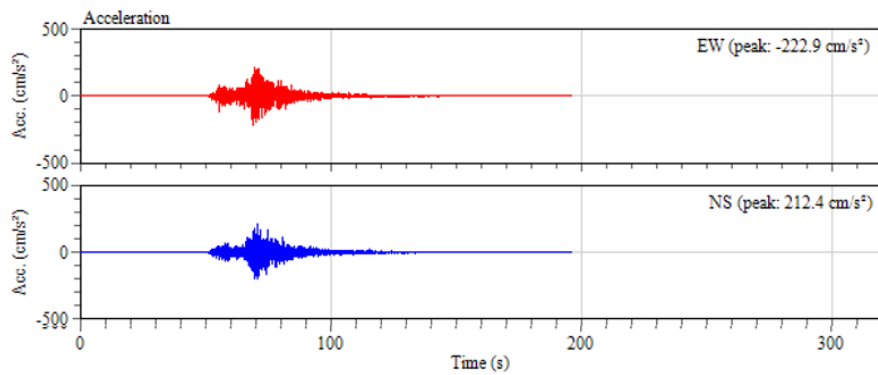


Figura 112. Registro Sísmico R5-CHILE- iquique0506131 - Componentes EW-NS Raw Fuente: (Departamento de Ingeniería Civil - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas - Universidad de Chile & ONEMI, 2022)

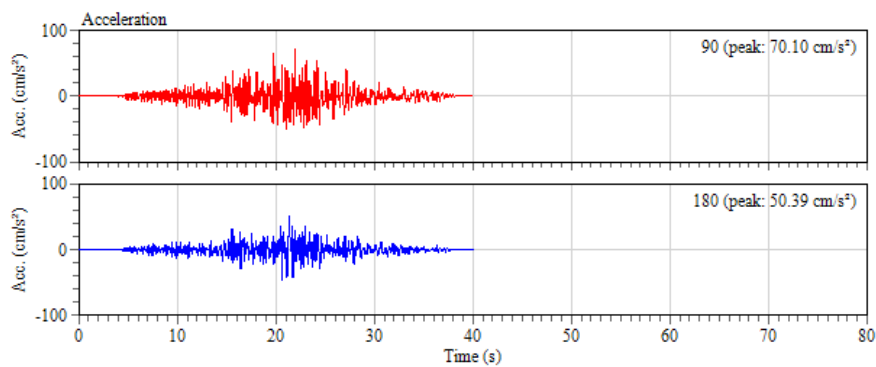


Figura 113. Registro Sísmico R6-USA-RSN1060_NORTHR_CUC090 - Componentes EW-NS Raw Fuente: (PEER Ground Motion Database, 2022)

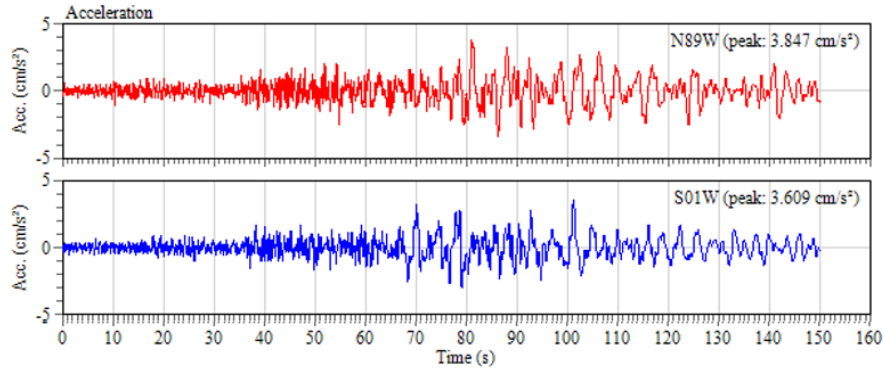


Figura 114. Registro Sísmico R7-NEWZEALAND-20030821_121249_CBGs - Componentes EW-NS Raw
Fuente: (GeoNet - Geological hazard information for New Zealand, 2022) “We acknowledge the New Zealand GeoNet project and its sponsors EQC, GNS Science, LINZ, NEMA and MBIE for providing data/images used in this study”

El proceso de filtrado y corrección por línea base de las componentes horizontales de los 7 registros sísmicos “raw” se realizó mediante el uso del software SeismoSignal, se muestra un detalle del proceso en la Figura 115.

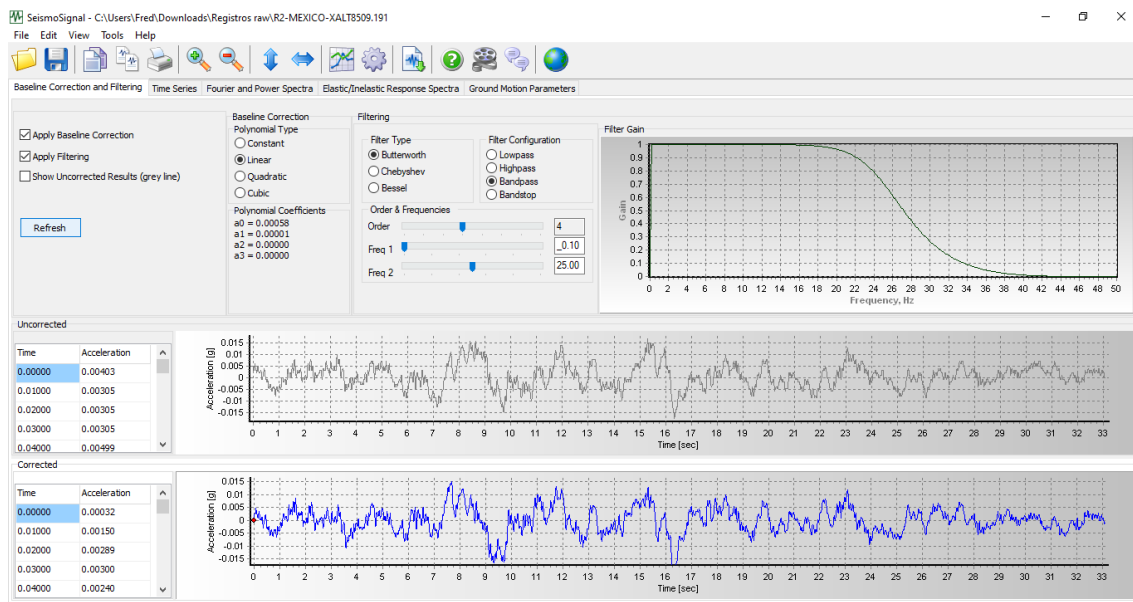


Figura 115. Ejemplo uso de software SeismoSignal para corrección por línea base y filtrado Registro Sísmico R2. Fuente: Propia con con Análisis en SeismoSignal.

Posterior a ello se continúa con el respectivo escalado (Do Matching) de los registros ya corregidos y filtrados, a llevarlos a la coincidencia dentro de determinado rango de periodo, con los espectros objetivos correspondientes a los sismos máximos esperados para ambas microzonas, con la ayuda del software SeismoMatch y de la siguiente manera ilustrativa de la Figura 116.

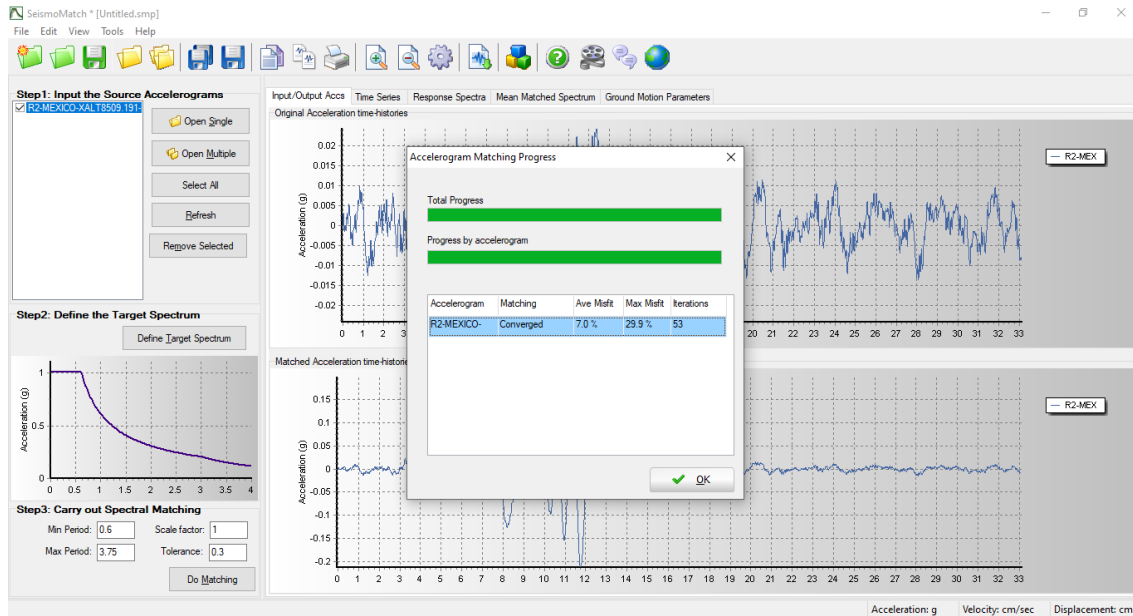


Figura 116. Proceso de ajuste de los registros sísmicos con los espectros de los sismos máximos esperados para cada microzona. Fuente: Propia con Análisis en SeismoMatch.

Paso 1. Se define el registro sísmico a procesar, previamente hecha corrección por línea base, filtrado y eliminación de ruido.

Paso 2. Se define el espectro objetivo, correspondiente al sismo máximo esperado amortiguamiento del 5% del crítico, una probabilidad de excedencia de un 5% en un periodo de 50 años, periodo de retorno aproximado de 975 años.

Paso 3. Se establecen los parámetros dentro de los cuales se realizará el escalado de la señal, teniendo en cuenta que para registros espectro-compatibles, según (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento - Gobierno de Perú, 2019); “El periodo mínimo corresponde a $0,2 T_M$, calculado usando el límite superior para las propiedades del sistema de aislamiento sísmico, y $1,25 T_M$, calculado con el límite inferior, el espectro de respuesta del componente en la dirección de análisis no sea menor que el 90% de la correspondiente ordenada dada del espectro objetivo.” En este caso particular como sólo se está trabajando con propiedades nominales de los aisladores se trabajó con los periodos de aislamiento usados en los análisis previos.

Los valores, factor de escala se deja en la unidad y la tolerancia se deja en ese valor porque es la tolerancia que maneja la versión educativa del software. Para todos los registros se obtuvo convergencia, a continuación, en la Figura 117, se muestra un ejemplo de un registro sísmico escalado en SeismoMatch.

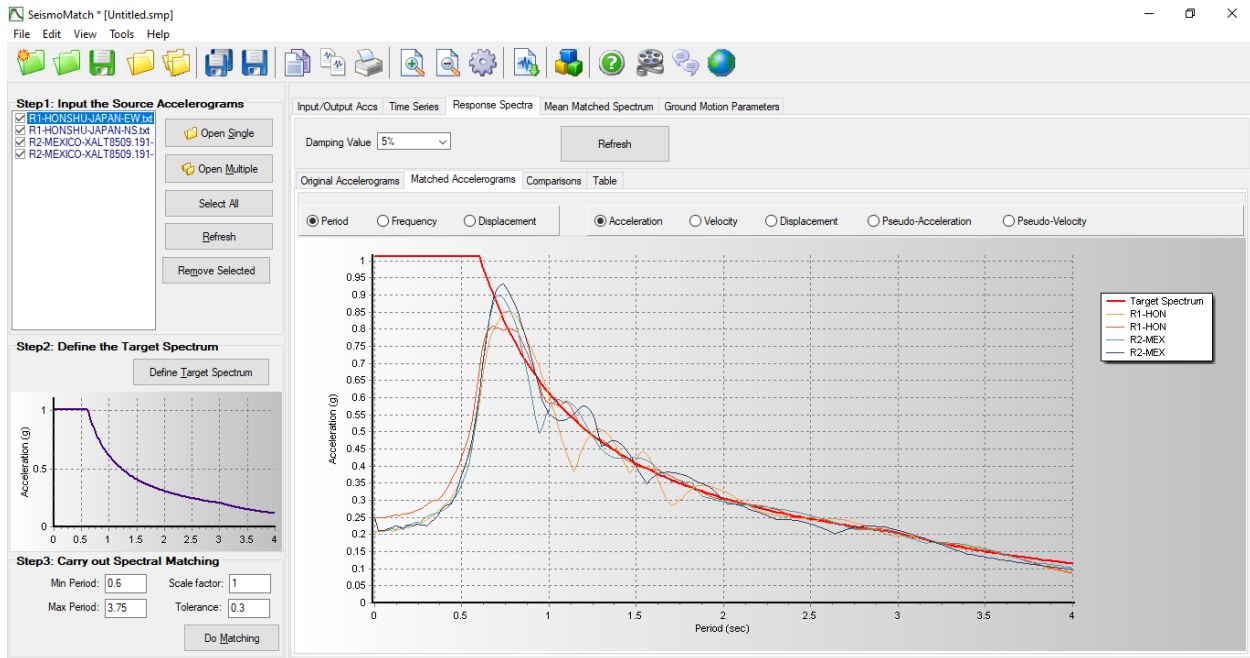


Figura 117. Ejemplo de registros sísmicos escalados con el espectro del sismo máximo microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con Análisis en SeismoMatch

Los 7 registros sísmicos corregidos con sus componentes horizontales y posterior a su escalado se listan a continuación evidenciando la comparación entre los mismos (Figuras 118 a la 131) .

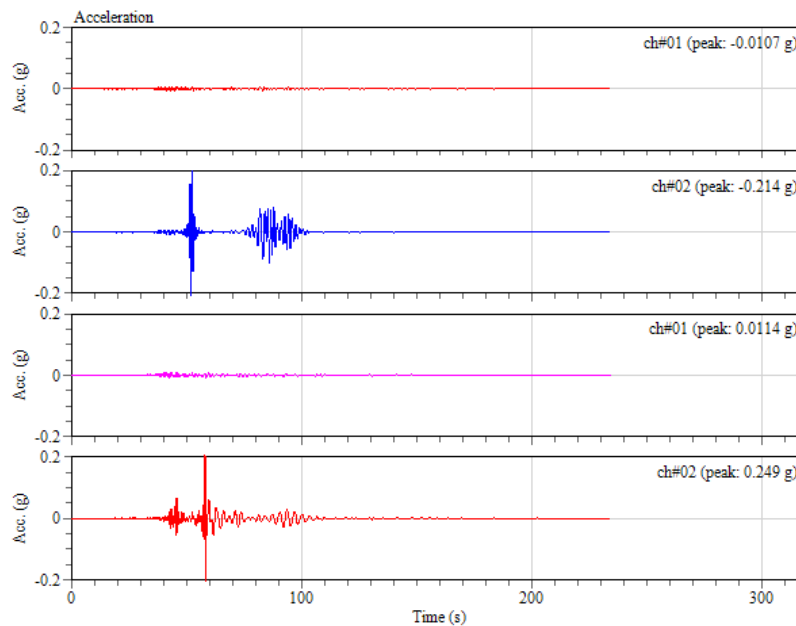


Figura 118. Registro sísmico R1 en el siguiente orden de arriba hacia abajo: Componente EW Corregida vs. Escalada – Componente NS Corregida vs. Escalada (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia con Análisis en ViewWave.

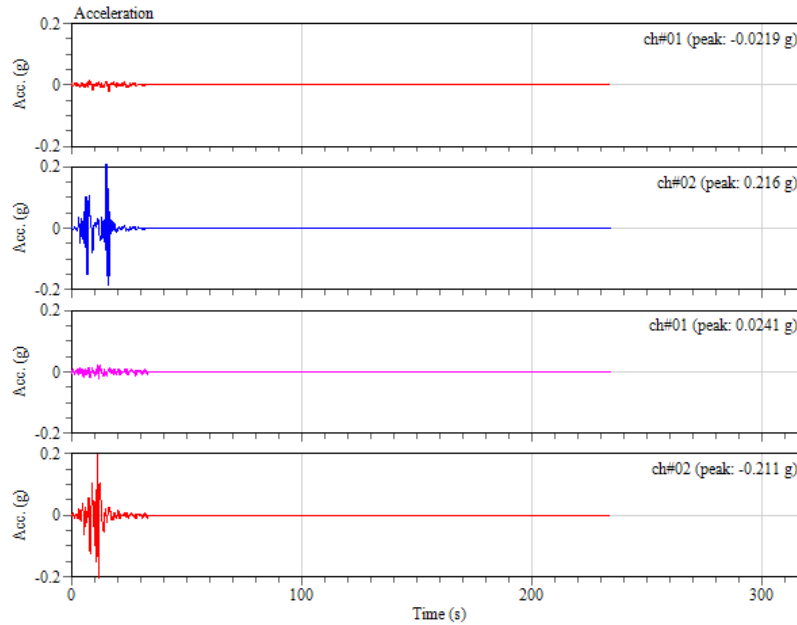


Figura 119. Registro sísmico R2 en el siguiente orden de arriba hacia abajo: Componente EW Corregida vs. Escalada – Componente NS Corregida vs. Escalada (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia con Análisis en ViewWave.

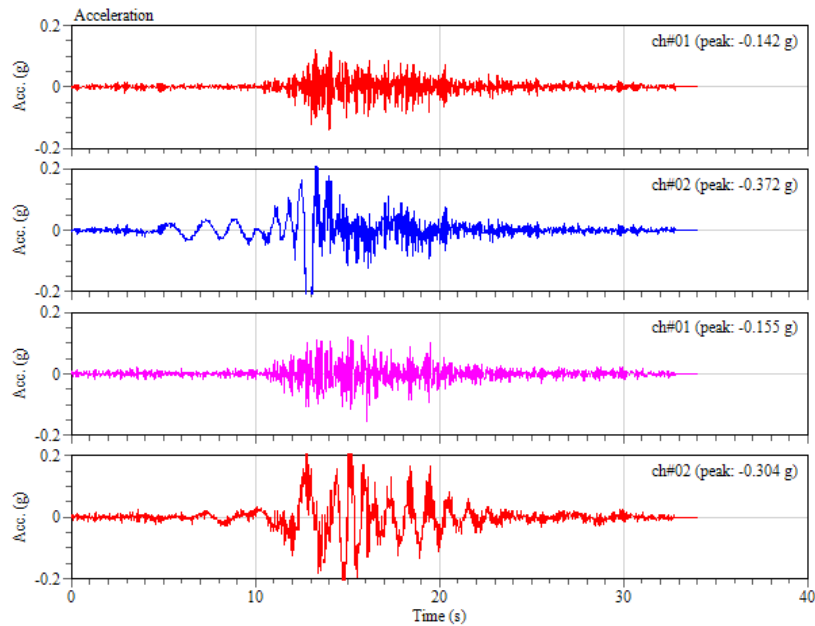


Figura 120. Registro sísmico R3 en el siguiente orden de arriba hacia abajo: Componente EW Corregida vs. Escalada – Componente NS Corregida vs. Escalada (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia con Análisis en ViewWave.

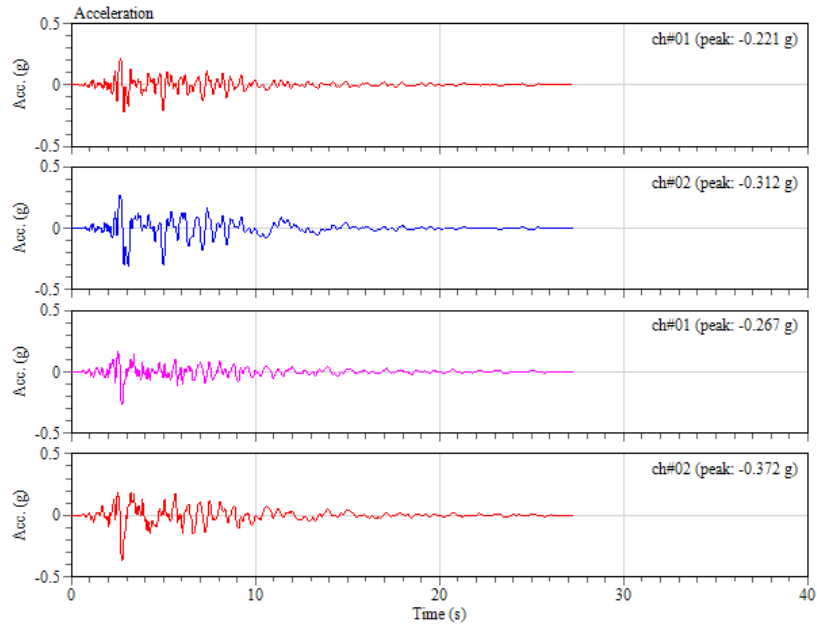


Figura 121. Registro sísmico R4 en el siguiente orden de arriba hacia abajo: Componente EW Corregida vs. Escalada – Componente NS Corregida vs. Escalada (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia con Análisis en ViewWave.

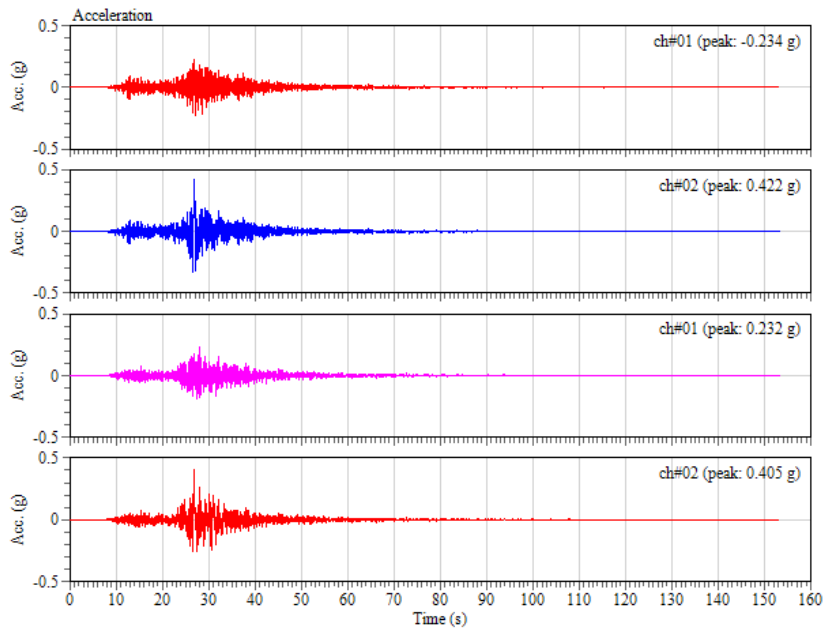


Figura 122. Registro sísmico R5 en el siguiente orden de arriba hacia abajo: Componente EW Corregida vs. Escalada – Componente NS Corregida vs. Escalada (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia con Análisis en ViewWave.

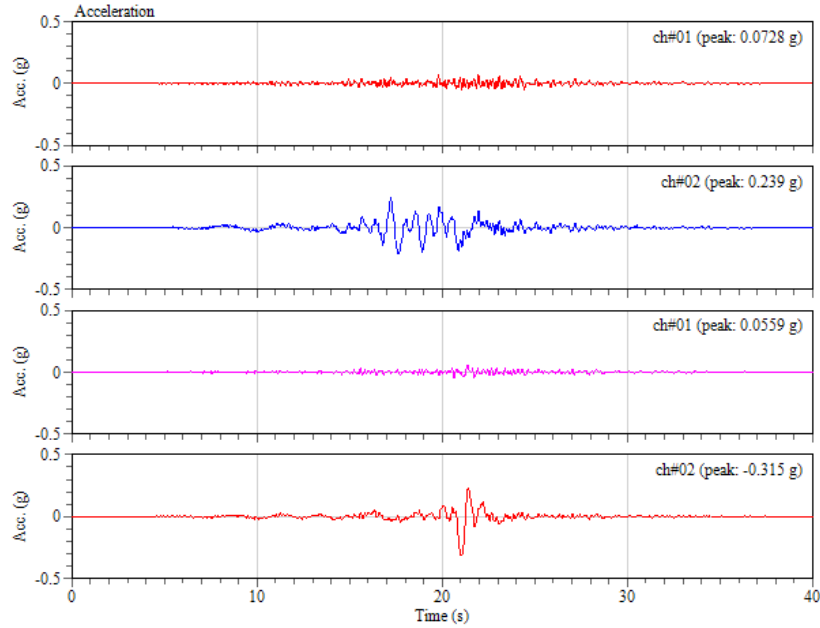


Figura 123. Registro sísmico R6 en el siguiente orden de arriba hacia abajo: Componente EW Corregida vs. Escalada – Componente NS Corregida vs. Escalada (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia con Análisis en ViewWave.

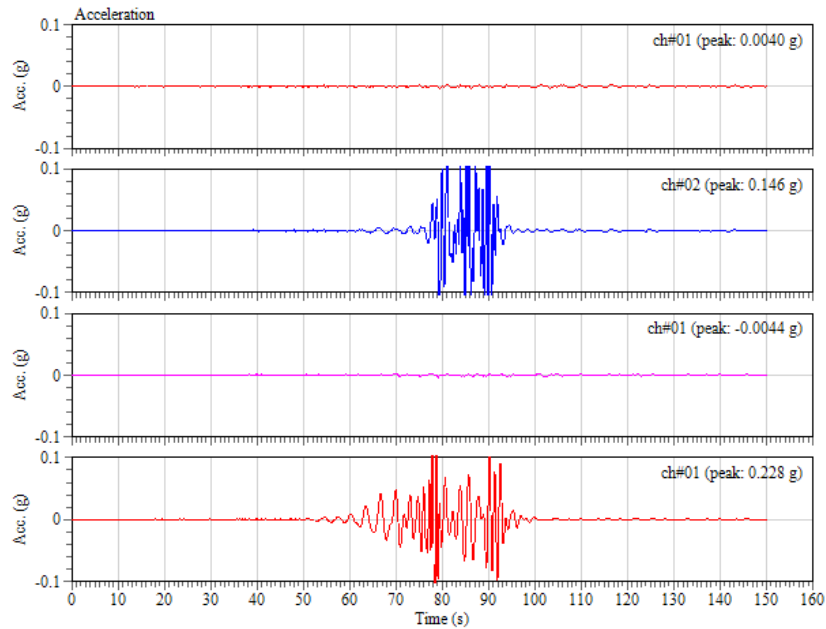


Figura 124. Registro sísmico R7 en el siguiente orden de arriba hacia abajo: Componente EW Corregida vs. Escalada – Componente NS Corregida vs. Escalada (Microzona Piedemonte C). Fuente: Propia con Análisis en ViewWave.

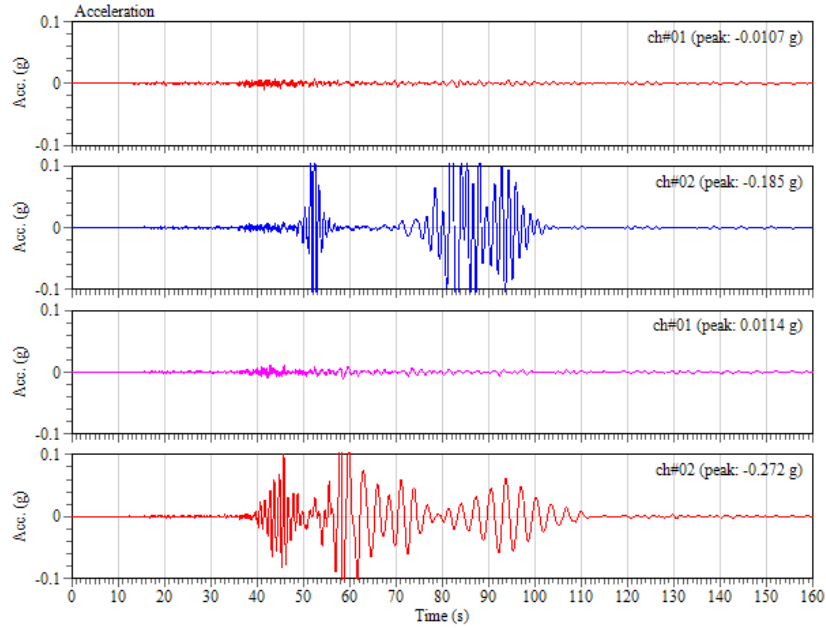


Figura 125. Registro sísmico R1 en el siguiente orden de arriba hacia abajo: Componente EW Corregida vs. Escalada – Componente NS Corregida vs. Escalada (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia con Análisis en ViewWave.

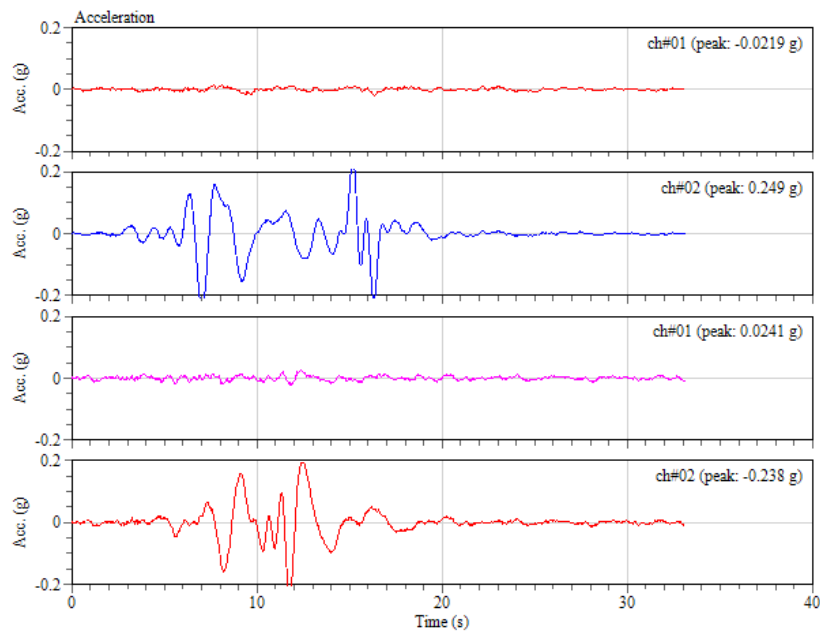


Figura 126. Registro sísmico R2 en el siguiente orden de arriba hacia abajo: Componente EW Corregida vs. Escalada – Componente NS Corregida vs. Escalada (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia con Análisis en ViewWave.

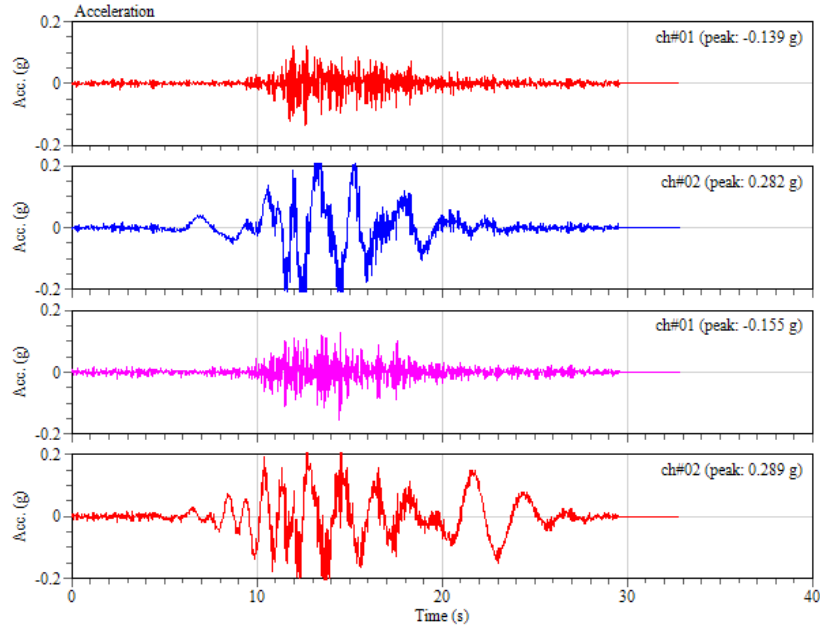


Figura 127. Registro sísmico R3 en el siguiente orden de arriba hacia abajo: Componente EW Corregida vs. Escalada – Componente NS Corregida vs. Escalada (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia con Análisis en ViewWave.

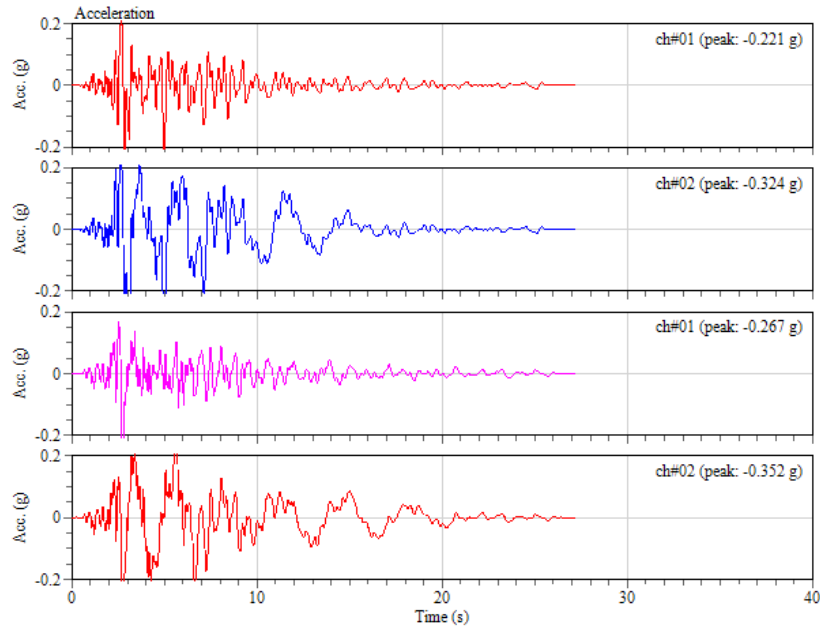


Figura 128. Registro sísmico R4 en el siguiente orden de arriba hacia abajo: Componente EW Corregida vs. Escalada – Componente NS Corregida vs. Escalada (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia con Análisis en ViewWave.

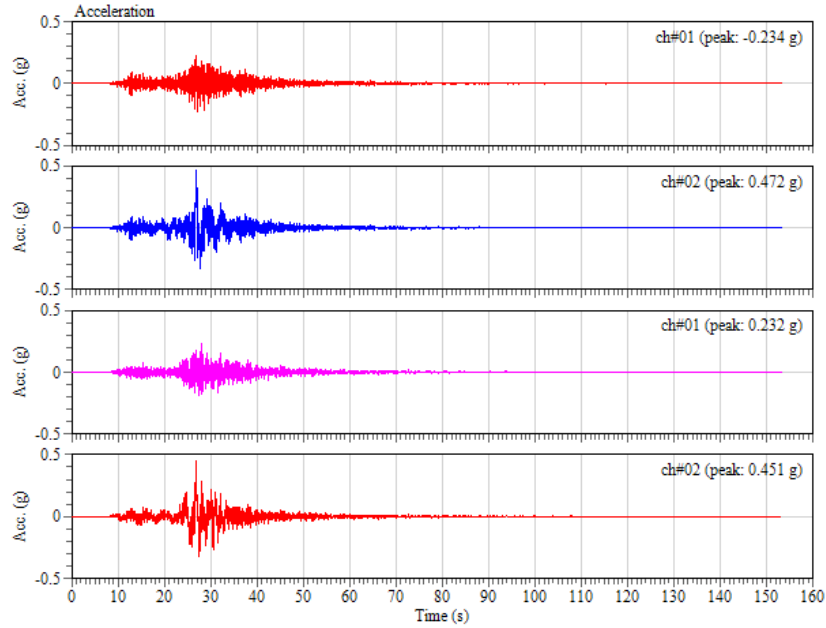


Figura 129. Registro sísmico R5 en el siguiente orden de arriba hacia abajo: Componente EW Corregida vs. Escalada – Componente NS Corregida vs. Escalada (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia con Análisis en ViewWave.

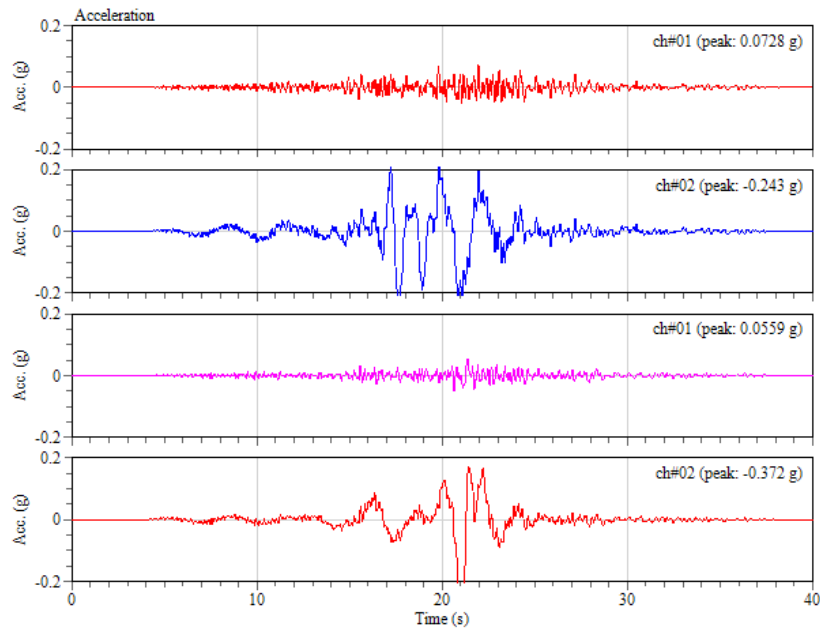


Figura 130. Registro sísmico R6 en el siguiente orden de arriba hacia abajo: Componente EW Corregida vs. Escalada – Componente NS Corregida vs. Escalada (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia con Análisis en ViewWave.

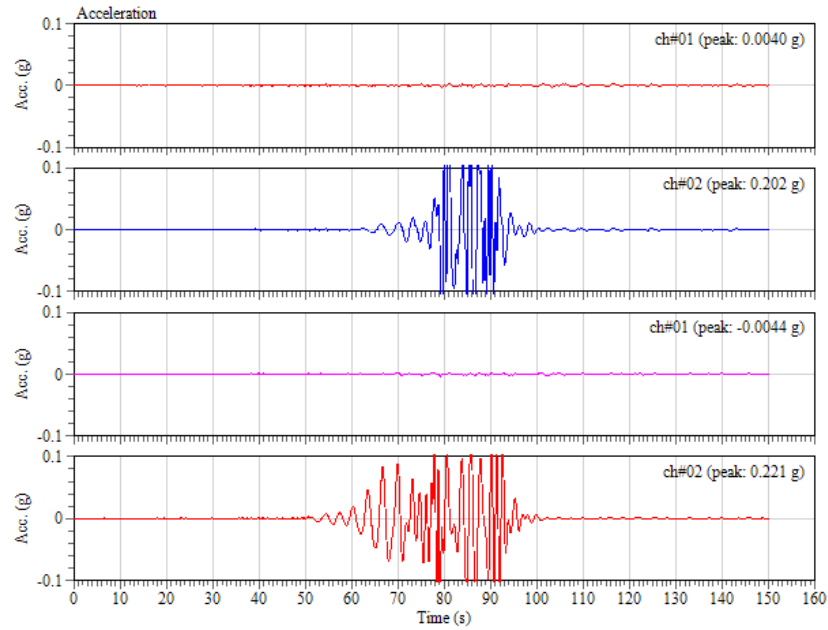


Figura 131. Registro sísmico R7 en el siguiente orden de arriba hacia abajo: Componente EW Corregida vs. Escalada – Componente NS Corregida vs. Escalada (Microzona Lacustre 200). Fuente: Propia con Análisis en ViewWave.

Los espectros originados a partir de los registros escalados se relacionan a continuación en las Figuras 132 y 133.

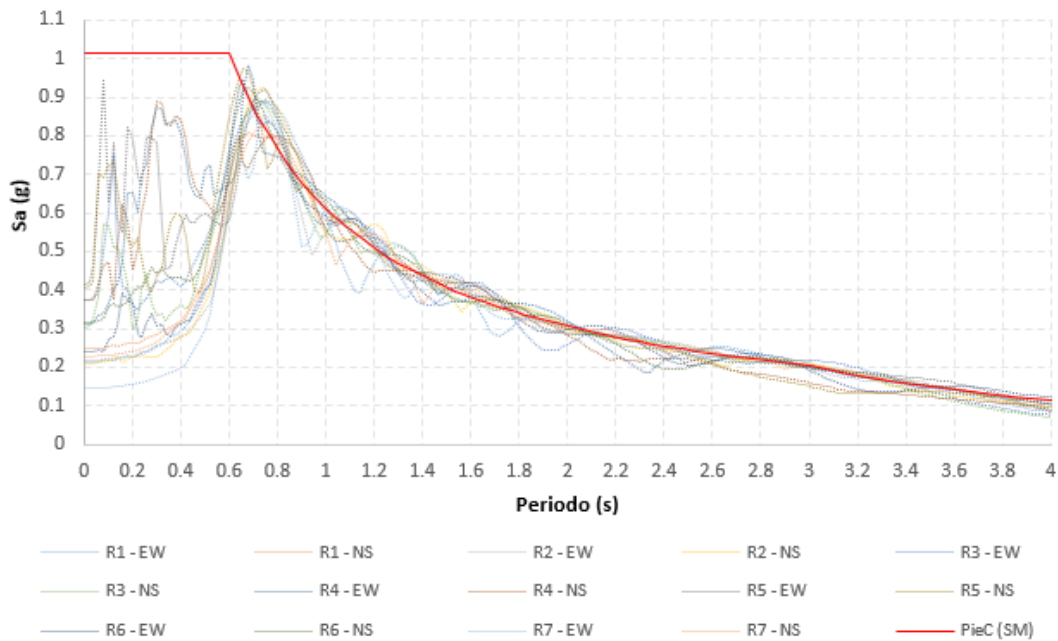


Figura 132. Espectros Escalados a Sismo Máximo Piedemonte C de los 7 registros sísmicos (Componentes EW – NS). Fuente: Propia.

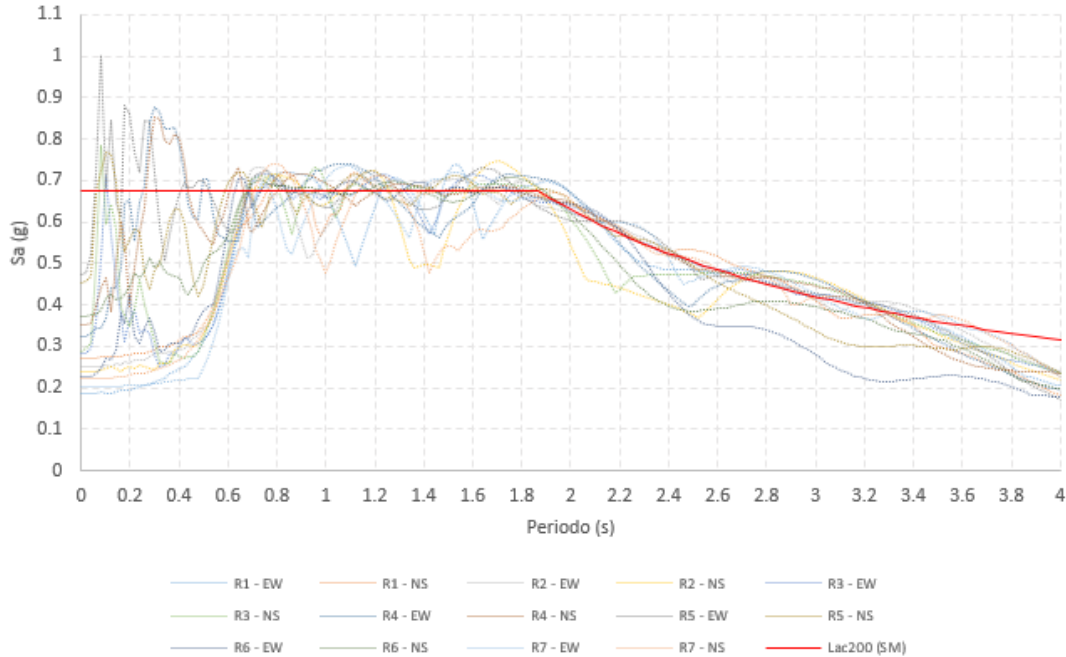


Figura 133. Espectros Escalados a Sismo Máximo Lacustre 200 de los 7 registros sísmicos (Componentes EW – NS). Fuente: Propia.

4.1.4 Análisis dinámico y diseño sísmico según lo establecido en la NSR – 10 para estructuras empotradas en la base (análisis modal espectral).

Se realizó el diseño de la estructura de base fija o empotrada con sistema principal de resistencia sísmica Pórticos Resistentes a Momentos con capacidad moderada de disipación de energía DMO. Se inició con los datos del predimensionamiento para el edificio con base fija usado para el prediseño del sistema de aislación, luego se aumentaron secciones hasta cumplir con los requisitos de la deriva.

Diseño para Microzona Piedemonte C.

Proyecto:	Proyecto Edificio Fijo en la Base
Ubicación del proyecto:	PIEDEMONTE C
Sistema Estructural:	Pórticos de Concreto Reforzado
Aceleración horizontal pico efectiva de diseño (Aa):	0.150 g
Aceleración que representa la velocidad horizontal pico efectiva de diseño (Av):	0.200 g
Coefficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos cortos (Fa)	1.8
Coefficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos intermedios (Fv):	1.7
Período corto (Tc):	0.60 seg

Período largo (TL):	3.00 seg
Aceleración horizontal pico efectiva del terreno en superficie (A _o):	0.240 g
Coefficiente de importancia (I):	1
Altura de edificio (h):	17.40 m
Coefficiente de capacidad de disipación de energía básico R _o :	5.0
Coefficiente de reducción de R causado por irregularidades en planta ϕ_p X:	1.00
Coefficiente de reducción de R causado por irregularidades en planta ϕ_p Y:	1.00
Coefficiente de reducción de R causado por irregularidades en altura ϕ_a X:	1.00
Coefficiente de reducción de R causado por irregularidades en altura ϕ_a Y:	1.00
Coefficiente de reducción de R por ausencia de redundancia en el sistema estructural de resistencia sísmica:	1.00
C _u :	1.342
C _t :	0.047
α :	0.9
Período de vibración fundamental aproximado (T _a):	0.615 seg
C _u *T _a	0.825 seg
Aceleración espectral (S _a):	0.495 g
Masa para análisis sísmico (A partir del piso 1):	3015.60 Ton

Tabla 25. Parámetros de entrada Análisis Sísmico Edificación Base Fija.
Fuente: Propia.

Análisis dinámico:	
Periodos de Vibración Tx:	0.814 seg
Periodos de Vibración Ty:	0.814 seg
Cortante dinámico total en la base (V _{tx}):	1225 Ton
Cortante dinámico total en la base (V _{ty}):	1225 Ton

Tabla 26. Parámetros resultantes del análisis dinámico. Fuente: Propia.

	Sentido X	Sentido Y
Período fundamental de la edificación (T):	0.814	0.814
Aceleración espectral (S _a)	0.502	0.502
Coefficiente de capacidad de disipación de R:	5	5
Coefficiente de Reducción (Sec. A.5.4.5 NSR-10):	0.80	0.80
Cortante Basal V _b	1514 Ton	1514 Ton
k (NSR A.4.3.2)	0.5<t<2.5 =>	0.5<t<2.5 =>
	k= 1.162	k= 1.162

Tabla 27. Parámetros definitivos modelo matemático. Fuente: Propia.

Se calcula el ajuste de los resultados del cortante dinámico en la base, según lo requerido en A.5.4.5 (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA , 2017) teniendo en cuenta que la estructura es de configuración regular.

Factores de Ajuste :

Fx 1212 / 1226 = 0.99 --> 1.00 9.8 (ETABS Factor)
 Fy 1212 / 1226 = 0.99 --> 1.00 9.8 (ETABS Factor)

No requiere ajuste, se usarán los valores de cortante dinámico en la base por ser mayores al estático en la base para una estructura regular.

TABLE: Modal Participating Mass Ratios														
Case	Mode	Period	UX	UY	UZ	Sum UX	Sum UY	Sum UZ	RX	RY	RZ	Sum RX	Sum RY	Sum RZ
		sec												
Modal	1	0.814	3.7E-05	0.7901	0	3.7E-05	0.7901	0	0.2257	1E-05	0	0.2257	1.067E-05	0
Modal	2	0.814	0.7901	3.73E-05	0	0.7902	0.7902	0	1E-05	0.2257	0	0.2257	0.2257	0
Modal	3	0.713	0	0	0	0.7902	0.7902	0	0	0	0.7927	0.2257	0.2257	0.7927
Modal	4	0.243	0.0001	0.1136	0	0.7902	0.9038	0	0.5265	0.0002	0	0.7522	0.226	0.7927
Modal	5	0.243	0.1136	0.0001	0	0.9038	0.9038	0	0.0002	0.5265	0	0.7524	0.7524	0.7927
Modal	6	0.214	0	0	0	0.9038	0.9038	0	0	0	0.1122	0.7524	0.7524	0.9048
Modal	7	0.124	0.0232	0.0265	0	0.927	0.9303	0	0.052	0.0455	0	0.8044	0.7979	0.9048
Modal	8	0.124	0.0265	0.0232	0	0.9535	0.9535	0	0.0455	0.052	0	0.8498	0.8498	0.9048
Modal	9	0.11	0	0	0	0.9535	0.9535	0	0	0	0.0491	0.8498	0.8498	0.954
Modal	10	0.076	0.0024	0.025	0	0.9558	0.9784	0	0.0853	0.0081	0	0.9351	0.8579	0.954
Modal	11	0.076	0.025	0.0024	0	0.9808	0.9808	0	0.0081	0.0853	0	0.9432	0.9432	0.954
Modal	12	0.068	0	0	0	0.9808	0.9808	0	0	0	0.027	0.9432	0.9432	0.981

Tabla 28. Factores de participación modal. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

TABLE: Story Forces								
Story	Load Case/Combo	Location	P	VX	VY	T	MX	MY
			tonf	tonf	tonf	tonf-m	tonf-m	tonf-m
Story6	SPCX981 Max	Top	0	296.1175	6.14E-07	355341.04	0	0
Story6	SPCX981 Max	Bottom	0	296.1175	6.14E-07	355341.04	0.0001731	86161.301
Story6	SPCY981 Max	Top	0	0	296.1175	355341.04	0	0
Story6	SPCY981 Max	Bottom	0	0	296.1175	355341.04	86161.301	0.000158
Story5	SPCX981 Max	Top	0	604.7682	0	725721.84	5.768E-05	86161.301
Story5	SPCX981 Max	Bottom	0	604.7682	0	725721.84	1.442E-05	259771.58
Story5	SPCY981 Max	Top	0	0	604.7682	725721.84	86161.301	0.0001632
Story5	SPCY981 Max	Bottom	0	0	604.7682	725721.84	259771.58	2.039E-05
Story4	SPCX981 Max	Top	0	851.3821	0	1021658.6	0.0002307	259771.58
Story4	SPCX981 Max	Bottom	0	851.3821	0	1021658.6	8.409E-05	502799.74

TABLE: Story Forces								
Story	Load Case/Combo	Location	P	VX	VY	T	MX	MY
			tonf	tonf	tonf	tonf-m	tonf-m	tonf-m
Story4	SPCY981 Max	Top	0	0	851.3821	1021658.6	259771.58	1.442E-05
Story4	SPCY981 Max	Bottom	0	0	851.3821	1021658.6	502799.74	0.0001154
Story3	SPCX981 Max	Top	0	1040.4069	0	1248488.3	0.0001644	502799.74
Story3	SPCX981 Max	Bottom	0	1040.4069	0	1248488.3	0.0001079	798598.06
Story3	SPCY981 Max	Top	0	0	1040.4069	1248488.3	502799.74	0.0001154
Story3	SPCY981 Max	Bottom	0	0	1040.4069	1248488.3	798598.06	0
Story2	SPCX981 Max	Top	0	1167.9502	0	1401540.3	0.0001207	798598.06
Story2	SPCX981 Max	Bottom	0	1167.9502	0	1401540.3	0.0001079	1129781.5
Story2	SPCY981 Max	Top	0	0	1167.9502	1401540.3	798598.06	9.991E-05
Story2	SPCY981 Max	Bottom	0	0	1167.9502	1401540.3	1129781.5	0.0001154
Story1	SPCX981 Max	Top	0	1225.3743	6.30E-07	1470449.2	4.079E-05	1129781.5
Story1	SPCX981 Max	Bottom	0	1225.3743	6.30E-07	1470449.2	0.0001644	1476685
Story1	SPCY981 Max	Top	0	0	1225.3743	1470449.2	1129781.5	4.079E-05
Story1	SPCY981 Max	Bottom	0	0	1225.3743	1470449.2	1476685	0.0002303

Tabla 29. Fuerzas dinámicas por piso. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

Se usaron las combinaciones de carga siguientes para el diseño por resistencia última:

1.4D

1.2D + 1.6L + 0.5G

1.2D + 1.0L + E

0.9D + E

Las secciones definitivas y el refuerzo seleccionado para los elementos estructurales columnas y vigas se muestran a continuación.

Plantas 5 y 6.

Vigas perimetrales:

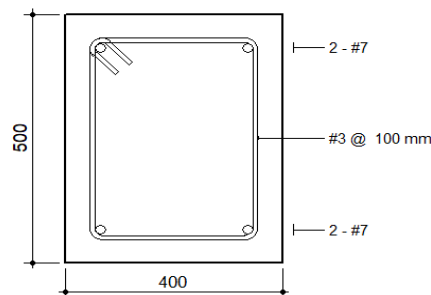


Figura 134. Sección de viga perimetral plantas 5 y 6. Fuente: Propia.

Vigas interiores:

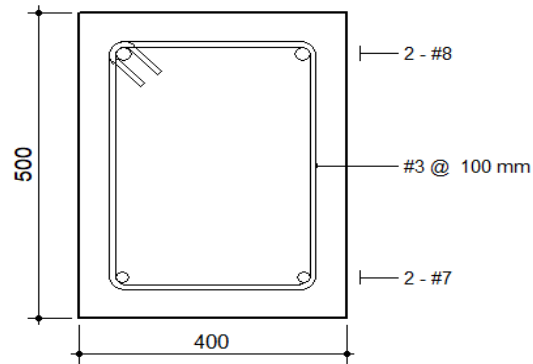


Figura 135. Sección de viga interior plantas 5 y 6. Fuente: Propia.

Plantas 1, 2, 3 y 4.

Vigas perimetrales:

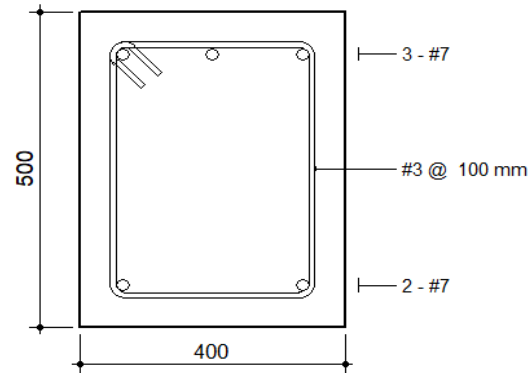


Figura 136. Sección de viga perimetral plantas 1, 2, 3 y 4. Fuente: Propia.

Vigas interiores:

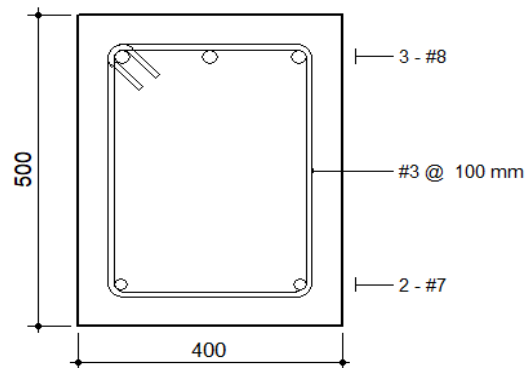


Figura 137. Sección de viga interior plantas 1, 2, 3 y 4. Fuente: Propia.

Sección Columna

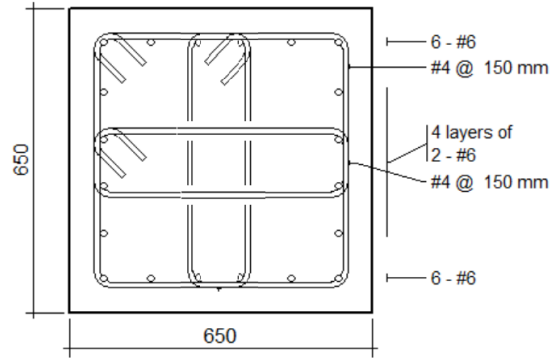


Figura 138. Sección de columna. Fuente: Propia.

Con estas secciones se construyeron los diagramas momento curvatura para cada una de las rótulas a asignar al modelo para el análisis Push Over, los parámetros para los gráficos se obtuvieron mediante la aplicación Section Designer del software Sap2000.

Momento ϕ secciones

VGP P5-6

L(LUZ LIBRE) 5.35 m
L/2 2.675 m

	M(+) (0°)			M(-) (180°)			
	My	Mu	α	My	Mu	α	
M (ton.m)	13.60	18.98	0.716386	M (ton.m)	13.597	18.98	0.716386
ϕ (m⁻¹)	0.006088	0.129800		ϕ (m⁻¹)	0.006088	0.129800	
θ (rad)	0.005428	0.049241		θ (rad)	0.005428	0.049241	

	M (ton.m)	θ (rad)
-E	-3.796	-0.0876
-D	-3.796	-0.0526
-C	-18.98	-0.0438
-B	-13.597	0
A	0	0
B	13.597	0
C	18.98	0.0438
D	3.796	0.0526
E	3.796	0.0876

SAP2000	
-0.279	-0.0876
-0.279	-0.0526
-1.396	-0.0438
-1.000	0.0000
0	0.0000
1.000	0.0000
1.396	0.0438
0.279	0.0526
0.279	0.0876

Tabla 30. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Vigas Perimetrales Plantas 5 y 6. Fuente: Propia con análisis en Sap2000.

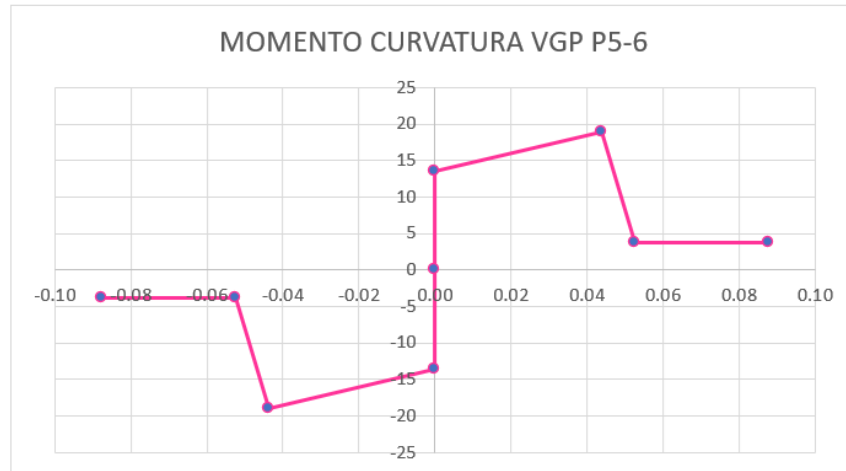


Figura 139. Diagrama Momento – Curvatura Vigas Perimetrales Plantas 5 y 6. Fuente: Propia.

Momento ϕ secciones

VGI P5-6

L(LUZ LIBRE) 5.35 m
L/2 2.675 m

	M(+) (0°)			M(-) (180°)			
	My	Mu	α	My	Mu	α	
M (ton.m)	13.65	18.95	0.720264	M (ton.m)	17.564	24.52	0.716313
ϕ (m⁻¹)	0.006063	0.129000		ϕ (m⁻¹)	0.006366	0.132200	
θ (rad)	0.005406	0.048414		θ (rad)	0.005676	0.050289	

	M (ton.m)	θ (rad)
-E	-4.904	-0.0892
-D	-4.904	-0.0535
-C	-24.52	-0.0446
-B	-17.564	0
A	0	0
B	13.649	0
C	18.95	0.0430
D	3.79	0.0516
E	3.79	0.0860

SAP2000	
-0.279	-0.0892
-0.279	-0.0535
-1.396	-0.0446
-1.000	0.0000
0	0.0000
1.000	0.0000
1.388	0.0430
0.278	0.0516
0.278	0.0860

Tabla 31. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Vigas Interiores Plantas 5 y 6. Fuente: Propia con análisis en Sap2000.

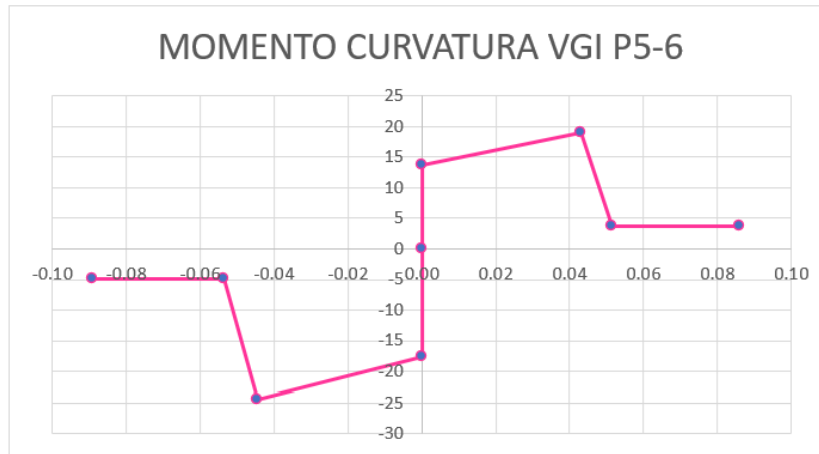


Figura 140. Diagrama Momento – Curvatura Vigas Interiores Plantas 5 y 6. Fuente: Propia.

Momento ϕ secciones

VGP P 1, 2, 3 y 4

L(LUZ LIBRE) 5.35 m

L/2 2.675 m

M(+)(0°)			M(-)(180°)				
	My	Mu	α		My	Mu	α
M (ton.m)	13.62	19.06	0.714638	M (ton.m)	19.944	27.77	0.718185
ϕ (m⁻¹)	0.006038	0.129000		ϕ (m⁻¹)	0.006478	0.135400	
θ (rad)	0.005384	0.049168		θ (rad)	0.005776	0.051204	

	M (ton.m)	θ (rad)
-E	-5.554	-0.0909
-D	-5.554	-0.0545
-C	-27.77	-0.0454
-B	-19.944	0
A	0	0
B	13.621	0
C	19.06	0.0438
D	3.812	0.0525
E	3.812	0.0876

SAP2000	
-0.278	-0.0909
-0.278	-0.0545
-1.392	-0.0454
-1.000	0.0000
0	0.0000
1.000	0.0000
1.399	0.0438
0.280	0.0525
0.280	0.0876

Tabla 32. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Vigas Perimetrales Plantas 1, 2, 3, y 4. Fuente: Propia con análisis en Sap2000.

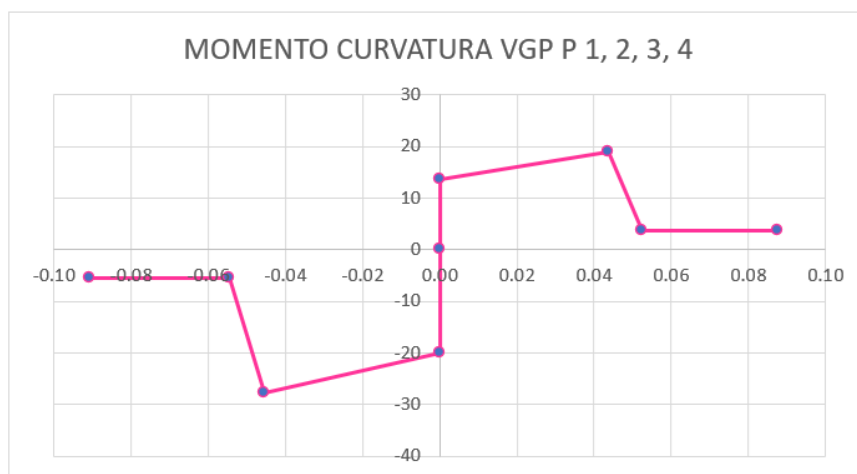


Figura 141. Diagrama Momento – Curvatura Vigas Perimetrales Plantas 1, 2, 3, y 4. Fuente: Propia.

Momento ϕ secciones

VGIP 1, 2, 3, 4

L(LUZ LIBRE) 5.35 m

L/2 2.675 m

	M(+) (0°)			M(-) (180°)			
	My	Mu	α	My	Mu	α	
M (ton.m)	13.52	19.02	0.710883	M (ton.m)	25.733	35.58	0.723243
ϕ (m⁻¹)	0.005995	0.129000		ϕ (m⁻¹)	0.006839	0.145200	
θ (rad)	0.005346	0.049649		θ (rad)	0.006098	0.054044	

	M (ton.m)	θ (rad)
-E	-7.116	-0.0959
-D	-7.116	-0.0575
-C	-35.58	-0.0479
-B	-25.733	0
A	0	0
B	13.521	0
C	19.02	0.0443
D	3.804	0.0532
E	3.804	0.0886

SAP2000	
-0.277	-0.0959
-0.277	-0.0575
-1.383	-0.0479
-1.000	0.0000
0	0.0000
1.000	0.0000
1.407	0.0443
0.281	0.0532
0.281	0.0886

Tabla 33. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Vigas Interiores Plantas 1, 2, 3, y 4. Fuente: Propia con análisis en Sap2000.

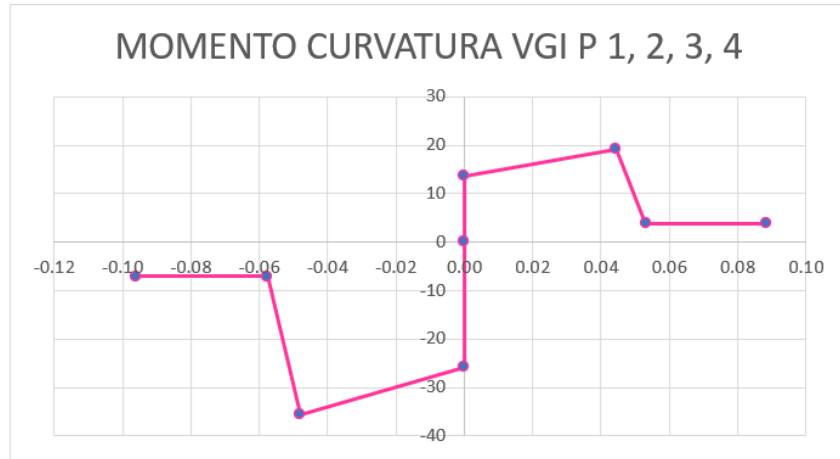


Figura 142. Diagrama Momento – Curvatura Vigas Interiores Plantas 1, 2, 3, y 4. Fuente: Propia.

Momento ϕ secciones

COLUMNA TIPO

CARGA AXIAL 0 ton
L(LUZ LIBRE) 2.4 m
L/2 1.2 m

M(+) (0°)			
	My	Mu	α
M (ton.m)	52.86	87.12	0.606795
ϕ (m⁻¹)	0.004856	0.103800	
θ (rad)	0.001942	0.022840	

	M (ton.m)	θ (rad)	SAP2000	
-E				
-D				
-C				
-B				
A	0	0	0	0.0000
B	52.864	0	1.000	0.0000
C	87.12	0.0209	1.648	0.0209
D	17.424	0.0251	0.330	0.0251
E	17.424	0.0418	0.330	0.0418

Tabla 34. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Columna Tipo sin Carga Axial. Fuente: Propia con análisis en Sap2000.

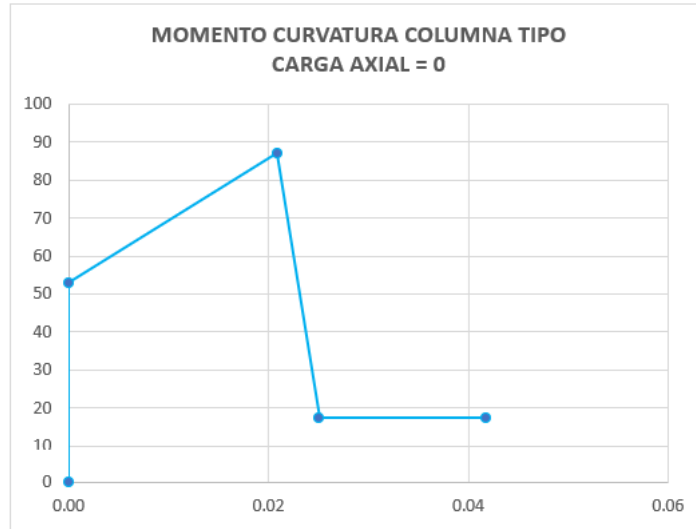


Figura 143. Diagrama Momento – Curvatura Columna Tipo sin Carga Axial. Fuente: Propia.

Momento ϕ secciones

COLUMNA TIPO

CARGA AXIAL 11.1 ton
 L(LUZ LIBRE) 2.4 m
 L/2 1.2 m

M(+) (0°)			
	My	Mu	α
M (ton.m)	55.387	89.43	0.619334
ϕ (m⁻¹)	0.004934	0.104500	
θ (rad)	0.001974	0.022437	

	M (ton.m)	θ (rad)	SAP2000	
-E				
-D				
-C				
-B				
A	0	0	0	0.0000
B	55.387	0	1.000	0.0000
C	89.43	0.0205	1.615	0.0205
D	17.886	0.0246	0.323	0.0246
E	17.886	0.0409	0.323	0.0409

Tabla 35. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Columna Tipo con Carga Axial de 11.1 ton. Fuente: Propia con análisis en Sap2000.

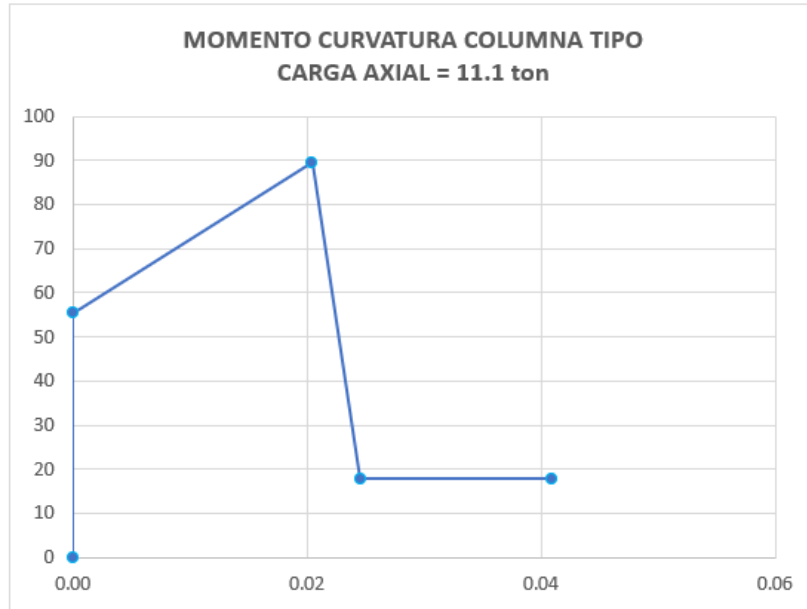


Figura 144. Diagrama Momento – Curvatura Columna Tipo con Carga Axial de 11.1 ton. Fuente: Propia.

Momento ϕ secciones

COLUMNA TIPO

CARGA AXIAL 114.3 ton

L(LUZ LIBRE) 2.4 m

L/2 1.2 m

M(+) ^{0°}			
	My	Mu	α
M (ton.m)	77.356	108.46	0.713221
ϕ (m ⁻¹)	0.005619	0.113500	
θ (rad)	0.002248	0.019588	

	M (ton.m)	θ (rad)	SAP2000	
-E				
-D				
-C				
-B				
A	0	0	0	0.0000
B	77.356	0	1.000	0.0000
C	108.46	0.0173	1.402	0.0173
D	21.692	0.0208	0.280	0.0208
E	21.692	0.0347	0.280	0.0347

Tabla 36. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Columna Tipo con Carga Axial de 114.3 ton. Fuente: Propia con análisis en Sap2000.

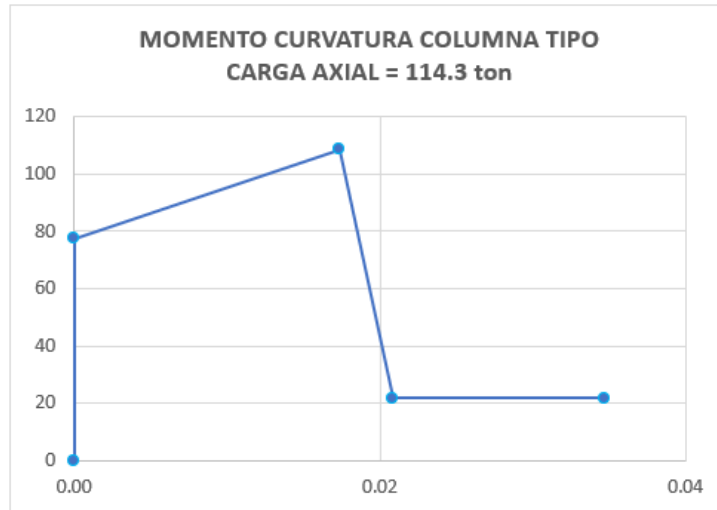


Figura 145. Diagrama Momento – Curvatura Columna Tipo con Carga Axial de 114.3 ton. Fuente: Propia.

Momento ϕ secciones

COLUMNA TIPO

CARGA AXIAL 289.0 ton
 L(LUZ LIBRE) 2.4 m
 L/2 1.2 m

M(+) (0°)			
	My	Mu	α
M (ton.m)	109.921	130.99	0.839156
ϕ (m ⁻¹)	0.006776	0.113000	
θ (rad)	0.002710	0.012813	

	M (ton.m)	θ (rad)	SAP2000	
-E				
-D				
-C				
-B				
A	0	0	0	0.0000
B	109.921	0	1.000	0.0000
C	130.99	0.0101	1.192	0.0101
D	26.198	0.0121	0.238	0.0121
E	26.198	0.0202	0.238	0.0202

Tabla 37. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Columna Tipo con Carga Axial de 289.0 ton. Fuente: Propia con análisis en Sap2000.

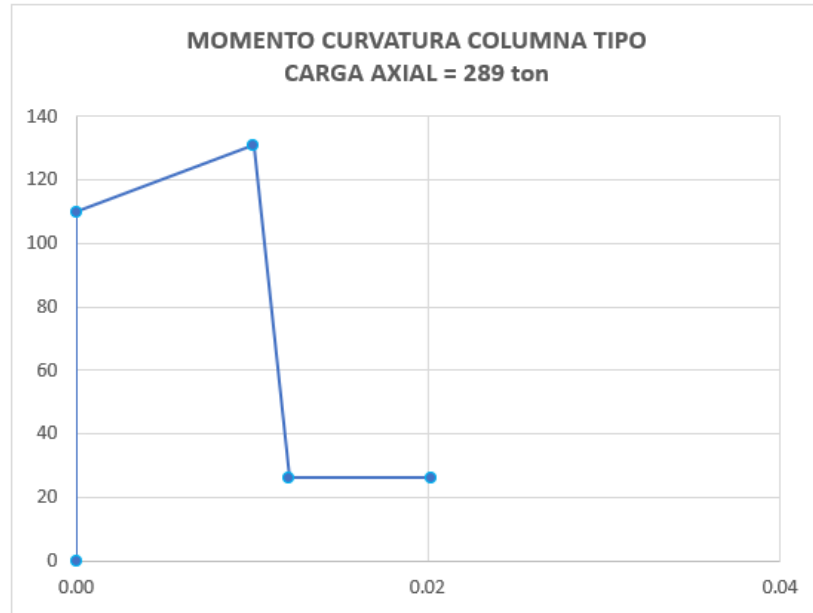


Figura 146. Diagrama Momento – Curvatura Columna Tipo con Carga Axial de 289.0 ton. Fuente: Propia.

Diseño para Microzona Lacustre 200.

Proyecto:	Proyecto Edificio Fijo en la Base
Ubicación del proyecto:	LACUSTRE-200
Sistema Estructural:	Pórticos de Concreto Reforzado
Aceleración horizontal pico efectiva de diseño (Aa):	0.150 g
Aceleración que representa la velocidad horizontal pico efectiva de diseño (Av):	0.200 g
Coefficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos cortos (Fa)	1.2
Coefficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos intermedios (Fv):	3.5
Período corto (Tc):	1.87 seg
Período largo (TL):	4.00 seg
Aceleración horizontal pico efectiva del terreno en superficie (Ao):	0.180 g
Coefficiente de importancia (I):	1
Altura de edificio (h):	17.40 m
Coefficiente de capacidad de disipación de energía básico R _o :	5.0
Coefficiente de reducción de R causado por irregularidades en planta φ _p X:	1.00
Coefficiente de reducción de R causado por irregularidades en planta φ _p Y:	1.00
Coefficiente de reducción de R causado por irregularidades en altura φ _a X:	1.00

Coeficiente de reducción de R causado por irregularidades en altura ϕ_a Y:	1.00
Coeficiente de reducción de R por ausencia de redundancia en el sistema estructural de resistencia sísmica:	1.00
Cu:	1.2
Ct:	0.047
α :	0.9
Período de vibración fundamental aproximado (Ta):	0.615 seg
Cu*Ta	0.738 seg
Aceleración espectral (Sa):	0.450 g
Masa para análisis sísmico (A partir del piso 1):	2912.16 Ton

Tabla 38. Parámetros de entrada Análisis Sísmico Edificación Base Fija.
Fuente: Propia.

Análisis dinámico:
Periodos de Vibración Tx: 0.881 seg
Periodos de Vibración Ty: 0.881 seg
Cortante dinámico total en la base (Vtx): 1073 Ton
Cortante dinámico total en la base (Vty): 1073 Ton

Tabla 39. Parámetros resultantes del análisis dinámico

	Sentido X	Sentido Y
Período fundamental de la edificación (T):	0.738	0.738
Aceleración espectral (Sa)	0.45	0.45
Coeficiente de capacidad de disipación de R:	5	5
Coeficiente de Reducción (Sec. A.5.4.5 NSR-10):	0.80	0.80
Cortante Basal Vb	1310 Ton	1310 Ton
k (NSR A.4.3.2)	0.5<t<2.5 =>	0.5<t<2.5 =>
	k= 1.119	k= 1.119

Tabla 40. Parámetros definitivos modelo matemático

Se calcula el ajuste de los resultados del cortante dinámico en la base, según lo requerido en A.5.4.5 (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA , 2017) teniendo en cuenta que la estructura es de configuración regular.

Factores de Ajuste :

Fx	1049 / 1074	= 0.98	-->	1.00	9.8 (ETABS Factor)
Fy	1049 / 1074	= 0.98	-->	1.00	9.8 (ETABS Factor)

No requiere ajuste, se usarán los valores de cortante dinámico en la base por ser mayores al estático en la base para una estructura regular.

TABLE: Modal Participating Mass Ratios														
Case	Mode	Period	UX	UY	UZ	Sum UX	Sum UY	Sum UZ	RX	RY	RZ	Sum RX	Sum RY	Sum RZ
		sec												
Modal	1	0.881	0	0.8092	0	0	0.8092	0	0.1995	0	0	0.1995	0	0
Modal	2	0.881	0.8092	0	0	0.8092	0.8092	0	0	0.1995	0	0.1995	0.1995	0
Modal	3	0.773	0	0	0	0.8092	0.8092	0	0	0	0.8112	0.1995	0.1995	0.8112
Modal	4	0.273	0.1062	0	0	0.9154	0.8092	0	0	0.5759	0	0.1995	0.7754	0.8112
Modal	5	0.273	0	0.1062	0	0.9154	0.9154	0	0.5759	0	0	0.7754	0.7754	0.8112
Modal	6	0.241	0	0	0	0.9154	0.9154	0	0	0	0.105	0.7754	0.7754	0.9162
Modal	7	0.148	0.0442	0	0	0.9596	0.9154	0	0	0.0846	0	0.7754	0.86	0.9162
Modal	8	0.148	0	0.0442	0	0.9596	0.9596	0	0.0846	0	0	0.86	0.86	0.9162
Modal	9	0.131	0	0	0	0.9596	0.9596	0	0	0	0.0438	0.86	0.86	0.96
Modal	10	0.095	0.024	0	0	0.9836	0.9596	0	0	0.0911	0	0.86	0.9511	0.96
Modal	11	0.095	0	0.024	0	0.9836	0.9836	0	0.0911	0	0	0.9511	0.9511	0.96
Modal	12	0.085	0	0	0	0.9836	0.9836	0	0	0	0.0237	0.9511	0.9511	0.9837

Tabla 41. Factores de participación modal. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

TABLE: Story Forces								
Story	Load Case/Combo	Location	P	VX	VY	T	MX	MY
			tonf	tonf	tonf	tonf-m	tonf-m	tonf-m
Story6	SPCX981 Max	Top	0	236.7666	0	2841.1993	0	0.0001
Story6	SPCX981 Max	Bottom	0	236.8798	0	2842.558	0	689.257
Story6	SPCY981 Max	Top	0	0	236.7666	2841.1993	0.0001	0
Story6	SPCY981 Max	Bottom	0	0	236.8798	2842.558	689.257	0
Story5	SPCX981 Max	Top	0	509.1708	0	6110.05	0	689.2571
Story5	SPCX981 Max	Bottom	0	509.2665	0	6111.1984	0	2163.5208
Story5	SPCY981 Max	Top	0	0	509.1708	6110.05	689.2571	0
Story5	SPCY981 Max	Bottom	0	0	509.2665	6111.1984	2163.5208	0
Story4	SPCX981 Max	Top	0	735.6829	0	8828.1943	0	2163.5208
Story4	SPCX981 Max	Bottom	0	735.7593	0	8829.1114	0	4291.1082
Story4	SPCY981 Max	Top	0	0	735.6829	8828.1942	2163.5208	0
Story4	SPCY981 Max	Bottom	0	0	735.7593	8829.1113	4291.1082	0
Story3	SPCX981 Max	Top	0	910.0708	0	10920.8499	0	4291.1082
Story3	SPCX981 Max	Bottom	0	910.1255	0	10921.5061	0	6922.401
Story3	SPCY981 Max	Top	0	0	910.0708	10920.8499	4291.1082	0
Story3	SPCY981 Max	Bottom	0	0	910.1255	10921.5061	6922.401	0
Story2	SPCX981 Max	Top	0	1024.5996	0	12295.195	0	6922.4011
Story2	SPCX981 Max	Bottom	0	1024.6297	0	12295.557	0	9883.9847

TABLE: Story Forces								
Story	Load Case/Combo	Location	P	VX	VY	T	MX	MY
			tonf	tonf	tonf	tonf-m	tonf-m	tonf-m
Story2	SPCY981 Max	Top	0	0	1024.5996	12295.195	6922.4011	0
Story2	SPCY981 Max	Bottom	0	0	1024.6297	12295.5569	9883.9847	0
Story1	SPCX981 Max	Top	0	1073.1814	0	12878.1765	0	9883.9848
Story1	SPCX981 Max	Bottom	0	1073.1888	0	12878.2653	0	12975.6512
Story1	SPCY981 Max	Top	0	0	1073.1814	12878.1765	9883.9848	0
Story1	SPCY981 Max	Bottom	0	0	1073.1888	12878.2652	12975.6512	0

Tabla 42. Fuerzas dinámicas por piso. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

Se usaron las combinaciones de carga siguientes para el diseño por resistencia última:

1.4D

1.2D + 1.6L + 0.5G

1.2D + 1.0L + E

0.9D + E

Las secciones definitivas y el refuerzo seleccionado para los elementos estructurales columnas y vigas se muestran a continuación.

Plantas 5 y 6.

Vigas perimetrales:

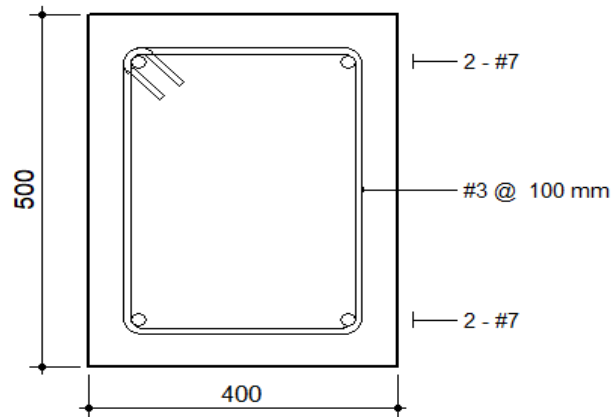


Figura 147. Sección de viga perimetral plantas 5 y 6. Fuente: Propia.

Vigas interiores:

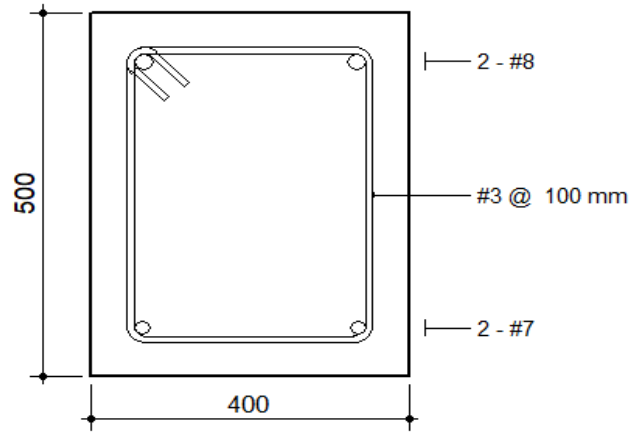


Figura 148. Sección de viga interior plantas 5 y 6. Fuente: Propia.

Plantas 1, 2, 3 y 4.

Vigas perimetrales:

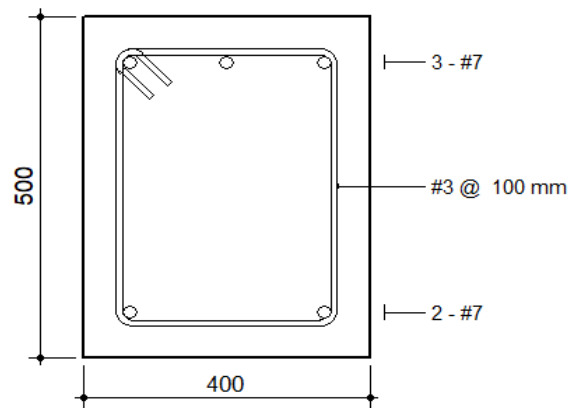


Figura 149. Sección de viga perimetral plantas 1, 2, 3 y 4. Fuente: Propia.

Vigas interiores:

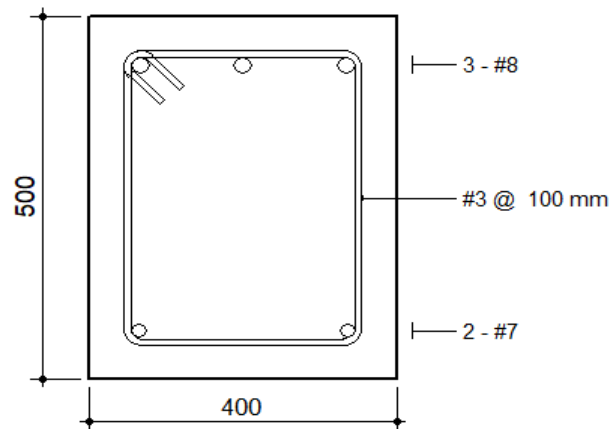


Figura 150. Sección de viga interior plantas 1, 2, 3 y 4. Fuente: Propia.

Sección Columna

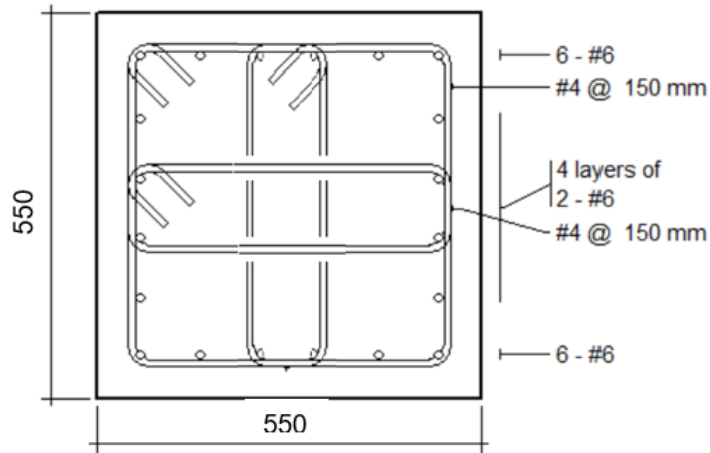


Figura 151. Sección de columna. Fuente: Propia.

Con estas secciones se construyeron los diagramas momento curvatura para cada una de las rótulas a asignar al modelo para el análisis Push Over, los parámetros para los gráficos se obtuvieron mediante la aplicación Section Designer del software Sap2000.

Momento ϕ secciones

VGP P5-6

L(LUZ LIBRE) 5.35 m
L/2 2.675 m

	M(+) (0°)			M(-) (180°)			
	My	Mu	α		My	Mu	α
M (ton.m)	13.60	18.98	0.716386	M (ton.m)	13.597	18.98	0.716386
ϕ (m⁻¹)	0.006088	0.129800		ϕ (m⁻¹)	0.006088	0.129800	
θ (rad)	0.005428	0.049241		θ (rad)	0.005428	0.049241	

	M (ton.m)	θ (rad)
-E	-3.796	-0.0876
-D	-3.796	-0.0526
-C	-18.98	-0.0438
-B	-13.597	0
A	0	0

SAP2000	
-0.279	-0.0876
-0.279	-0.0526
-1.396	-0.0438
-1.000	0.0000
0	0.0000

	M (ton.m)	θ (rad)
B	13.597	0
C	18.98	0.0438
D	3.796	0.0526
E	3.796	0.0876

SAP2000	
1.000	0.0000
1.396	0.0438
0.279	0.0526
0.279	0.0876

Tabla 43. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Vigas Perimetrales Plantas 5 y 6. Fuente: Propia con análisis en Sap2000.

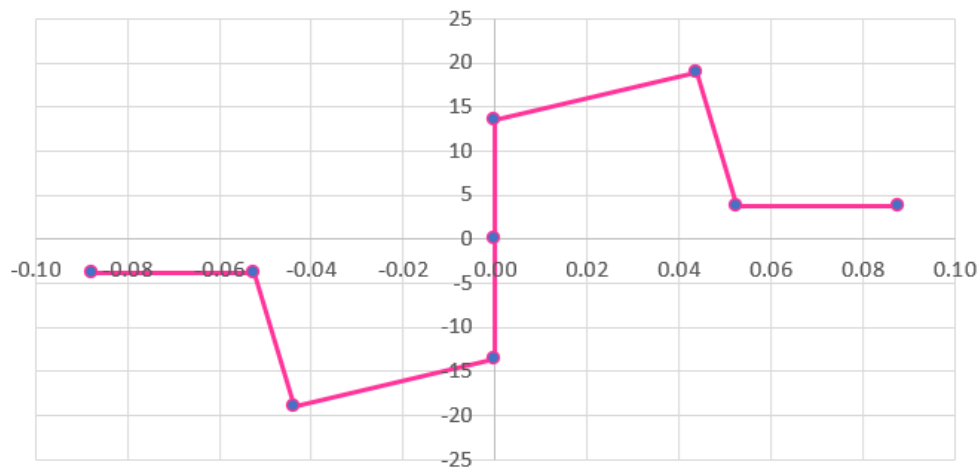


Figura 152. Diagrama Momento – Curvatura Vigas Perimetrales Plantas 5 y 6. Fuente: Propia.

Momento ϕ secciones

VGI P5-6

L(LUZ LIBRE) 5.35 m
L/2 2.675 m

	M(+) (0°)			M(-) (180°)			
	My	Mu	α		My	Mu	α
M (ton.m)	13.65	18.95	0.720264	M (ton.m)	17.564	24.52	0.716313
ϕ (m⁻¹)	0.006063	0.129000		ϕ (m⁻¹)	0.006366	0.132200	
θ (rad)	0.005406	0.048414		θ (rad)	0.005676	0.050289	

	M (ton.m)	θ (rad)
-E	-4.904	-0.0892
-D	-4.904	-0.0535

SAP2000	
-0.279	-0.0892
-0.279	-0.0535

	M (ton.m)	θ (rad)
-C	-24.52	-0.0446
-B	-17.564	0
A	0	0
B	13.649	0
C	18.95	0.0430
D	3.79	0.0516
E	3.79	0.0860

SAP2000	
-1.396	-0.0446
-1.000	0.0000
0	0.0000
1.000	0.0000
1.388	0.0430
0.278	0.0516
0.278	0.0860

Tabla 44. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Vigas Interiores Plantas 5 y 6. Fuente: Propia con análisis en Sap2000.

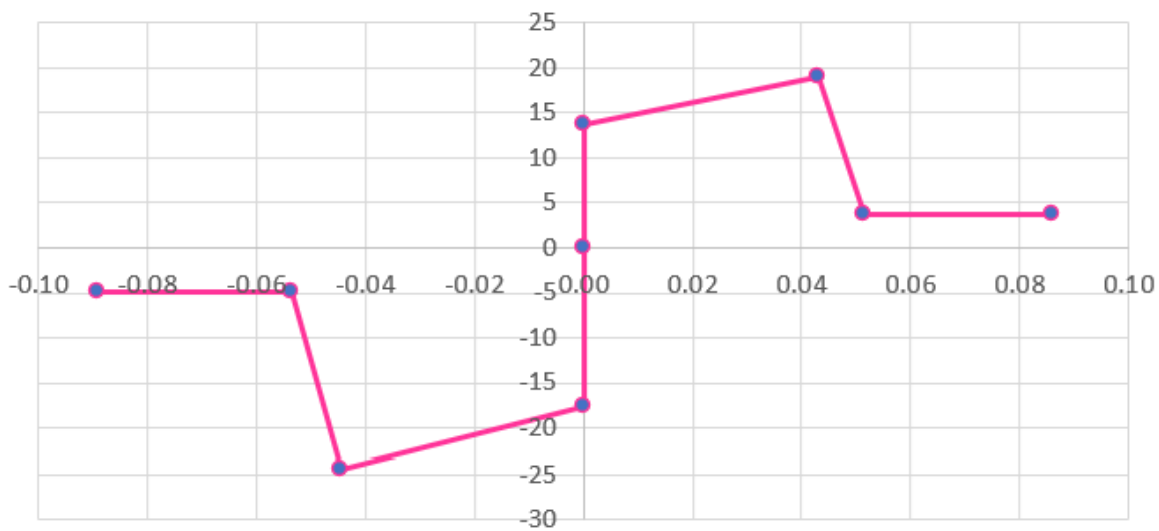


Figura 153. Diagrama Momento – Curvatura Vigas Interiores Plantas 5 y 6. Fuente: Propia.

Momento ϕ secciones

VG P 1, 2, 3 y 4

L(LUZ LIBRE) 5.35 m

L/2 2.675 m

	M(+) (0°)			M(-) (180°)			
	My	Mu	α		My	Mu	α
M (ton.m)	13.62	19.06	0.714638	M (ton.m)	19.944	27.77	0.718185
ϕ (m ⁻¹)	0.006038	0.129000		ϕ (m ⁻¹)	0.006478	0.135400	
θ (rad)	0.005384	0.049168		θ (rad)	0.005776	0.051204	

	M (ton.m)	θ (rad)
-E	-5.554	-0.0909
-D	-5.554	-0.0545
-C	-27.77	-0.0454
-B	-19.944	0
A	0	0
B	13.621	0
C	19.06	0.0438
D	3.812	0.0525
E	3.812	0.0876

SAP2000	
-0.278	-0.0909
-0.278	-0.0545
-1.392	-0.0454
-1.000	0.0000
0	0.0000
1.000	0.0000
1.399	0.0438
0.280	0.0525
0.280	0.0876

Tabla 45. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Vigas Perimetrales Plantas 1, 2, 3, y 4. Fuente: Propia con análisis en Sap2000.

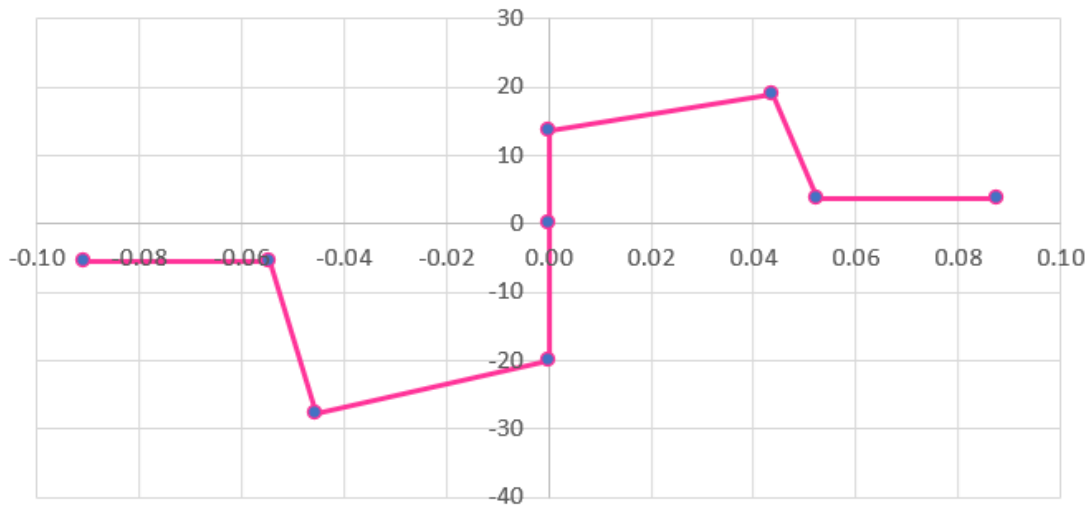


Figura 154. Diagrama Momento – Curvatura Vigas Perimetrales Plantas 1, 2, 3, y 4. Fuente: Propia.

Momento ϕ secciones

VGIP 1, 2, 3, 4

L(LUZ LIBRE) 5.35 m
L/2 2.675 m

	M(+) (0°)			M(-) (180°)			
	My	Mu	α		My	Mu	α
M (ton.m)	13.52	19.02	0.710883	M (ton.m)	25.733	35.58	0.723243
ϕ (m ⁻¹)	0.005995	0.129000		ϕ (m ⁻¹)	0.006839	0.145200	
θ (rad)	0.005346	0.049649		θ (rad)	0.006098	0.054044	

	M (ton.m)	θ (rad)
-E	-7.116	-0.0959
-D	-7.116	-0.0575
-C	-35.58	-0.0479
-B	-25.733	0
A	0	0
B	13.521	0
C	19.02	0.0443
D	3.804	0.0532
E	3.804	0.0886

SAP2000	
-0.277	-0.0959
-0.277	-0.0575
-1.383	-0.0479
-1.000	0.0000
0	0.0000
1.000	0.0000
1.407	0.0443
0.281	0.0532
0.281	0.0886

Tabla 46. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Vigas Interiores Plantas 1, 2, 3, y 4. Fuente: Propia con análisis en Sap2000.

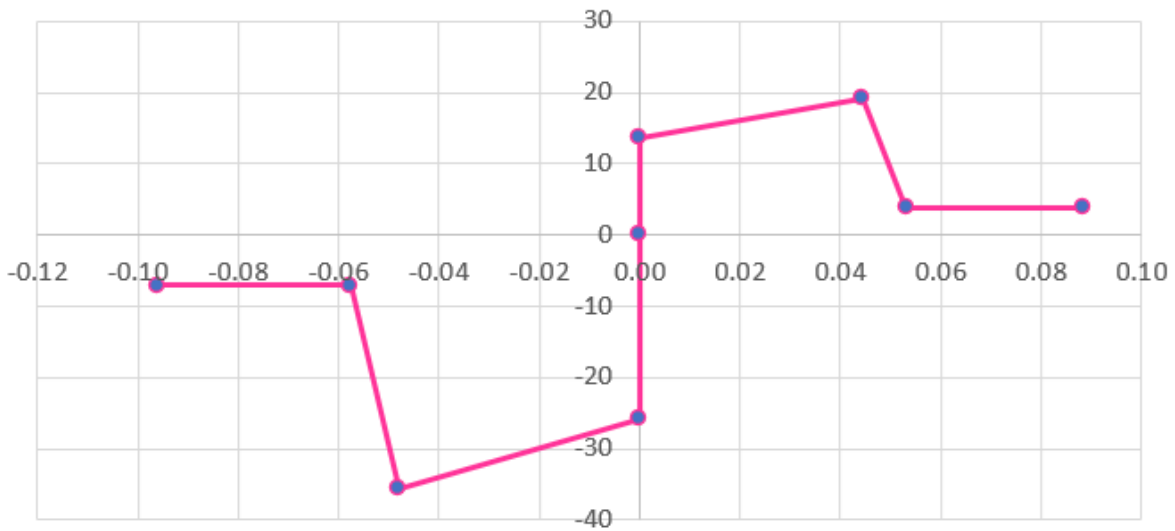


Figura 155. Diagrama Momento – Curvatura Vigas Interiores Plantas 1, 2, 3, y 4. Fuente: Propia.

Momento ϕ secciones

COLUMNA TIPO

CARGA AXIAL 0 ton

L(LUZ LIBRE) 2.4 m

L/2 1.2 m

M(+) (0°)			
	My	Mu	α
M (ton.m)	34.95	56.92	0.614055
ϕ (m ⁻¹)	0.005939	0.129000	
θ (rad)	0.002376	0.027946	

	M (ton.m)	θ (rad)
-E		
-D		
-C		
-B		
A	0	0
B	34.952	0
C	56.92	0.0256
D	11.384	0.0307
E	11.384	0.0511

SAP2000	
0	0.0000
1.000	0.0000
1.629	0.0256
0.326	0.0307
0.326	0.0511

Tabla 47. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Columna Tipo sin Carga Axial. Fuente: Propia con análisis en Sap2000.

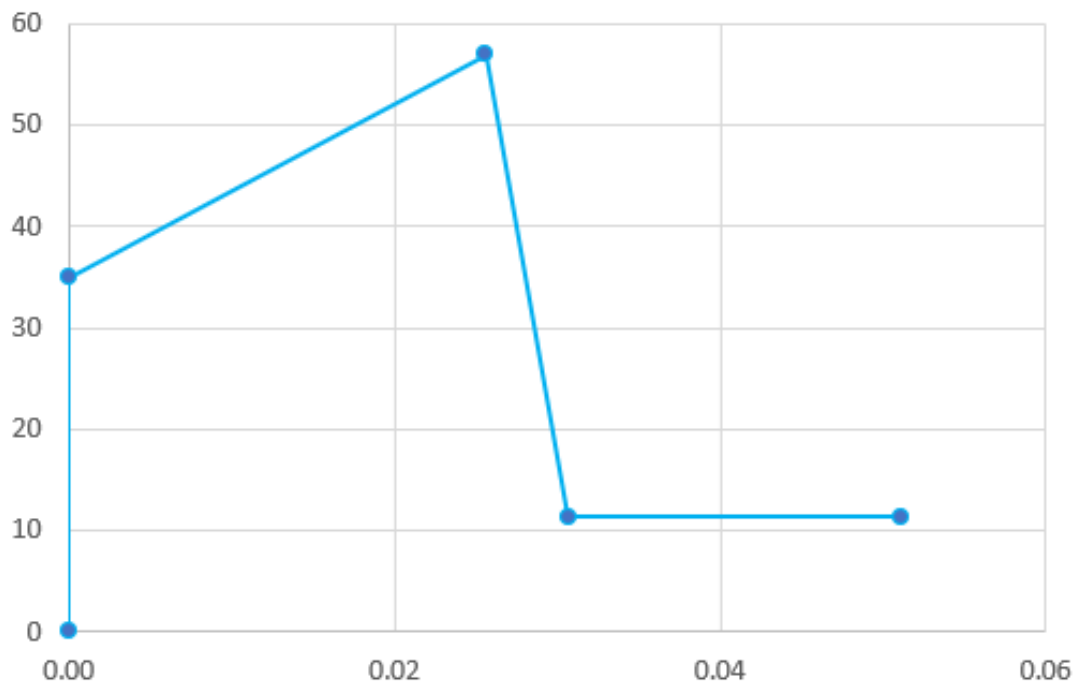


Figura 156. Diagrama Momento – Curvatura Columna Tipo sin Carga Axial. Fuente: Propia.

Momento ϕ secciones

COLUMNA TIPO

CARGA AXIAL 5.2 ton

L(LUZ LIBRE) 2.4 m

L/2 1.2 m

M(+) (0°)			
	My	Mu	α
M (ton.m)	35.90	57.70	0.622236
ϕ (m⁻¹)	0.005997	0.128200	
θ (rad)	0.002399	0.027344	

	M (ton.m)	θ (rad)	SAP2000	
-E				
-D				
-C				
-B				
A	0	0	0	0.0000
B	35.903	0	1.000	0.0000
C	57.7	0.0249	1.607	0.0249
D	11.54	0.0299	0.321	0.0299
E	11.54	0.0499	0.321	0.0499

Tabla 48. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Columna Tipo con Carga Axial de 5.2 ton. Fuente: Propia con análisis en Sap2000.

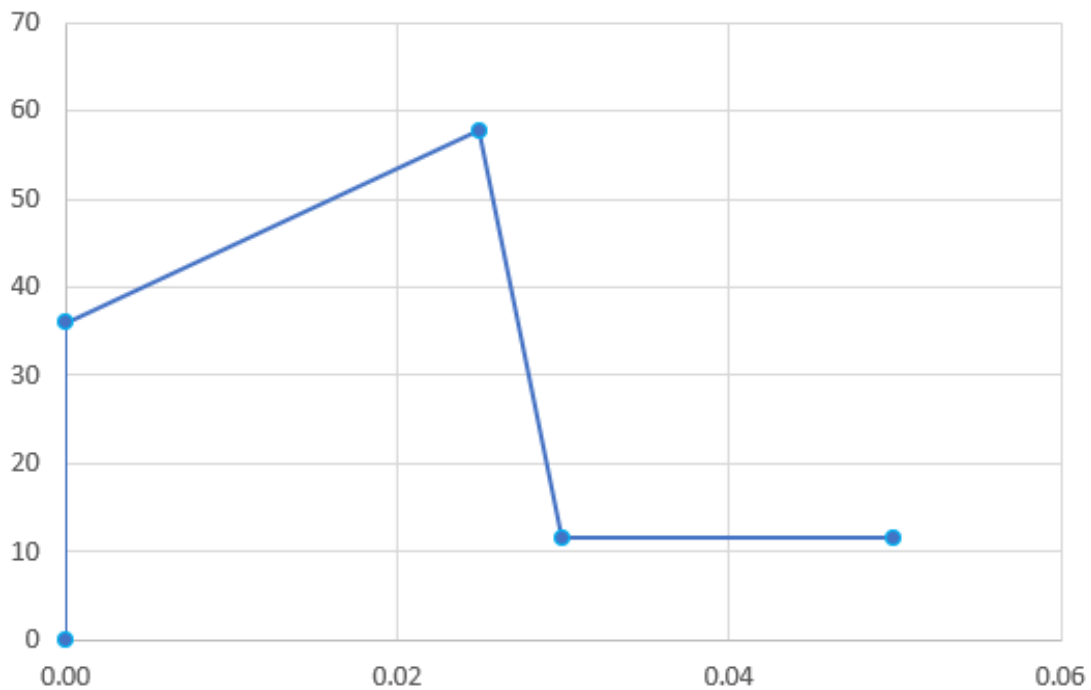


Figura 157. Diagrama Momento – Curvatura Columna Tipo con Carga Axial de 5.2 ton. Fuente: Propia.

Momento ϕ secciones

COLUMNA TIPO

CARGA AXIAL 82.6 ton
 L(LUZ LIBRE) 2.4 m
 L/2 1.2 m

M(+)(0°)			
	My	Mu	α
M (ton.m)	49.98	68.89	0.725461
ϕ (m⁻¹)	0.006856	0.143600	
θ (rad)	0.002742	0.023855	

	M (ton.m)	θ (rad)	SAP2000	
-E				
-D				
-C				
-B				
A	0	0	0	0.0000
B	49.977	0	1.000	0.0000
C	68.89	0.0211	1.378	0.0211
D	13.778	0.0253	0.276	0.0253
E	13.778	0.0422	0.276	0.0422

Tabla 49. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Columna Tipo con Carga Axial de 82.6 ton. Fuente: Propia con análisis en Sap2000.

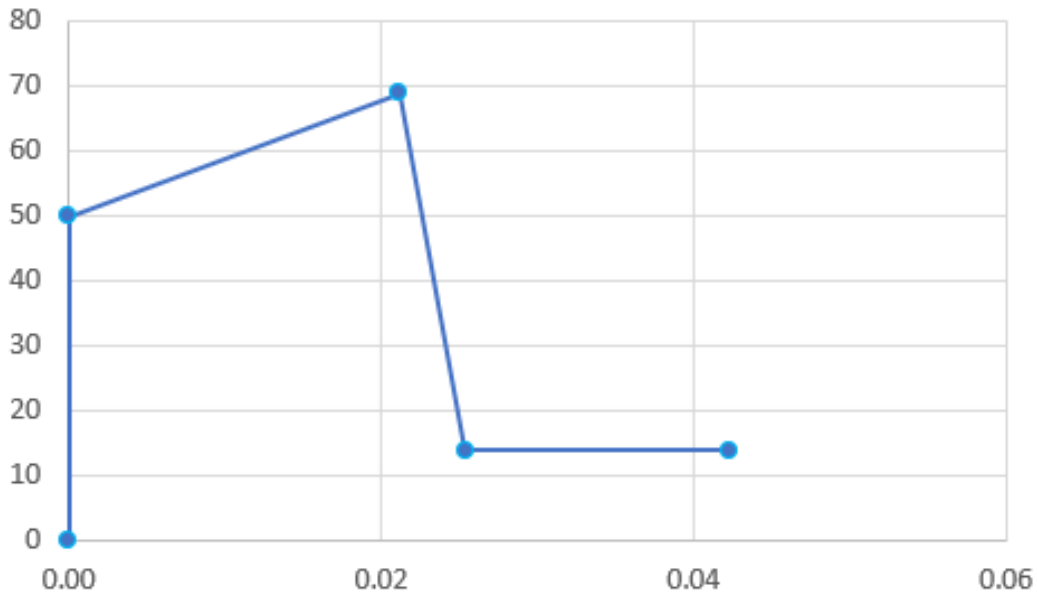


Figura 158. Diagrama Momento – Curvatura Columna Tipo con Carga Axial de 82.6 ton. Fuente: Propia.

Momento ϕ secciones

COLUMNA TIPO

CARGA AXIAL 290.7 ton

L(LUZ LIBRE) 2.4 m

L/2 1.2 m

M(+) (0°)			
	My	Mu	α
M (ton.m)	80.09	86.00	0.931256
ϕ (m ⁻¹)	0.009287	0.147100	
θ (rad)	0.003715	0.009515	

	M (ton.m)	θ (rad)
-E		
-D		
-C		
-B		
A	0	0
B	80.088	0
C	86	0.0058
D	17.2	0.0070
E	17.2	0.0116

SAP2000	
0	0.0000
1.000	0.0000
1.074	0.0058
0.215	0.0070
0.215	0.0116

Tabla 50. Obtención de parámetros para el diagrama Momento – Curvatura Columna Tipo con Carga Axial de 290.7 ton. Fuente: Propia con análisis en Sap2000.

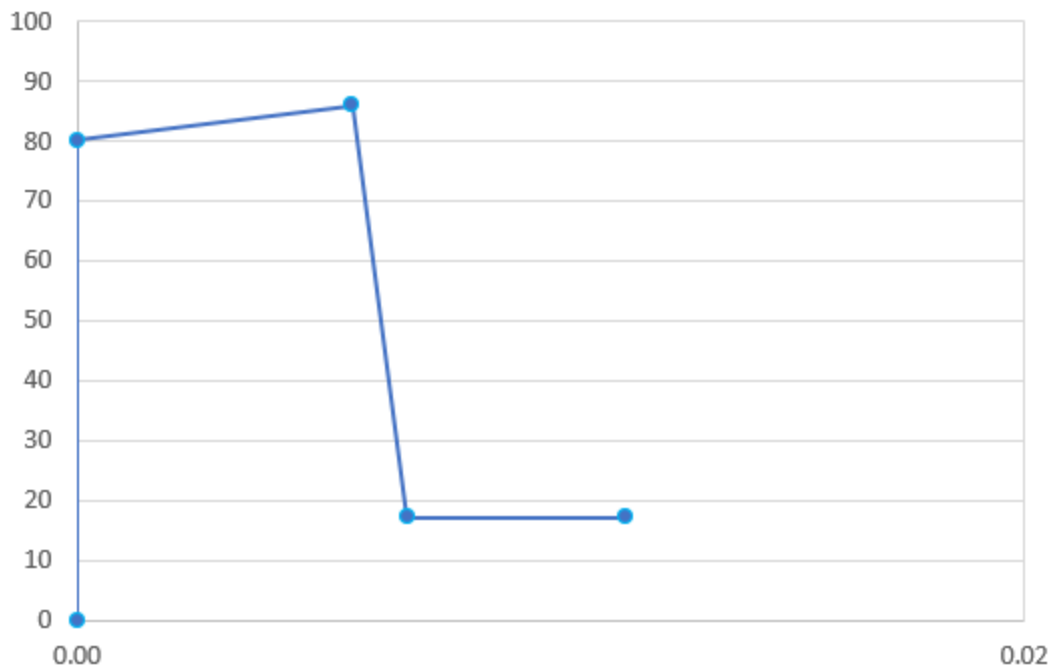


Figura 159. Diagrama Momento – Curvatura Columna Tipo con Carga Axial de 290.7 ton. Fuente: Propia.

Capítulo 5 RESULTADOS

En esta sección se discutirán los resultados de los análisis fuerza horizontal equivalente (cálculo de parámetros base y de comparación), análisis dinámico modal espectral (diseño de la superestructura y de la edificación con base fija), análisis tiempo historia no lineal (comprobación de la respuesta en los modelos aislados y verificación del desempeño) y estático no lineal Push Over (verificación del desempeño del modelo en base fija). Primero se recopilarán los parámetros obtenidos con el prediseño inicial de aisladores para cada tipo y la configuración final que conllevó a unos resultados muy cercanos a los objetivos propuestos. Después se revisarán los datos obtenidos de la modelación matemática de las edificaciones estudiadas, en cuanto a periodos, desplazamientos, derivas de piso, reacciones en la base, aceleraciones por piso, y respuestas histeréticas de los aisladores. Más adelante se verificará el desempeño alcanzado para los modelos seleccionados en la etapa anterior.

5.1 Configuración Sistema de Aislación.

Se presentará el desarrollo para un solo sistema de aislación como ejemplo en el cuerpo del trabajo de investigación, para la microzona Piedemonte C, se resalta que esto se realizó para todos los tipos de sistemas de aislamiento sísmico y para la microzona Lacustre 200 también. Para no tener un documento tan extenso, en el Anexo 1, se colocarán dos sistemas más (el HDR y el FPS simple Microzona Piedemonte C) y en esta sección se colocarán tabulados y resumidos ya los datos que se usarán en el modelamiento matemático, empleando el análisis no lineal tiempo historia.

Datos del modelo aislado parámetros objetivos.

M_s	292.42	tonf-s ² /m	W_s	2868.605	tonf
M_b	63.93	tonf-s ² /m	W_b	627.1961	tonf
M_T	356.35	tonf-s ² /m	W_T	3495.801	tonf
T_b	3	s	Periodo Objetivo		
K_b	1563.1	tonf/m			
β	15%		Amortiguamiento Objetivo		
B_M	1.38				
B_M	1.38				
S_a (g)	0.204				
D_M	33.0437	cm	Desplazamiento Objetivo		
D_{TM}	38.0002	cm			

Para todos los casos verificados el centro de masa coincidió con el de rigidez por ser simétrica y regular la estructura, se debe siempre buscar con la configuración en planta de los aisladores que la excentricidad natural sea mínima para disminuir la incidencia de efectos torsionales más allá de los accidentales.

	X (m)	Y (m)
CM	12	12
CR	12	12
Excentricidad Natural	0	0

Configuración 1. Aislador LRB + Deslizador SL.

Tipo	P _{prom.}	P _{máx.}	Cantidad	K _{eff}	E _{ciclo}	FR	Q _d
1 (LRB-1)	224.3	396.7	9.0	109.8	11.5	13.6	9.0
2 (LRB-2)	82.8	173.2	4.0	98.5	11.4	11.7	9.0
3 (SL)	134.7	259.2	12.0	20.8	9.1	0.0	6.9

Tabla 51. Parámetros finales para modelación del sistema de Aislación LRB + SL. Fuente: Propia.

Row Labels	P _{servicio}	P _{máx}	x _i	y _i	Tipo de Aislador	K _{eff}	EDC	FR	Q _d	P _{ixi}	P _{iyi}	K _{effxi}	K _{effyi}
	tonf	tonf	m	m		tonf/m	tonf.m	tonf	tonf	tonf.m	tonf.m	tonf	tonf
1	82.7897	173.198	0	0	2	98.5	11.4	11.7	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	133.497	252.897	0	6	3	20.8	9.1	0.0	6.9	0.0	801.0	0.0	124.5
3	137.181	259.184	0	12	3	20.8	9.1	0.0	6.9	0.0	1646.2	0.0	249.1
4	133.497	252.897	0	18	3	20.8	9.1	0.0	6.9	0.0	2402.9	0.0	373.6
5	82.7897	173.198	0	24	2	98.5	11.4	11.7	9.0	0.0	1987.0	0.0	2363.4
6	133.497	234.328	6	0	3	20.8	9.1	0.0	6.9	801.0	0.0	124.5	0.0
7	220.272	375.888	6	6	1	109.8	11.5	13.6	9.0	1321.6	1321.6	659.1	659.1
8	226.194	386.122	6	12	1	109.8	11.5	13.6	9.0	1357.2	2714.3	659.1	1318.2
9	220.272	375.888	6	18	1	109.8	11.5	13.6	9.0	1321.6	3964.9	659.1	1977.3
10	133.497	234.328	6	24	3	20.8	9.1	0.0	6.9	801.0	3203.9	124.5	498.2
11	137.181	240.571	12	0	3	20.8	9.1	0.0	6.9	1646.2	0.0	249.1	0.0
12	226.194	385.946	12	6	1	109.8	11.5	13.6	9.0	2714.3	1357.2	1318.2	659.1
13	232.394	396.662	12	12	1	109.8	11.5	13.6	9.0	2788.7	2788.7	1318.2	1318.2
14	226.194	385.946	12	18	1	109.8	11.5	13.6	9.0	2714.3	4071.5	1318.2	1977.3
15	137.181	240.571	12	24	3	20.8	9.1	0.0	6.9	1646.2	3292.4	249.1	498.2
16	133.497	234.328	18	0	3	20.8	9.1	0.0	6.9	2402.9	0.0	373.6	0.0
17	220.272	375.888	18	6	1	109.8	11.5	13.6	9.0	3964.9	1321.6	1977.3	659.1
18	226.194	386.122	18	12	1	109.8	11.5	13.6	9.0	4071.5	2714.3	1977.3	1318.2
19	220.272	375.888	18	18	1	109.8	11.5	13.6	9.0	3964.9	3964.9	1977.3	1977.3
20	133.497	234.328	18	24	3	20.8	9.1	0.0	6.9	2402.9	3203.9	373.6	498.2
21	82.7897	173.198	24	0	2	98.5	11.4	11.7	9.0	1987.0	0.0	2363.4	0.0
22	133.497	252.897	24	6	3	20.8	9.1	0.0	6.9	3203.9	801.0	498.2	124.5

Row Labels	Pservicio	Pmáx	xi	yi	Tipo de Aislador	Keff	EDC	FR	Qd	Pixi	Piyi	Keffxi	Keffyi
	tonf	tonf	m	m		tonf/m	tonf.m	tonf	tonf	tonf.m	tonf.m	tonf	tonf
23	137.181	259.184	24	12	3	20.8	9.1	0.0	6.9	3292.4	1646.2	498.2	249.1
24	133.497	252.897	24	18	3	20.8	9.1	0.0	6.9	3203.9	2402.9	498.2	373.6
25	82.7897	173.198	24	24	2	98.5	11.4	11.7	9.0	1987.0	1987.0	2363.4	2363.4
Totales	3966.1					1631.6	258.2	169.6	199.9	47593.4	47593.4	19579.5	19579.5

Tabla 52. Distribución en planta del sistema de Aislación LRB + SL. Fuente: Propia.

Parámetros Finales

K_b 1631.6 tonf/m

T_b 2.94 s

T_f 0.938

T_b/T_f 3.1

EDC 258.2 tonf*m

β_M 23%

B_M 1.58

FR 169.6 tonf

%FR 4.85% ≥2.5%W

Nuevos cálculos para el amortiguamiento calculado

S_a (g) 0.208

D_M 28.1687 cm

D_{TM} 32.3940 cm

V_b 20.8% W

V_{st} 19.1% W

R_a 2

V_s 334.4 tonf

V_s 9.6% W

Q_{ds} 199.9 tonf

1.5Q_{ds} 299.90

Vs

1.67 Qds \geq 1.5Qds

Los demás resultados enunciados unos párrafos atrás, se pueden ver en el Anexo 1 para las demás configuraciones de los aisladores de ejemplo, a continuación, sólo se relacionan los datos de entrada para el software ETABS resumidos para cada sistema de aislamiento sísmico. Se aclara que según el diseño del tipo de aislador ETABS solicita valores adicionales y en algunos casos otras propiedades que ya se han establecido en el capítulo anterior para cada sistema.

Configuración	Tipo	Pprom.	Pmáx.	Cantidad	Keff	Eciclo	FR	Qd
LRB + SL	1 (LRB-1)	224.3	396.7	9.0	109.8	11.5	13.6	9.0
	2 (LRB-2)	82.8	173.2	4.0	98.5	11.4	11.7	9.0
	3 (SL)	134.7	259.2	12.0	20.8	9.1	0.0	6.9
HDR	1 (HDR-1)	224.3	396.7	9.0	61.2	6.3	7.5	5.1
	2 (HDR-2)	121.7	259.2	16.0	62.3	6.4	7.7	5.1
FPS1	1 (FPS1-1)	224.25	396.6616	9	108.27	12.29	13.24	9.30
	2 (FPS1-2)	133.50	252.8972	8	59.76	5.44	7.82	4.12
	3 (FPS1-3)	109.99	259.1844	8	36.06	3.28	4.72	2.48
FPS2	1 (FPS2-1)	224.25	396.6616	9	74.79	11.52	8.00	8.71
	2 (FPS2-2)	134.73	259.1844	12	40.00	4.99	4.72	3.77
	3 (FPS2-3)	82.79	173.1983	4	24.14	3.01	2.85	2.28
FPS3	1 (FPS3-1)	224.25	396.6616	9	107.37	8.62	20.25	7.23
	2 (FPS3-2)	134.73	259.1844	12	65.46	7.57	10.75	6.16
	3 (FPS3-3)	82.79	173.1983	4	52.48	6.07	8.62	4.94

Tabla 53. Parámetros finales según configuración del sistema de aislación
Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia.

Configuración	Tipo	Pprom.	Pmáx.	Cantidad	Keff	Eciclo	FR	Qd
LRB + SL	1 (LRB-1)	114.0	259.2	10.0	156.2	28.6	33.3	14.1
	3 (SL)	188.4	396.7	15.0	31.4	33.7	0.0	16.3
HDR	1 (HDR-1)	158.6	396.7	25.0	60.0	15.1	11.6	7.7
FPS1	1 (FPS1-1)	224.25	396.6616	9	46.67	25.66	11.45	9.30
	2 (FPS1-2)	134.73	259.1844	12	23.57	7.57	6.76	2.74
	3 (FPS1-3)	82.79	173.1983	4	19.03	13.71	4.08	4.97
FPS2	1 (FPS2-1)	224.25	396.6616	9	47.51	27.26	11.45	9.88
	2 (FPS2-2)	134.73	259.1844	12	26.56	13.25	6.76	4.80
	3 (FPS2-3)	82.79	173.1983	4	16.03	8.00	4.08	2.90
FPS3	1 (FPS3-1)	224.25	396.6616	9	53.43	24.34	16.41	9.01
	2 (FPS3-2)	134.73	259.1844	12	31.84	19.14	7.85	6.84
	3 (FPS3-3)	82.79	173.1983	4	23.69	14.24	5.84	5.09

Tabla 54. Parámetros finales según configuración del sistema de aislación
Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia.

5.2 Parámetros comparativos edificaciones con base fija y con sistemas aislados.

Periodo de la edificación.

Para la obtención de las propiedades dinámicas de esta sección, para los modelos se utilizó el análisis modal espectral.

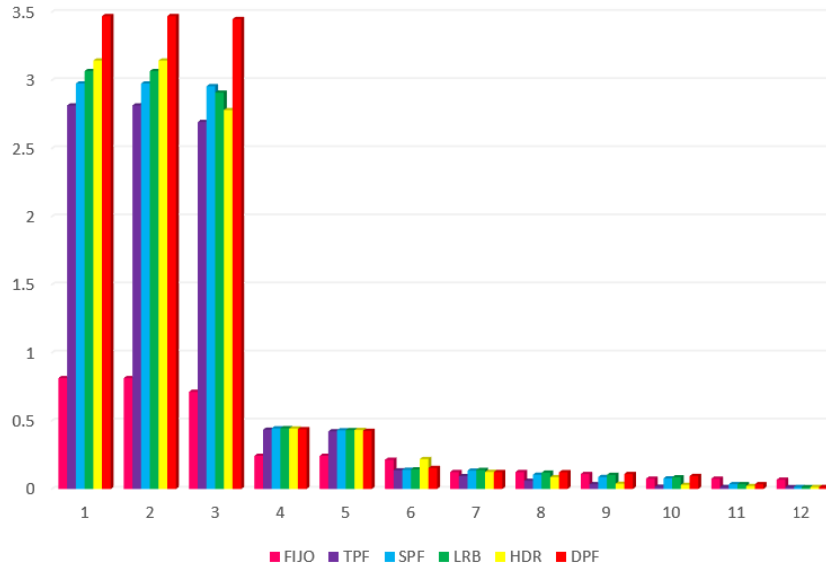


Figura 160. Periodos Modelos Matemáticos Edificación Fija vs Aisladas Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

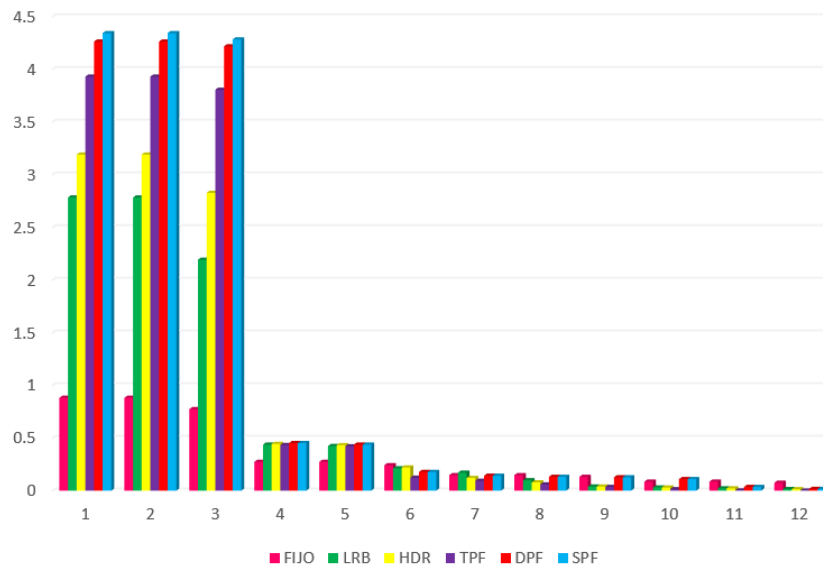


Figura 161. Periodos Modelos Matemáticos Edificación Fija vs Aisladas Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

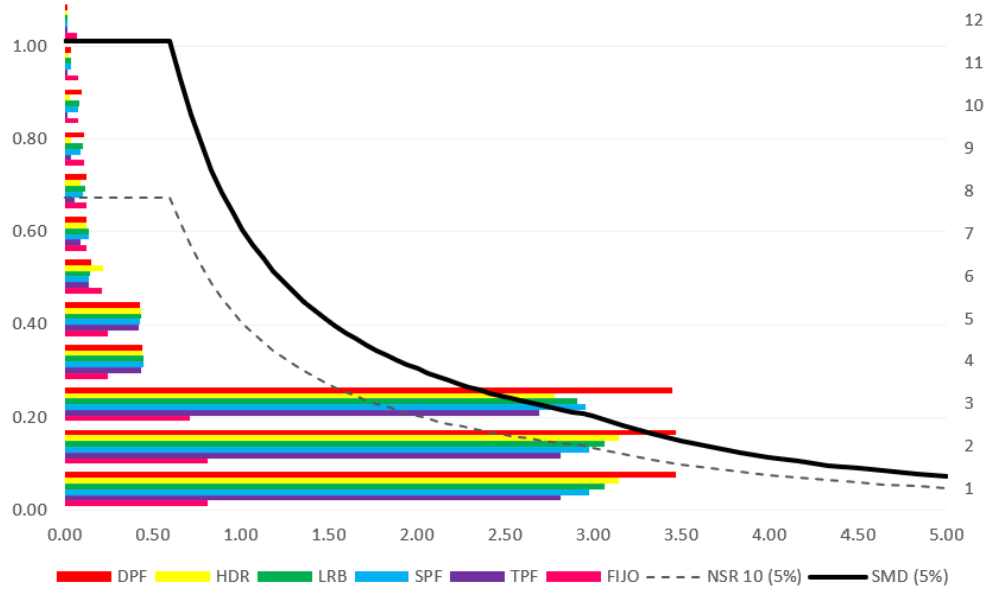


Figura 162. Comparación Espectros de diseño NSR – 10 y Sismo Máximo vs. Periodos Modelos Matemáticos Edificación Fija vs Aisladas Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

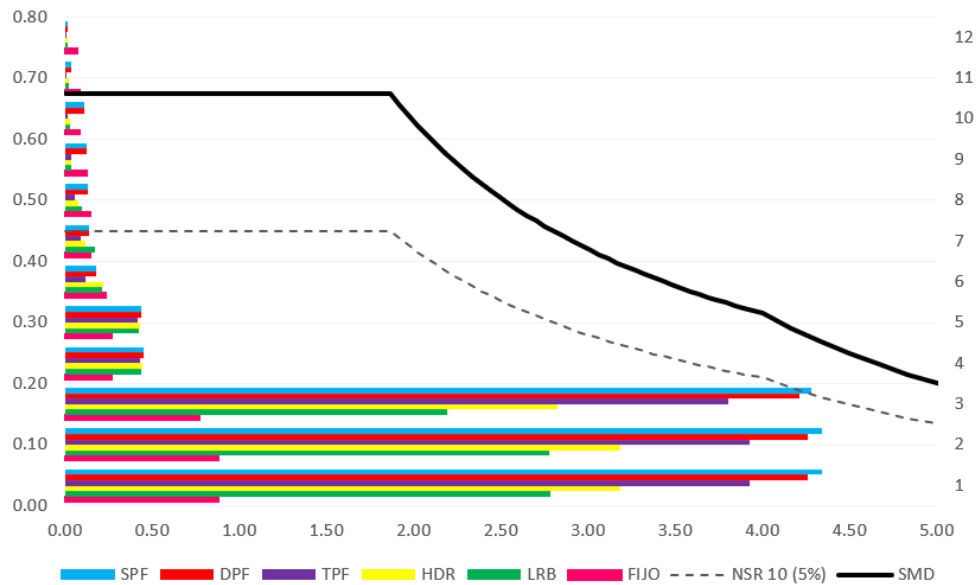


Figura 163. Comparación Espectros de diseño NSR – 10 y Sismo Máximo vs. Periodos Modelos Matemáticos Edificación Fija vs Aisladas Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

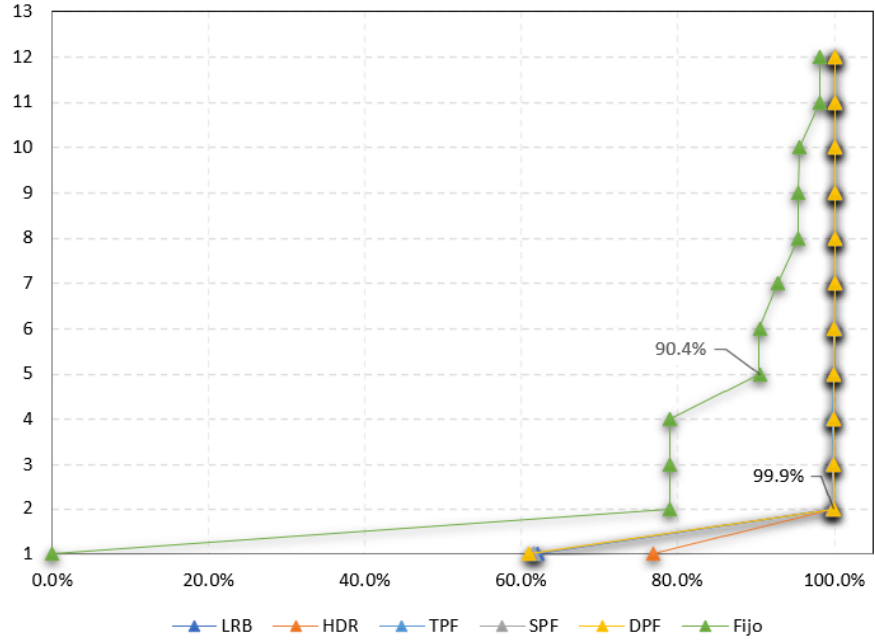


Figura 164. Participación modal dirección X Edificación Fija vs Aisladas Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

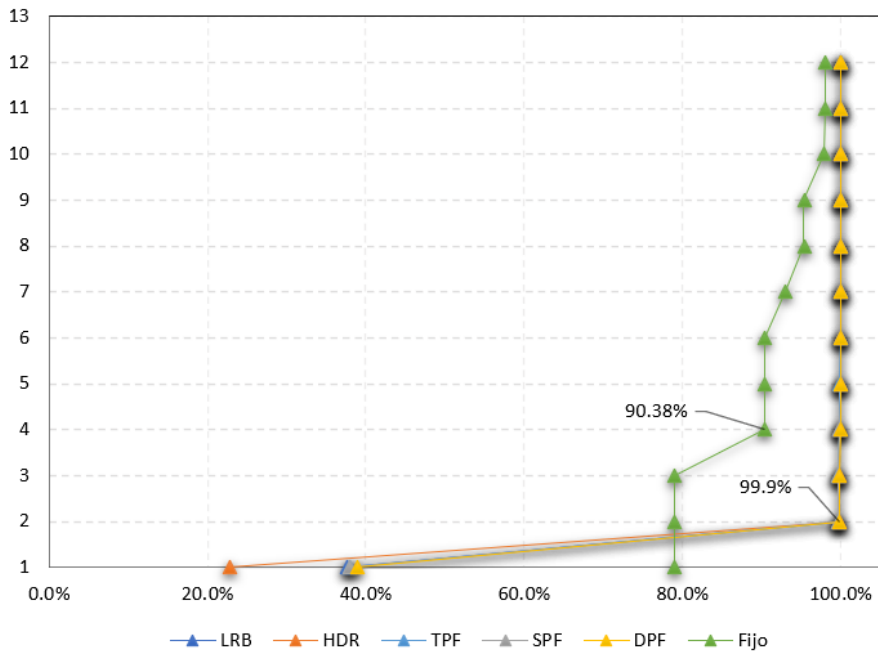


Figura 165. Participación modal dirección Y Edificación Fija vs Aisladas Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

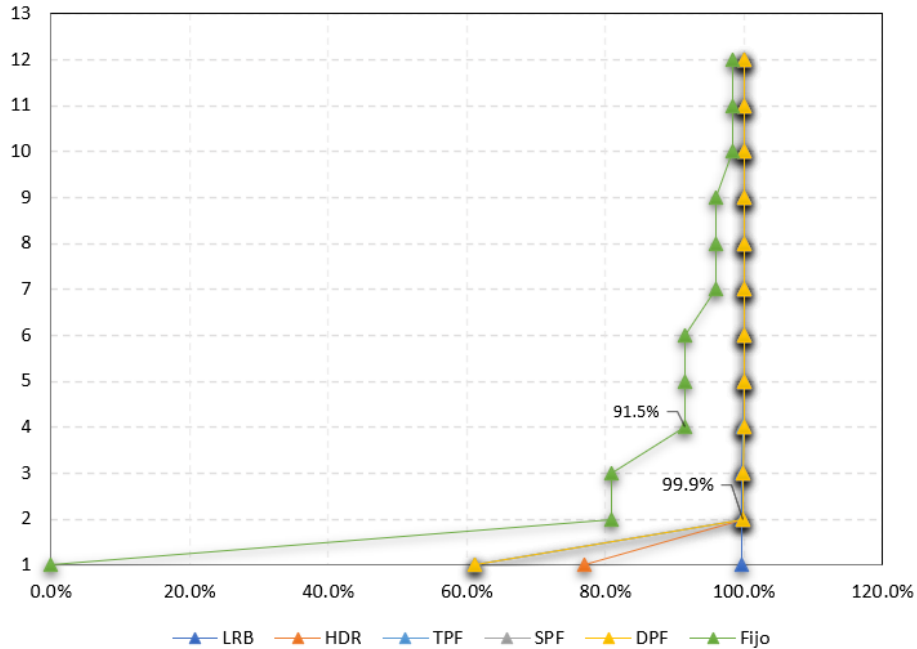


Figura 166. Participación modal dirección X Edificación Fija vs Aisladas Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

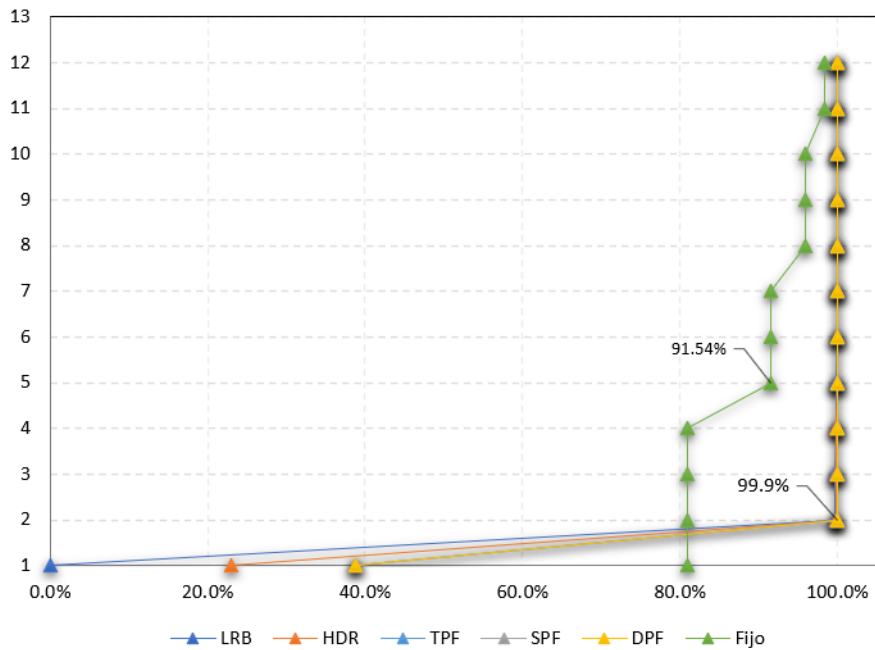


Figura 167. Participación modal dirección Y Edificación Fija vs Aisladas Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

Es notable con respecto a las Figuras 160 a 163 mostradas anteriormente que los periodos esperados para cada sistema de aislación se acercaron a los obtenidos en el prediseño de cada sistema (periodo objetivo). Las estructuras fueron flexibilizadas de tal manera que se obtuvieron en los modos 1 y 2 la mayor participación modal correspondientes a movimientos traslacionales, el tercer modo correspondió al torsional. En las Figuras 164 a 167 se destaca que se alcanza una

participación de la masa sísmica aproximadamente del 100% para el segundo modo para cada una de las direcciones de estudio y microzonas. También se hace visible como los periodos de las estructuras aisladas (con porcentajes de participación modal casi del 100% en los 3 primeros modos) se alejan de la zona de meseta de los espectros de diseño y máximo, conllevando esto a alejarse de las zonas del espectro de altas aceleraciones y situarse en zonas de pseudoaceleraciones espectrales con menores valores, del orden de 0.4g para la microzona Lacustre 200 y 0.2g para la microzona Piedemonte C.

Además, se observa que los 12 modos de vibración considerados fueron suficientes para alcanzar la participación modal mínima del 90% exigida por la normativa, para la edificación con base fija se logra alcanzar este mínimo en el mejor de los escenarios en el cuarto modo, mientras los sistemas aislados para movimientos traslacionales en el segundo modo ya se cuentan con la masa concentrada en casi el 100% excitada. Los modos 1 y 2 fueron para todos los sistemas de aislamientos traslacionales, el modo 3 fue rotacional, estos tres modos principales se pueden ver en la Figura 168, la característica común fue que en estos tres se obtuvo casi la totalidad de la respuesta de la estructura, cumpliéndose con el desacoplamiento de la superestructura y la base aislada, asegurando comportamiento como cuerpo rígido con influencia prácticamente nula de los modos superiores. En cuanto a los valores obtenidos de los periodos para los tres primeros modos estos fueron, iguales para los modos traslacionales 1 y 2, y con respecto al modo rotacional muy cercanos para la mayoría de los sistemas aislados con diferencias hasta de un 14% más, y un caso atípico para el sistema LRB en la microzona Lacustre 200 con un 27% más, lo que sugiere una distribución en planta de los aisladores adecuada, exceptuando este último caso particular, que por las frecuencias de las señales al parecer entraban en resonancia con la estructura y se tuvo que “apartar” un poco los valores de los periodos del tercer modo de los dos primeros.

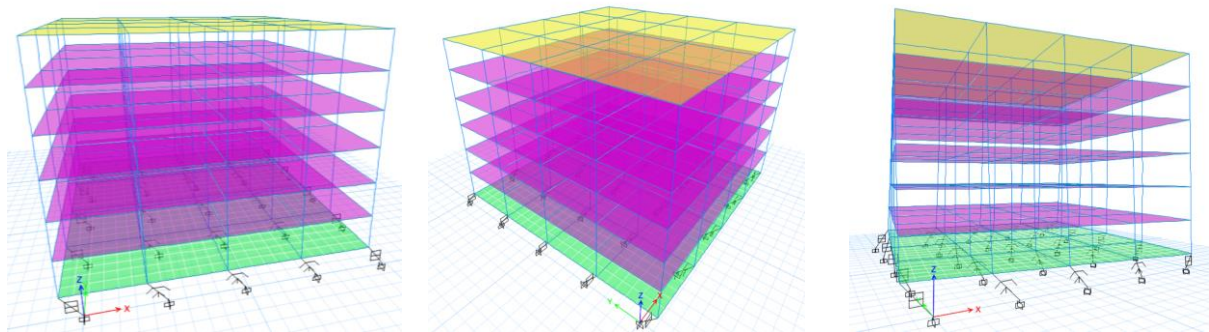


Figura 168. Modos principales de vibración Modo 1 traslacional en X, Modo traslacional en Y, Modo 3 Rotacional en Z, Modelo Aislado LRB. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

Desplazamientos en los sistemas de aislación.

Se usa el desplazamiento máximo resultante del análisis equivalente estático, el cálculo de los desplazamientos del análisis dinámico, para este caso, análisis no lineal tiempo historia, debido a la variación de los registros, independientemente del haber sido escalados al mismo espectro objetivo, arrojan valores diferentes en su respuesta, en cuanto a niveles de desplazamientos, un

registro sísmico con contenido de frecuencias diferentes, por ejemplo el registro de R6, genera mayores desplazamientos para las diferentes combinaciones de las direcciones ortogonales del sismo en cada tipo de sistema de aislación. Lo importante es que para los sismos de diseño y máximo esperado en cada uno de los registros no se sobrepasen los desplazamientos máximos del análisis equivalente.

Para el análisis de los desplazamientos de los sistemas de aislación se usó la combinación vectorial representada en la Figura 169, $SRSS = \text{Máximo} [(0.90EW + 0.44NS)^{0.5}; (0.44EW + 0.90NS)^{0.5}]$ y se promedió para los valores de los 7 registros sísmicos.

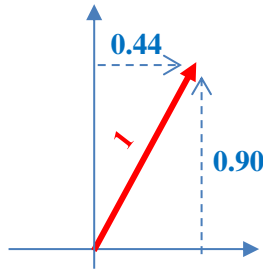


Figura 169. Representación gráfica de la combinación de componentes ortogonales Resgistros Sísmicos.
Fuente: Propia.

Se evidencia en las Figuras 170 y 171 que para algunos sistemas se alcanzan los valores esperados de desplazamientos obtenidos en el análisis estático para algunos registros, los otros valores se encuentran dentro de los rangos establecidos para el D_M . Con esto se puede comprobar que los sistemas de aislación cumplen efectivamente tomando gran parte de la deformación, se destaca que para la microzona Lacustre 200 el valor para el desplazamiento máximo objetivo y periodo objetivo de 4 s, las deformaciones alcanzaban valores de hasta 55 cm, lo que es importante a la hora de verificar las separaciones sísmicas necesarias entre estructuras adyacentes.

En cuanto a los valores promedios mostrados en las Figuras 172 y 173, los sistemas de aislación que se acercaron a los valores objetivos resultantes del análisis equivalente estático, fueron el sistema HDR con 22.4 cm en la microzona Piedemonte C y el sistema TFP con 46.2 cm en la microzona Lacustre 200, valores menores a los desplazamientos del sismo máximo esperado para dichos sistemas, alcanzado niveles hasta del 80% y 70% respectivamente. Se aprecia entonces, que el comportamiento previsto sería aceptable e inclusive se podría considerar bueno ante el peor escenario sísmico en ambos casos.

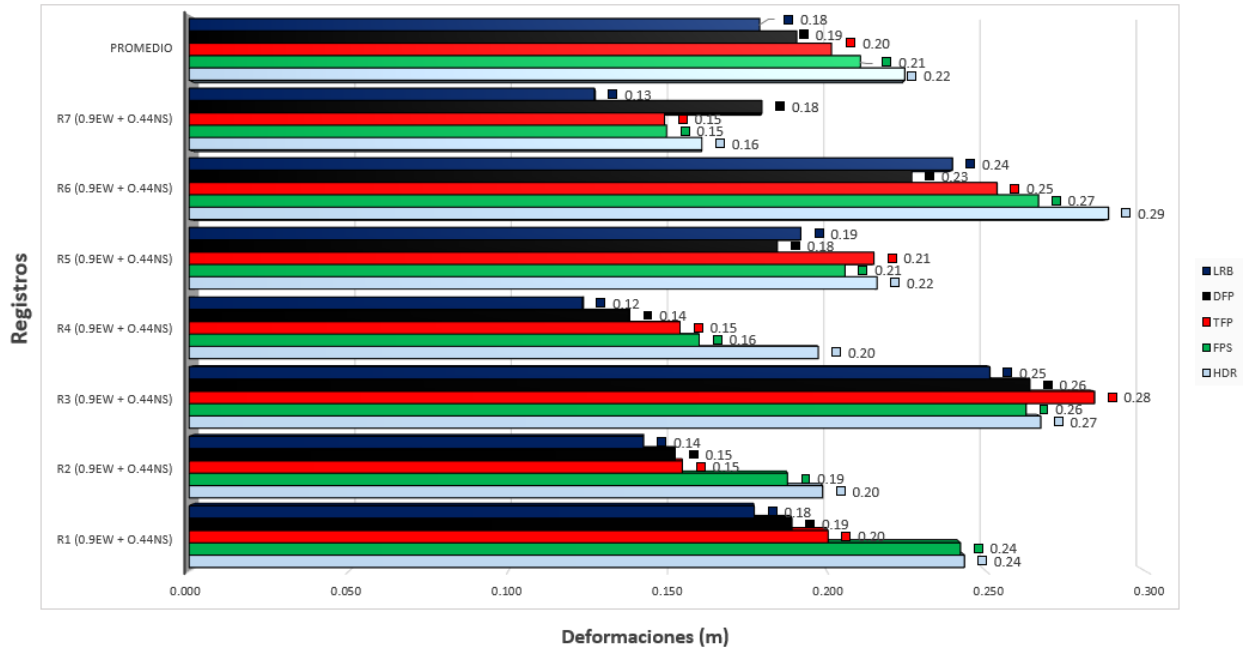


Figura 170. Desplazamientos Sistema de Aislación Microzona Piedemonte C, valores por Registros Sísmicos y Valor Promedio. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

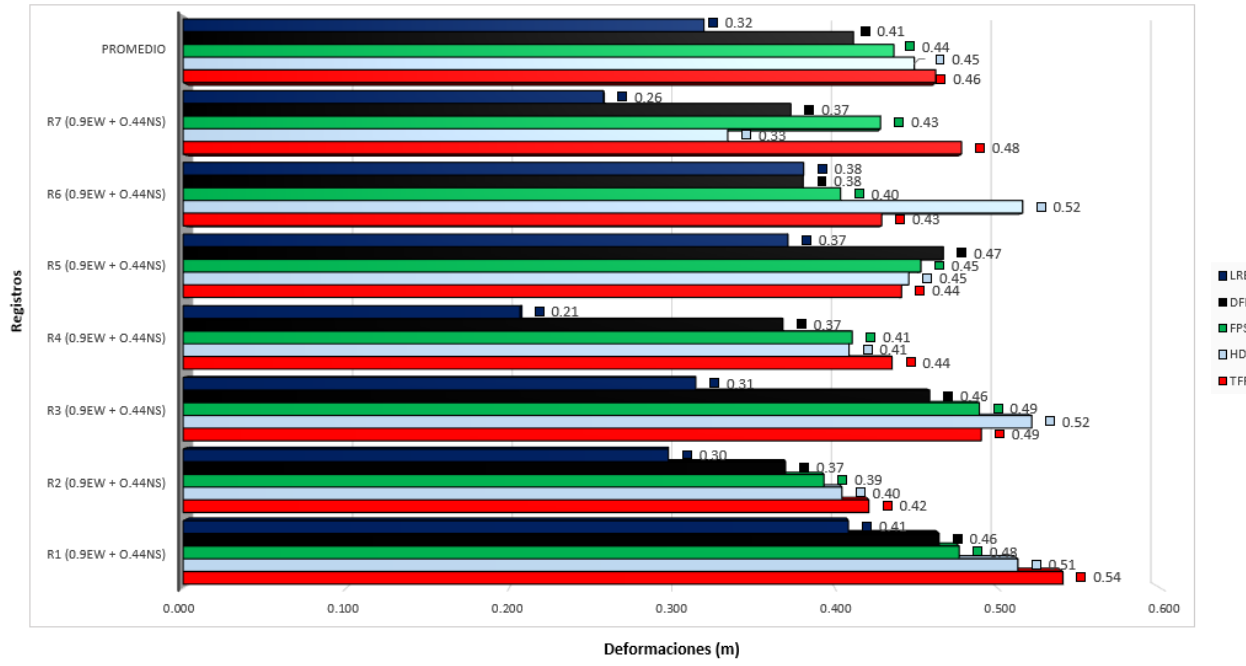


Figura 171. Desplazamientos Sistema de Aislación Microzona Lacustre 200, valores por Registros Sísmicos y Valor Promedio. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

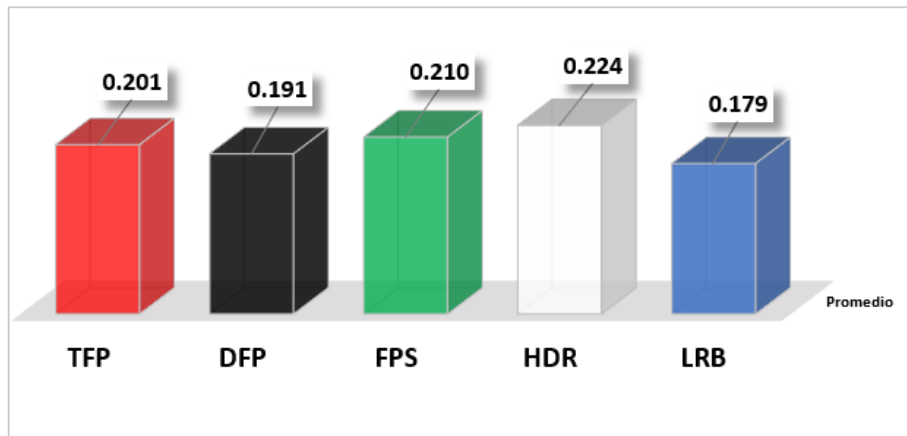


Figura 172. Desplazamientos Promedios Sistema de Aislación Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

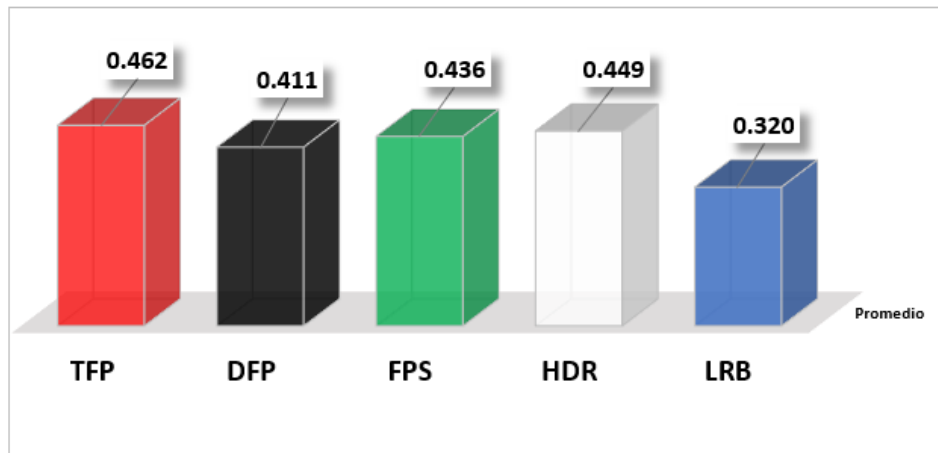


Figura 173. Desplazamientos Promedios Sistema de Aislación Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

En la Figura 172 se observan que las diferencias entre los desplazamientos promedios de la microzona Piedemonte C, para los distintos sistemas de aislación valor máximo (HDR) y valor mínimo (LRB) es tan sólo de 4 cm, mientras que, entre un sistema a otro son diferencias aproximadas de 1.5 cm. Para la microzona Lacustre 200, como se ve en la Figura 173, ocurre algo diferente, con los sistemas que se llevaron al periodo de 4 s (aisladores tipo péndulos de fricción) se encuentran valores que difieren de un sistema a otro de 2 cm aproximadamente, mientras para LRB y HDR que se trabajaron con periodos de 3 s, es considerable el desplazamiento del sistema HDR con respecto al LRB, alrededor de 13 cm.

Teniendo en cuenta estos resultados aún cuando las diferencias para la microzona Piedemonte C no generan un sistema que se destaque más que el otro, en la microzona Lacustre sobresalen, el sistema HDR y el TFP, sin ser concluyente en este punto del análisis todavía.

Desplazamientos relativos en la superestructura.

Para el análisis de las derivas por piso, se usó el caso de sismo estático para la verificación de las mismas en los modelos con base fija, mientras en los modelos aislados se verificó con la respuesta en el tiempo del análisis no lineal tiempo – historia. Se tuvo en cuenta el desplazamiento relativo piso a piso para los sistemas de aislación, a partir de la deformación de la interfaz de aislación, es decir, se usa como valor de referencia ya una vez ocurrido el desplazamiento del sistema. Es importante observar en las Figuras 174, 175, 178 y 179 que en las edificaciones con base fija, los desplazamientos por nivel o piso son incrementales aproximadamente con tendencia lineal (piso 6 desplazándose 11 cm aproximadamente con respecto a la base ambas microzonas), mientras los modelos con base aislada, alcanzan desplazamiento de cubierta al valor referente interfaz de aislamiento de 3.4 cm como máximo (Piedemonte C) y 6.5 cm (Lacustre 200); para ambas direcciones de análisis.

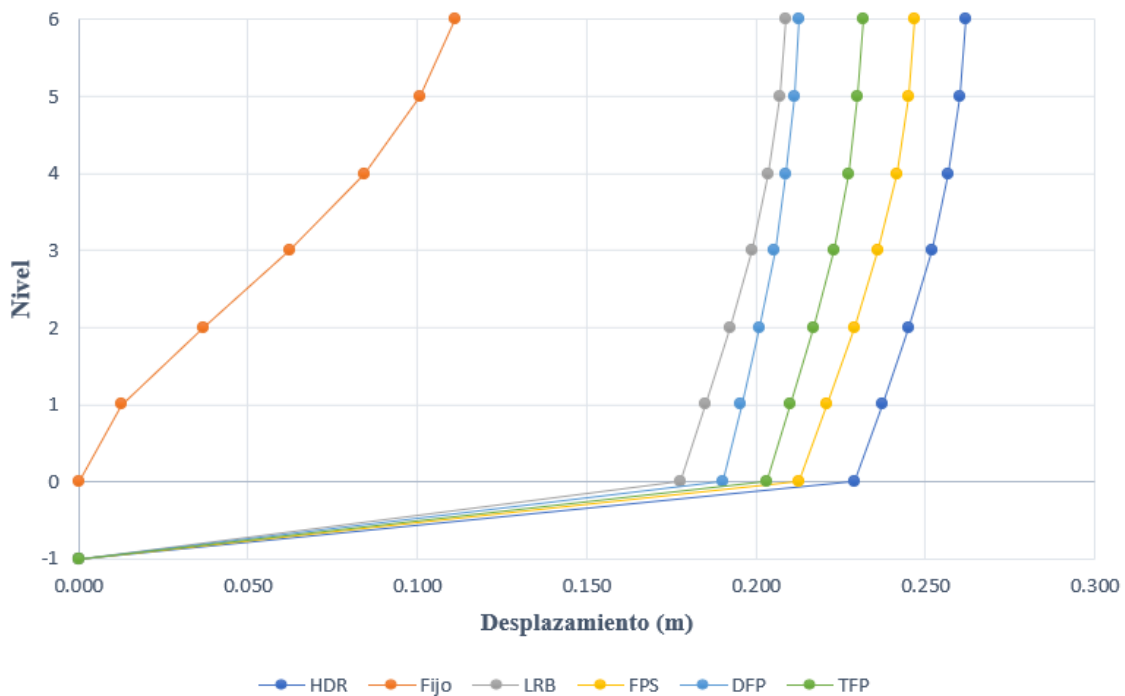


Figura 174. Desplazamientos de entrepiso Edificio Fijo vs. Sistemas de Aislación Dir. X - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

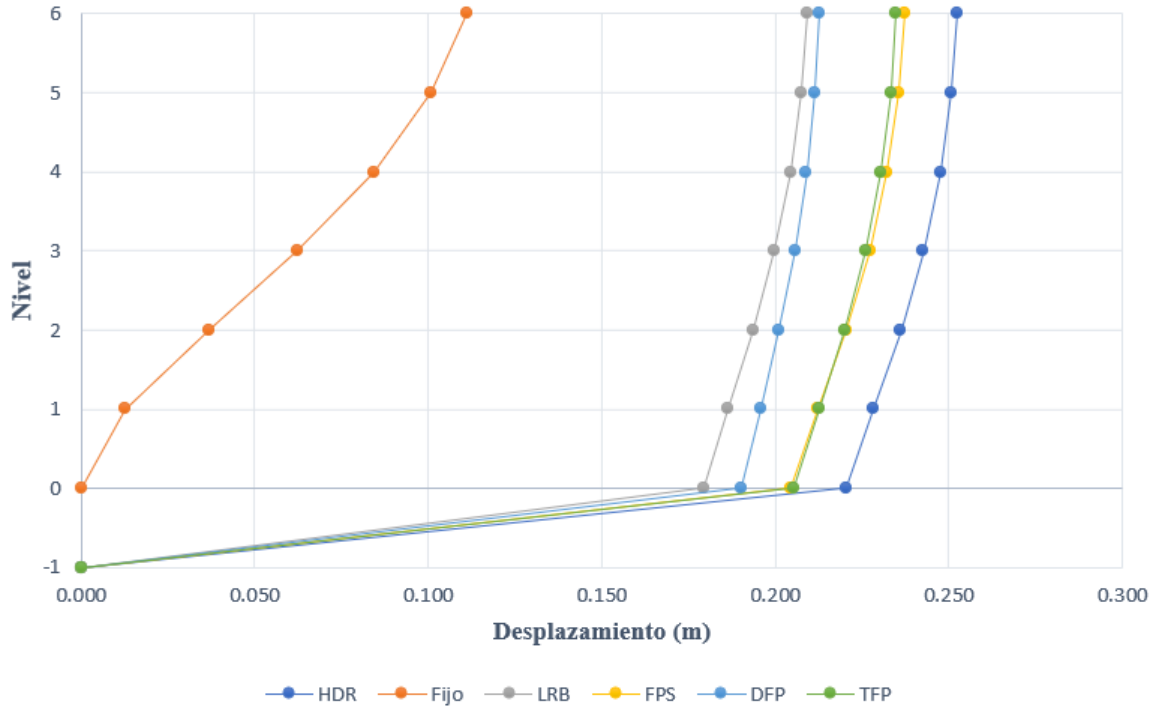


Figura 175. Desplazamientos de entrepiso Edificio Fijo vs. Sistemas de Aislación Dir. Y - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

En cuanto a los desplazamientos relativos piso a piso, que necesitan ser controlados por diversos motivos, entre ellos evitar la ocurrencia de daños a elementos no estructurales y estructurales y confort de los ocupantes de la edificación entre otros, se observan disminuciones considerables en las derivas de los modelos aislados, para la microzona Piedemonte C, de hasta el 89% en algunos niveles de cubierta y mínimo 43% para el primer entrepiso (Figuras 176 y 177). En la microzona Lacustre 200, las disminuciones fueron en menor escala, 83% en nivel de cubierta y 9% primer entrepiso (Figuras 180 y 181).

De manera general para ambas direcciones en la microzona Piedemonte C, los sistemas de aislamiento funcionan bastante bien, con el DFP destacando con los menores valores de derivas, y el resto muy cercanos entre sí. Cosa distinta ocurre en la microzona Lacustre 200, dónde los sistemas de aislamiento de tipo fricción tienen mejor respuesta que los HDR y LRB, nuevamente el DFP presenta los menores valores y resulta empatado con el FPS.

En este campo de análisis presenta ventajas el sistema DFP sobre los otros sistemas de aislamiento.

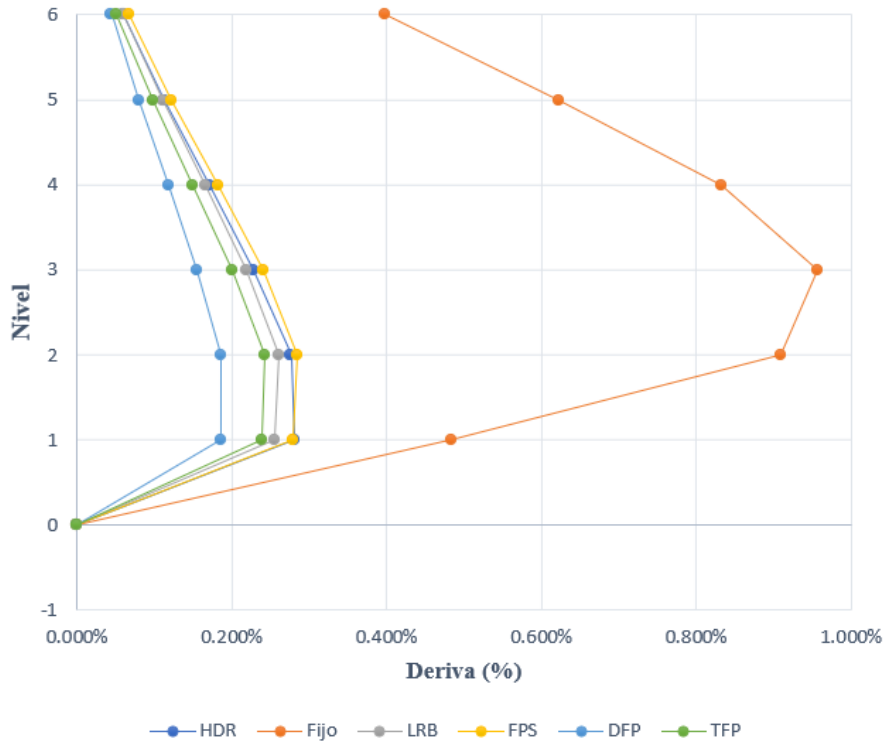


Figura 176. Derivas de piso Edificio Fijo vs. Sistemas de Aislación Dir. X - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

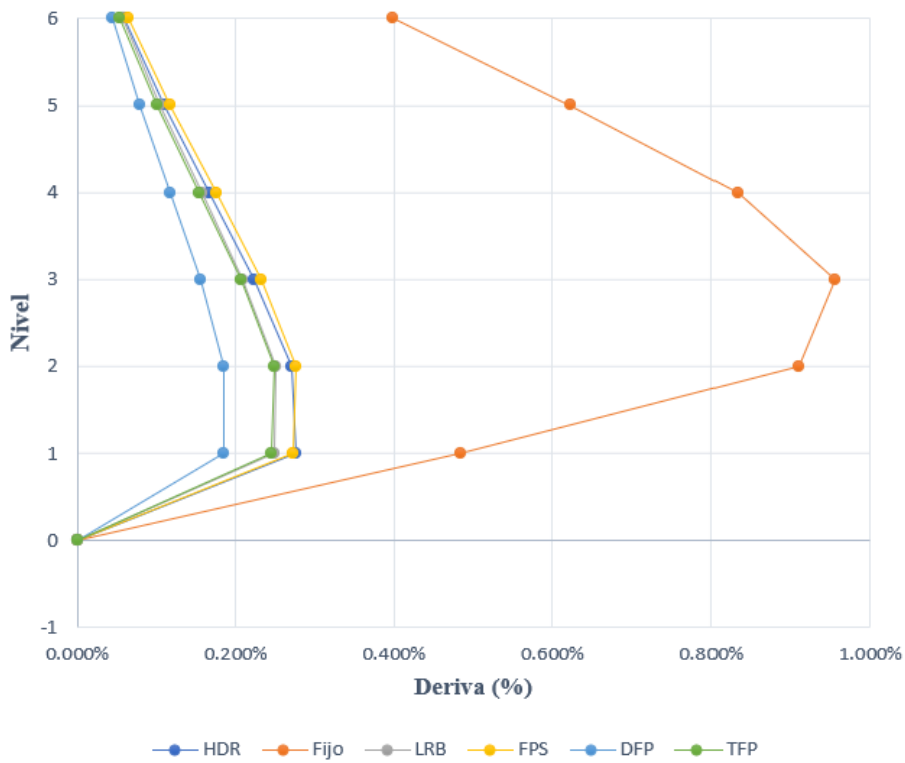


Figura 177. Derivas de piso Edificio Fijo vs. Sistemas de Aislación Dir. Y - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

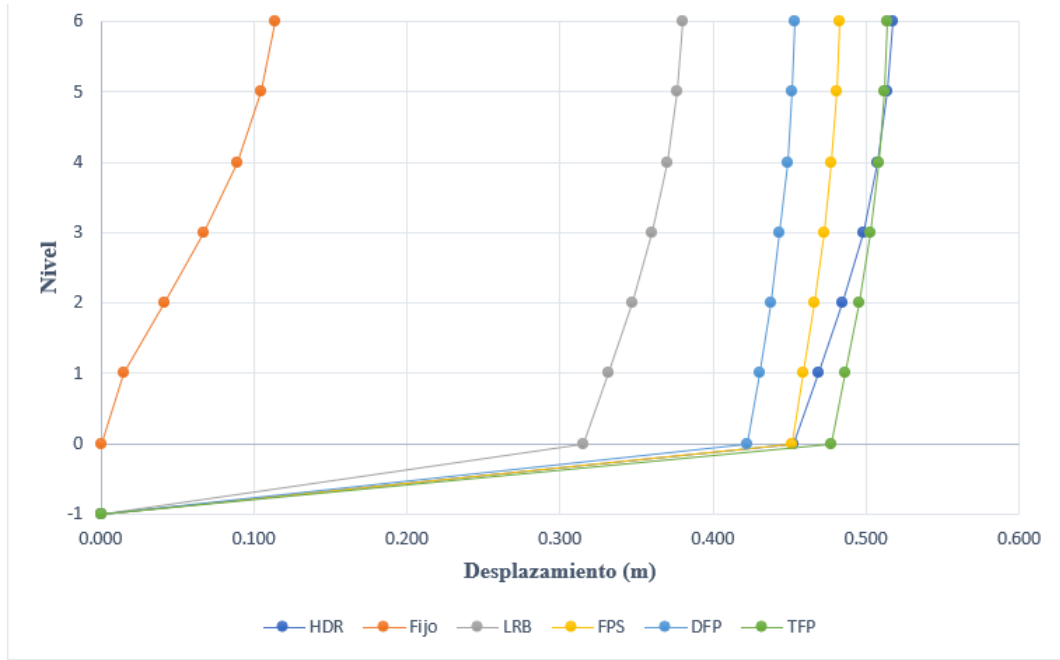


Figura 178. Desplazamientos de entrespacio Edificio Fijo vs. Sistemas de Aislación Dir. X - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

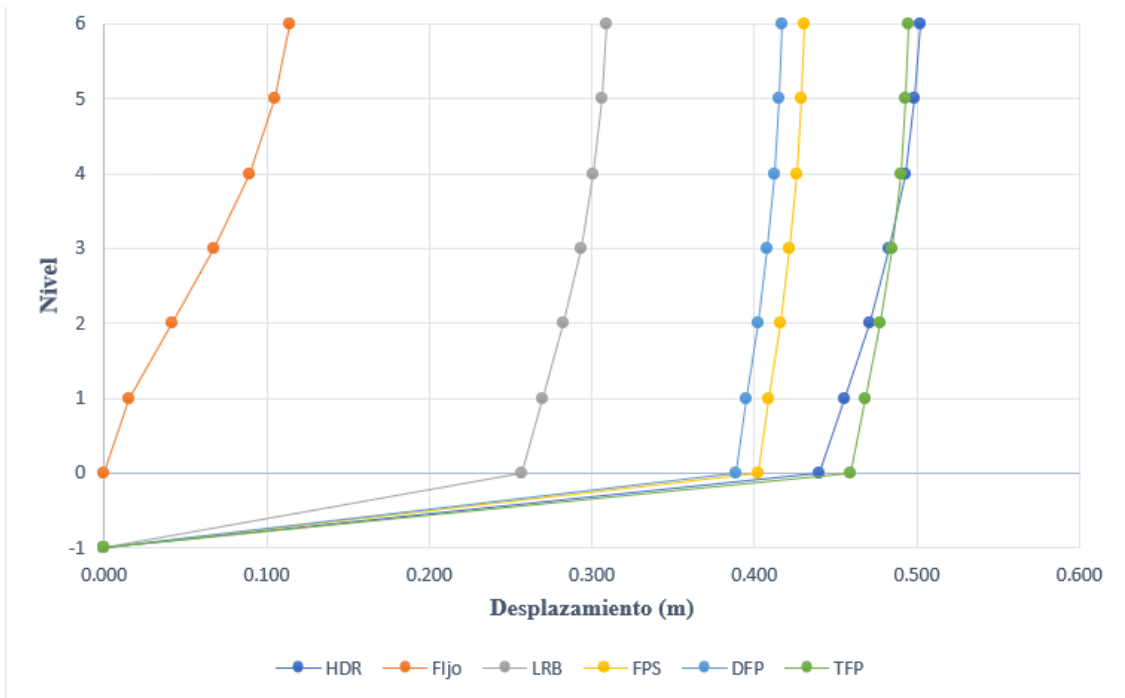


Figura 179. Desplazamientos de entrespacio Edificio Fijo vs. Sistemas de Aislación Dir. Y - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

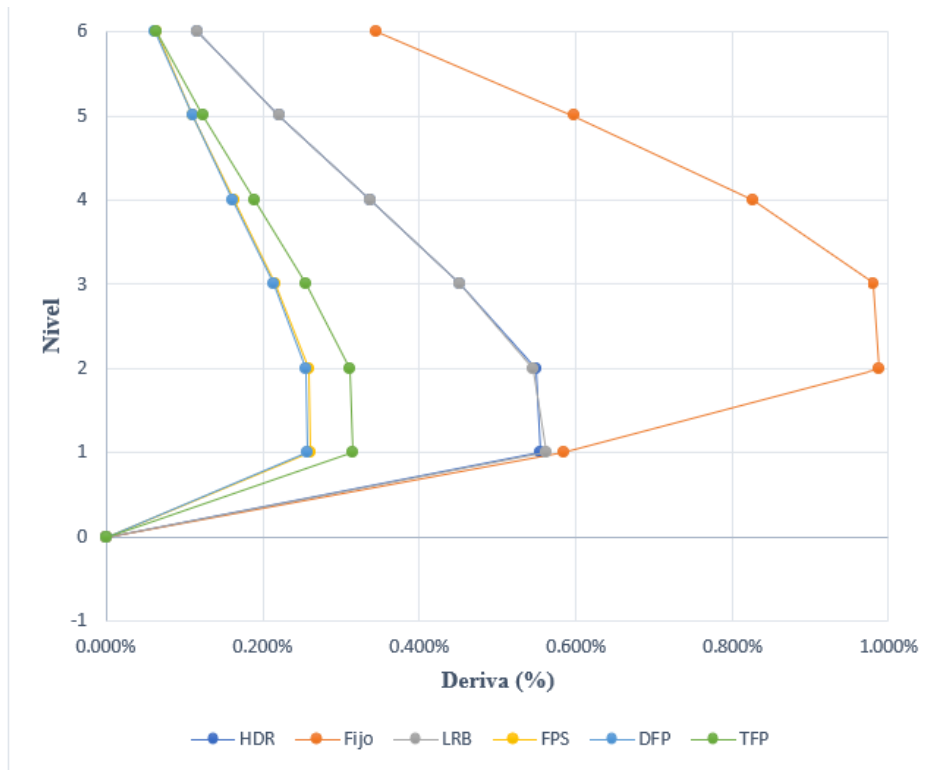


Figura 180. Derivas de piso Edificio Fijo vs. Sistemas de Aislación Dir. X - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

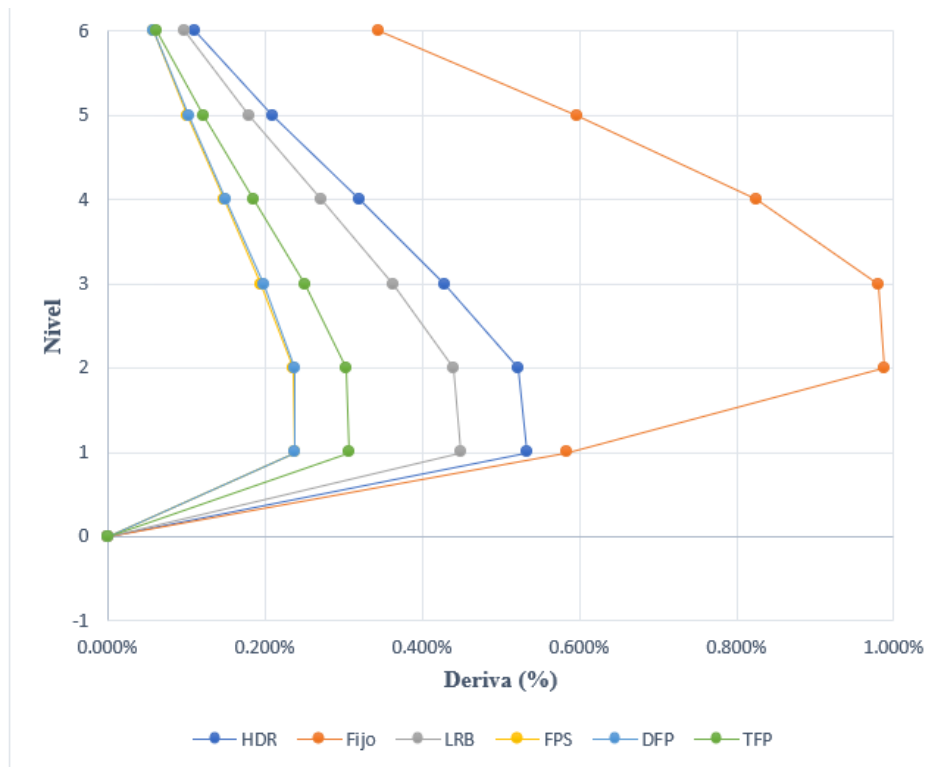


Figura 181. Derivas de piso Edificio Fijo vs. Sistemas de Aislación Dir. Y - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

Aceleraciones absolutas en la superestructura.

Resultantes del análisis dinámico modal espectral se midieron las aceleraciones absolutas por piso para los modelos con base fija, para los modelos aislados fueron extraídos del análisis no lineal tiempo – historia, en cuanto a las magnitudes de estas aceleraciones absolutas, se redujeron considerablemente para la microzona Piedemonte C como se ve en la Figura 182, alcanzando valores dentro del rango del 53% al 85%, todos los sistemas de aislación presentan similar comportamiento con valores muy cercanos. La variación de la aceleración por piso en los modelos matemáticos aislados se muestra de tendencia suavizada, mientras en el modelo de base fija los cambios se presentan abruptos de nivel en nivel.

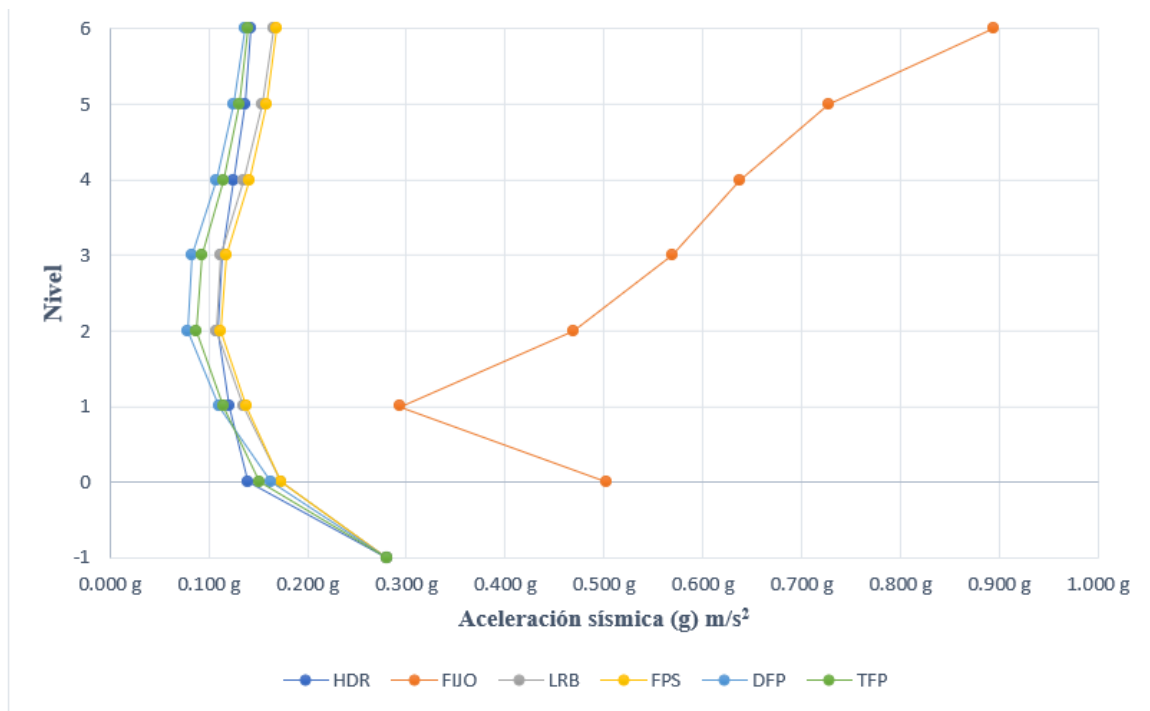


Figura 182. Aceleraciones absolutas Edificio Fijo vs. Sistemas de Aislación Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

Para la microzona Lacustre 200, se observa en la Figura 183 un comportamiento atípico en los sistemas de aislación HDR y LRB, con aceleraciones absolutas por piso mayores en el nivel 1 que las de la edificación con base fija. Para los demás niveles se redujeron en menor escala con respecto a la microzona Piedemonte C, sin embargo, se consiguen reducciones dentro del rango del 29% al 81%, todos los sistemas de aislación tipo fricción (FPS, DFP y TFP) presentan similar comportamiento con valores muy cercanos. Los cambios abruptos de aceleración nivel a nivel en este modelo de base fija son más pronunciados. La tendencia general de disminución de aceleraciones resulta favorable en la respuesta de la edificación al disminuir las demandas inerciales.

Para este t3pico del an3lisis se destacan los sistemas de aislaci3n tipo fricci3n sobre los HDR y LRB, teniendo en cuenta lo ocurrido para cada microzona. Se aclara que par la Lacustre 200, los sistemas LRB y HDR se trabajaron a $T = 3s$, mientras los tipo fricci3n a $T = 4s$.

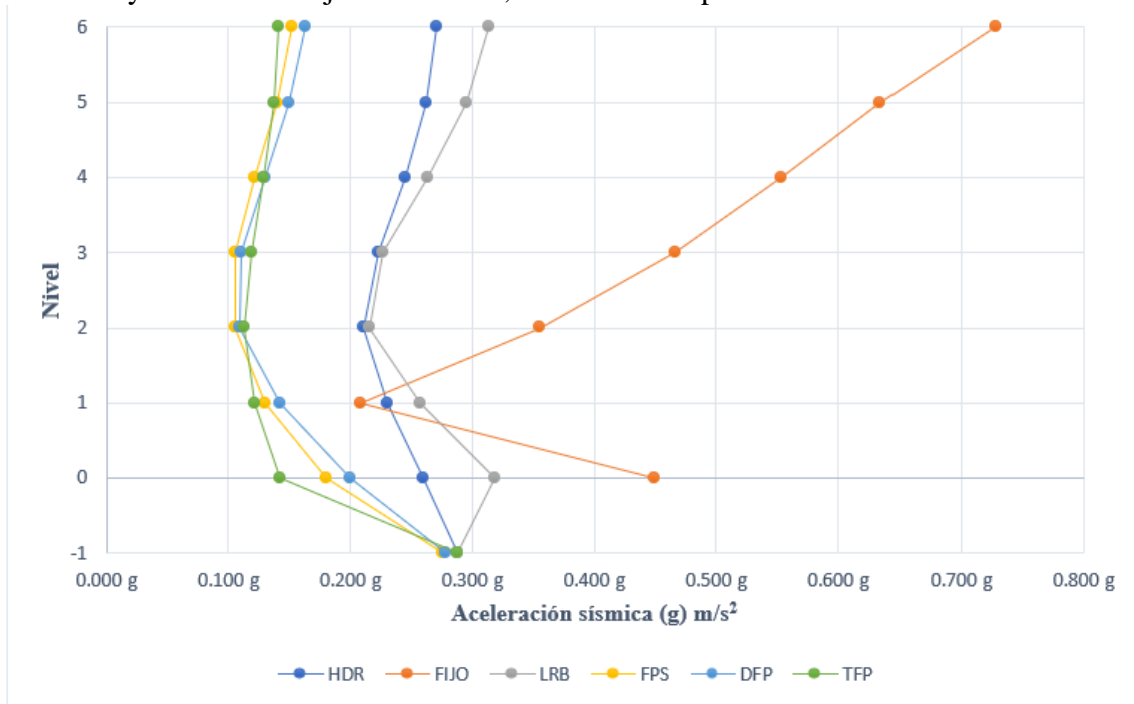


Figura 183. Aceleraciones absolutas Edificio Fijo vs. Sistemas de Aislaci3n Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con an3lisis en ETABS.

Cortante basal y cortantes de piso en la superestructura.

Los cortantes basales y por piso de los modelos matem3ticos con aislaci3n en su base, presentaron disminuciones en los valores de las magnitudes con respecto a los presentados en las edificaciones con base fija para cada microzona. Al igual que en el apartado anterior se obtuvieron los datos para los modelos con base fija de un an3lisis modal espectral y para modelos con base aislada un ANLTH.

Para Piedemonte C, desde la Figuras 184 a la Figura 188, se notan que las reducciones fueron mayores para cada sistema de aislaci3n en ambas direcciones, como era de esperarse. Se observa un comportamiento lineal en la distribuci3n en altura en los sistemas aislados. El sistema con mayor reducci3n para los cortantes por piso fue el DFP.

En el caso de Lacustre 200, desde la Figura 189 a la Figura 193, se visualiza que las reducciones fueron relativamente menores que la microzona Piedemonte C. Se observa un comportamiento lineal en la distribuci3n en altura en los sistemas aislados. Por la diferencia en los periodos objetivos los sistemas LRB y HDR, presentan menores reducciones de cortantes, en cuanto a los de mejor respuesta, repite el DFP y casi en igual proporci3n el FPS.

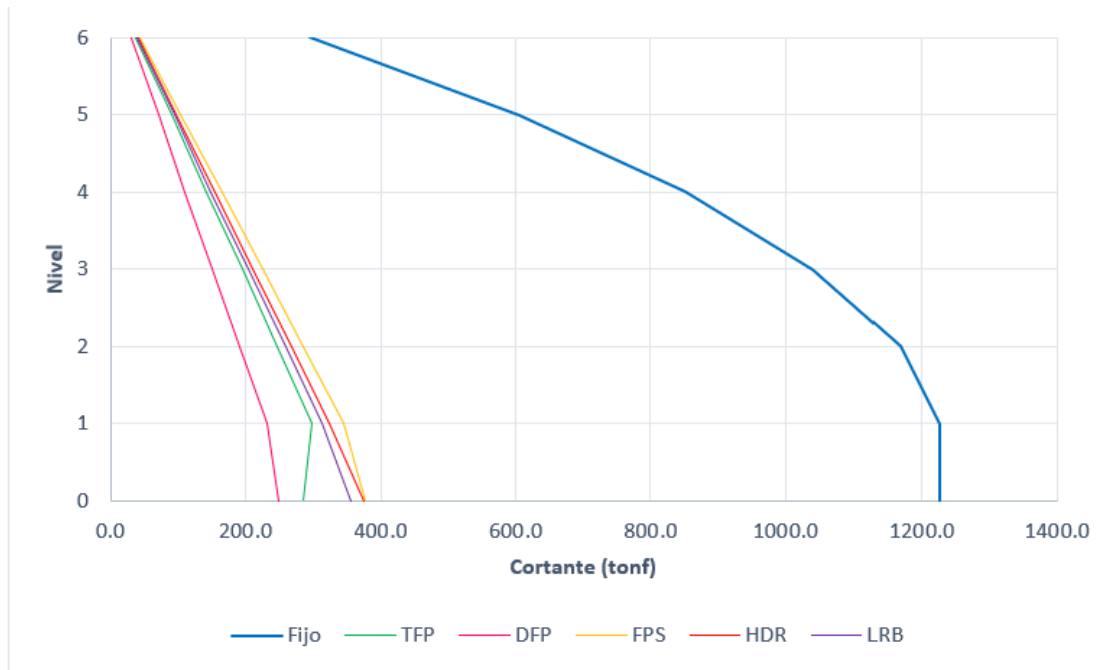


Figura 184. Variación cortante por piso Edificio Fijo vs. Sistemas de Aislación Dir. X - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

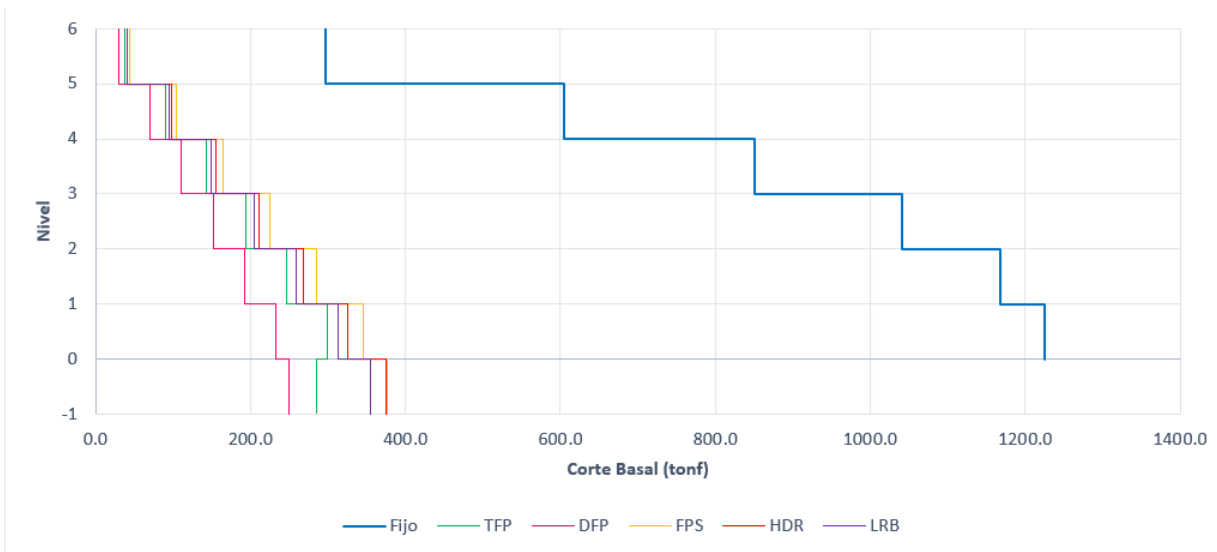


Figura 185. Cortante por piso Edificio Fijo vs. Sistemas de Aislación Dir. X - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

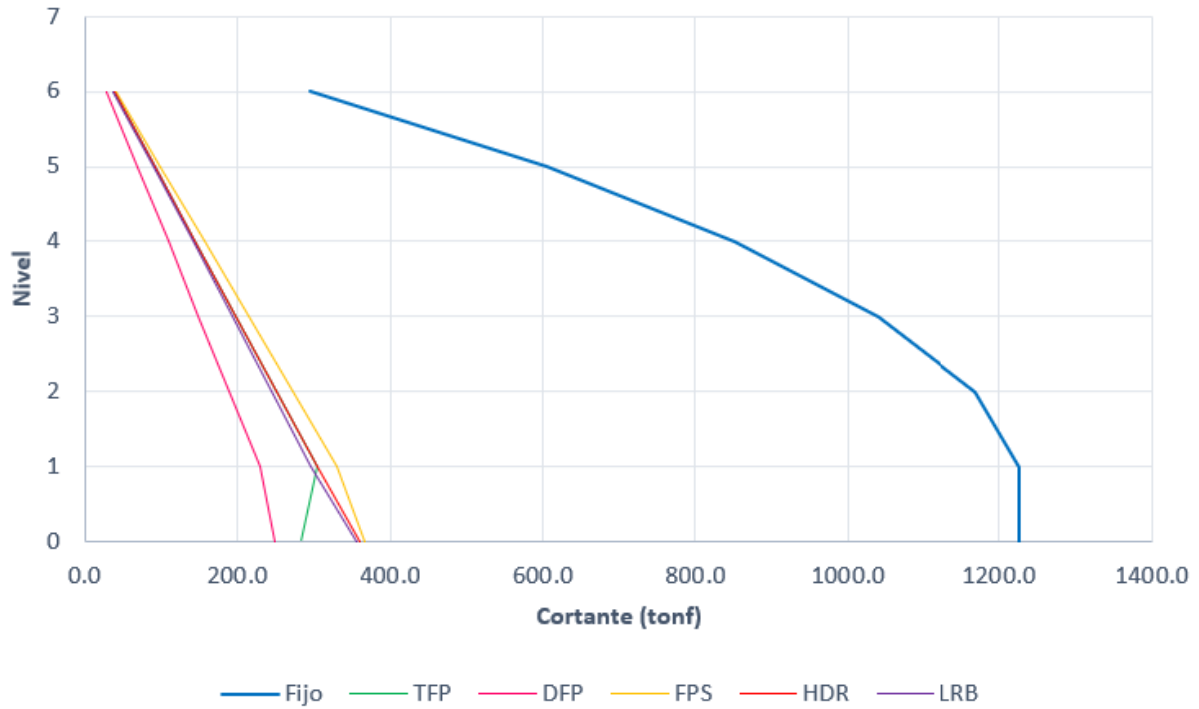


Figura 186. Variación cortante por piso Edificio Fijo vs. Sistemas de Aislación Dir. Y - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

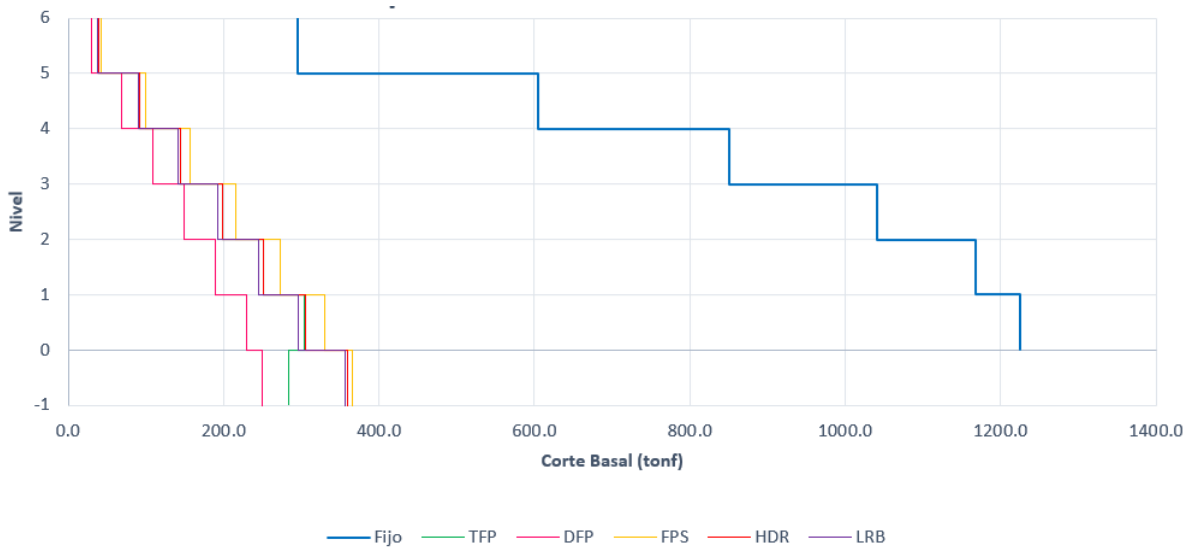


Figura 187. Cortante por piso Edificio Fijo vs. Sistemas de Aislación Dir. Y - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

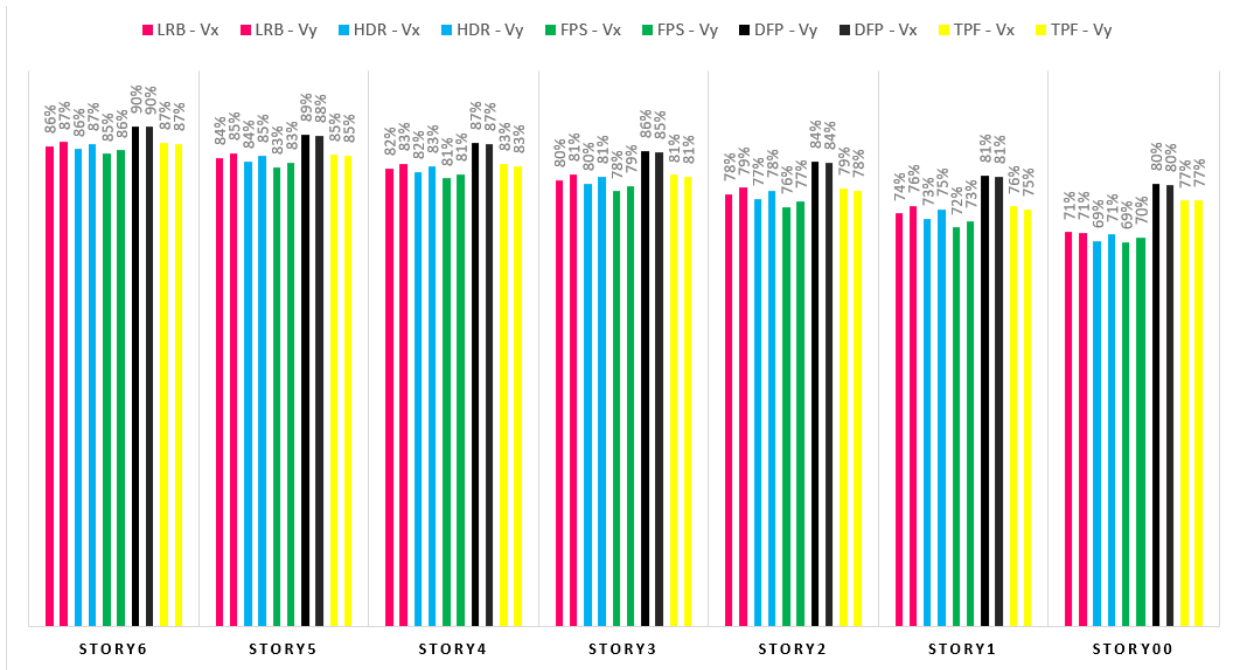


Figura 188. Reducción Cortante por piso Edificio Fijo vs. Sistemas de Aislación Dir. X e Y - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

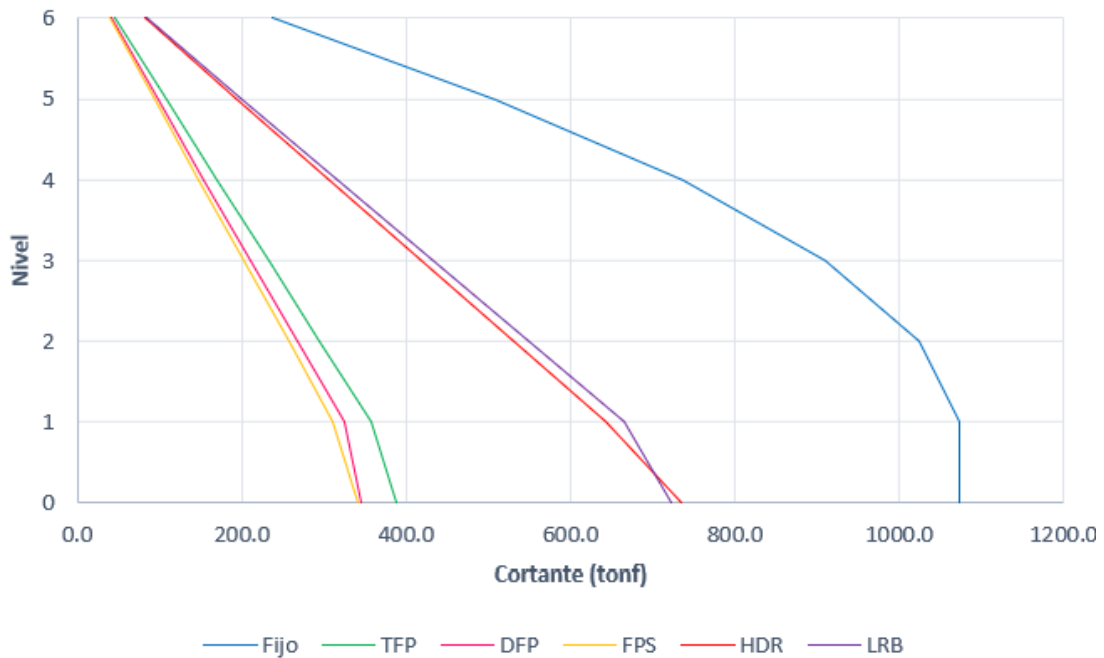


Figura 189. Variación cortante por piso Edificio Fijo vs. Sistemas de Aislación Dir. X - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

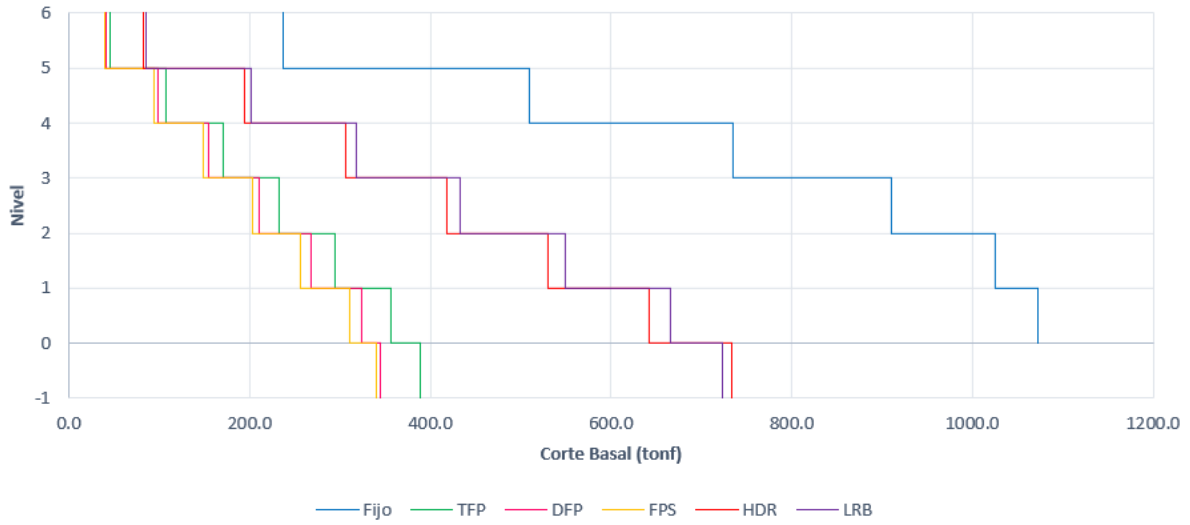


Figura 190. Cortante por piso Edificio Fijo vs. Sistemas de Aislación Dir. X - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

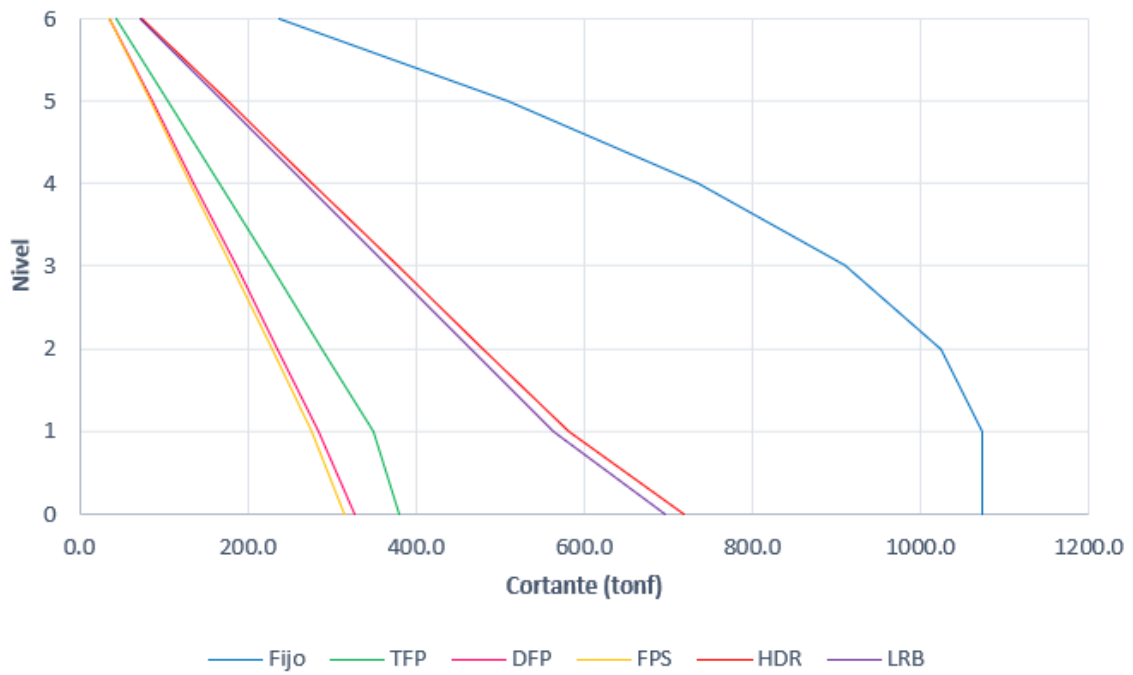


Figura 191. Variación cortante por piso Edificio Fijo vs. Sistemas de Aislación Dir. Y - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

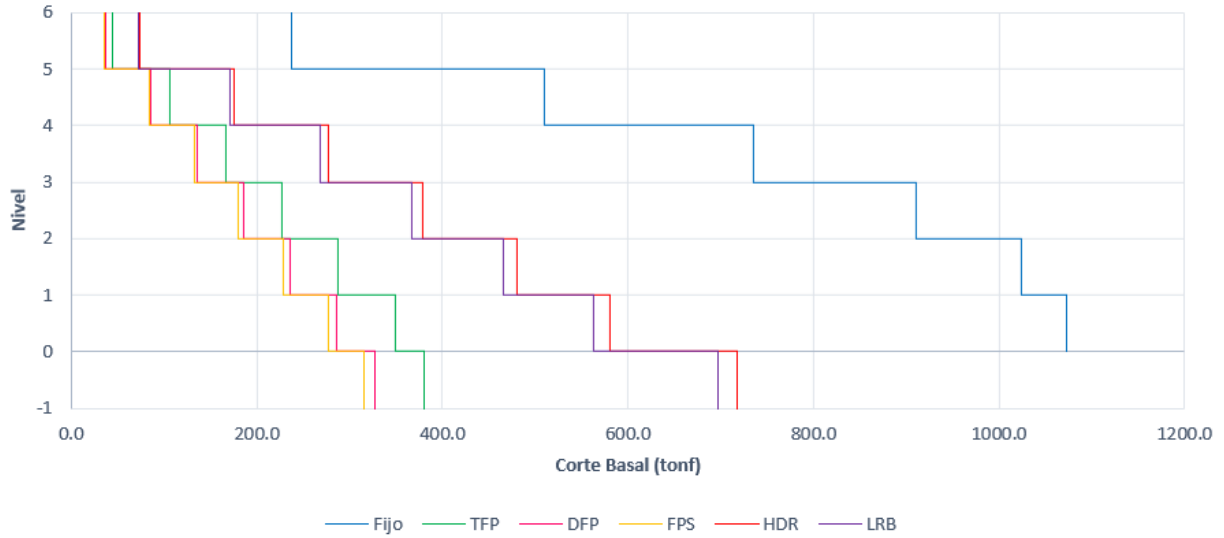


Figura 192. Cortante por piso Edificio Fijo vs. Sistemas de Aislación Dir. Y - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

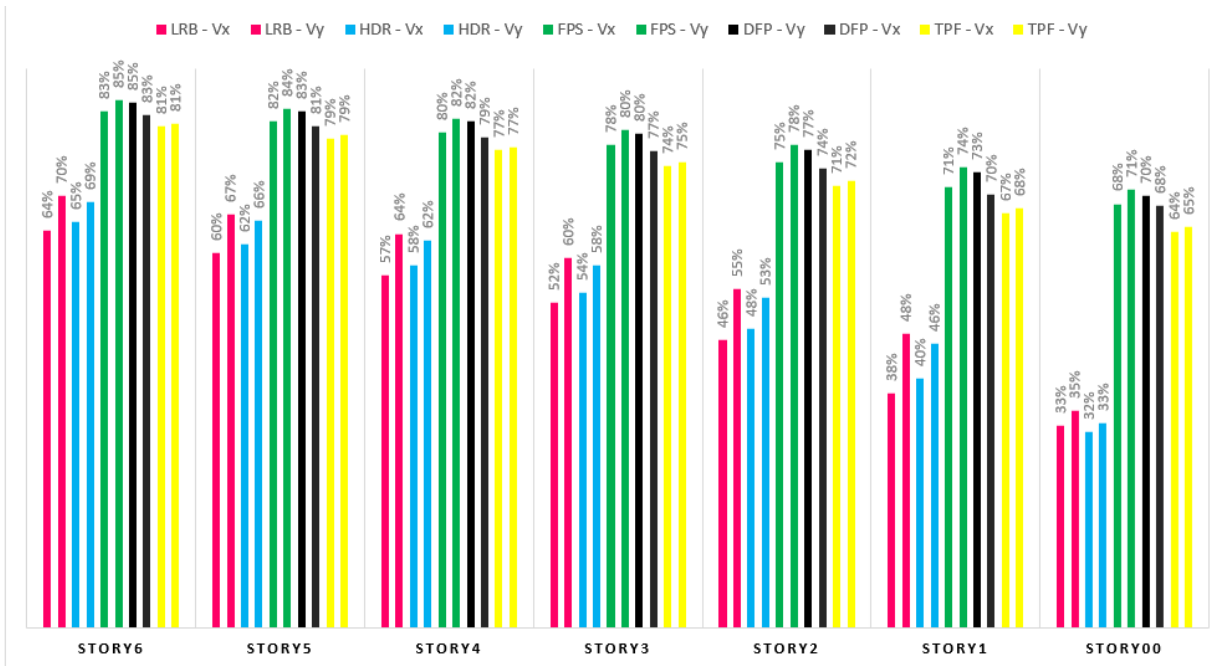


Figura 193. Reducción Cortante por piso Edificio Fijo vs. Sistemas de Aislación Dir. X e Y - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

Histéresis sistemas de aislamiento.

Para este tópico, la generación de los diagramas mostrados en las Figuras 194 – 203, fueron el resultado del análisis no lineal tiempo historia aplicado sobre los modelos aislados.

El comportamiento histerético de los sistemas de aislación para la microzona Piedemonte C, muestran la respuesta esperada, acordes al modelo bilineal idealizado planteado en el análisis estático. Para el caso especial del aislador tipo HDR, por tener propiedades esfuerzo deformación por corte del material que se degradan un poco al actualizarse el valor de rigidez en cada paso, la curva se sale un poco de un modelo bilineal aproximado.

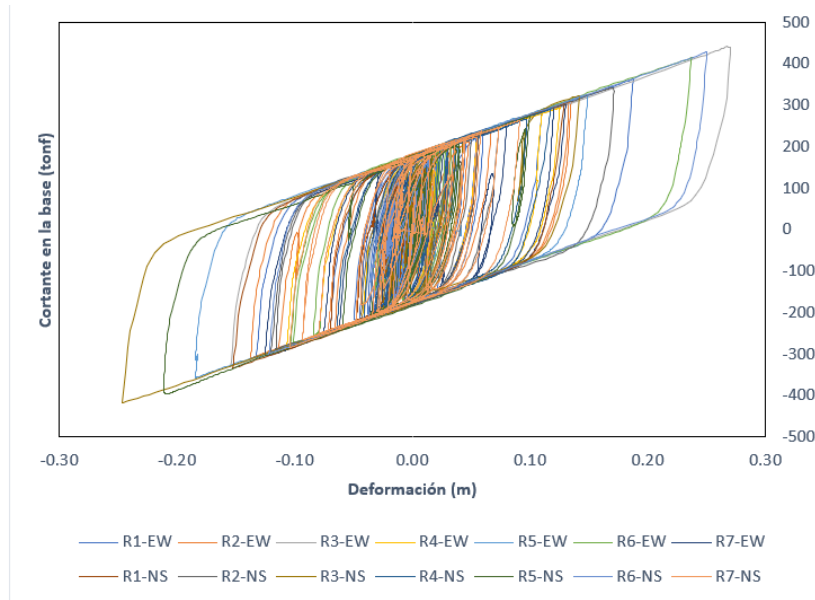


Figura 194. Histeresis Sistema de Aislación LRB para los 7 Registros Sísmicos (EW-NS) - Microzona piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

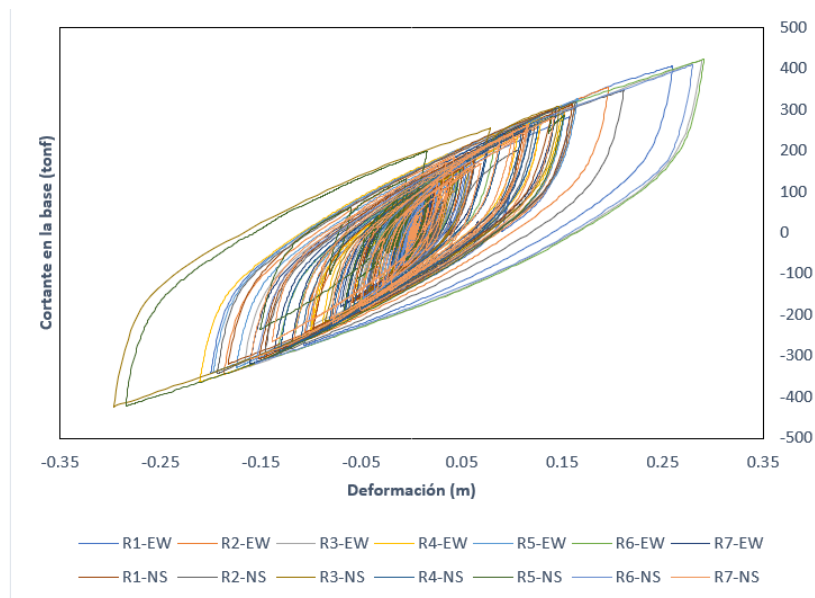


Figura 195. Histeresis Sistema de Aislación HDR para los 7 Registros Sísmicos (EW-NS) - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

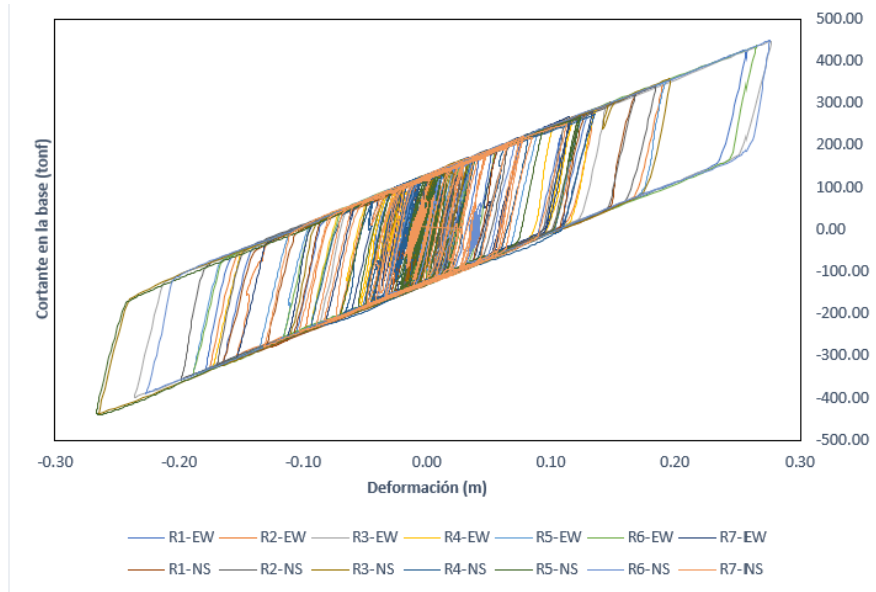


Figura 196. Histeresis Sistema de Aislación FPS para los 7 Registros Sísmicos (EW-NS) - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

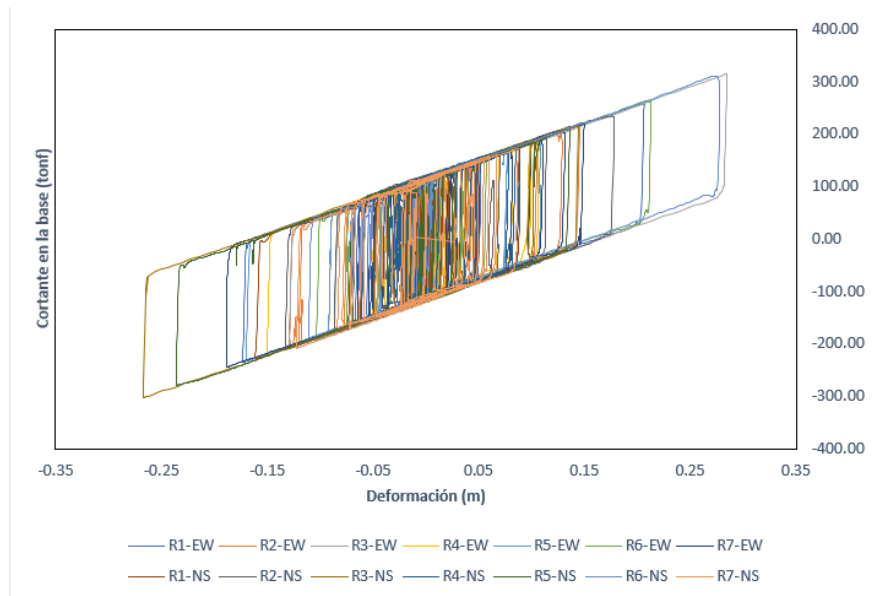


Figura 197. Histeresis Sistema de Aislación DFP para los 7 Registros Sísmicos (EW-NS) - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

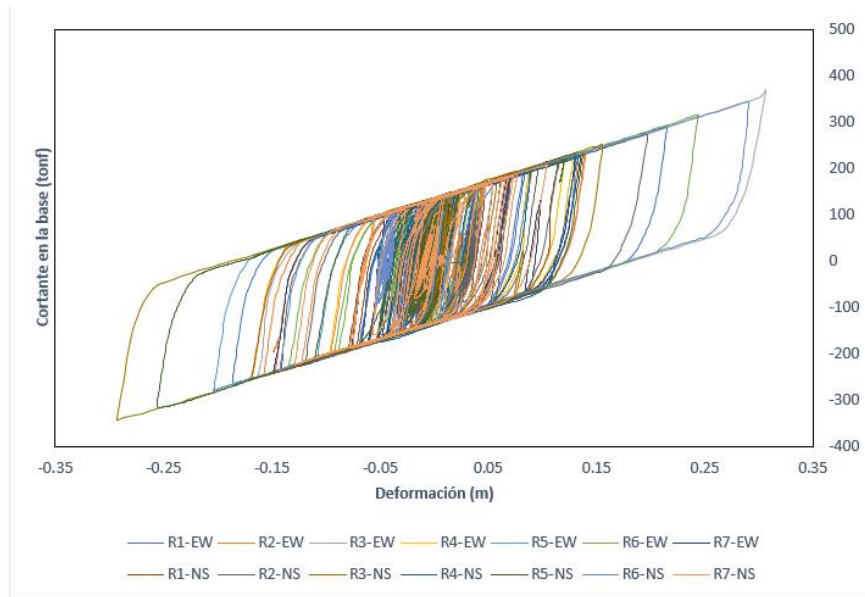


Figura 198. Histeresis Sistema de Aislación TFP para los 7 Registros Sísmicos (EW-NS) - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

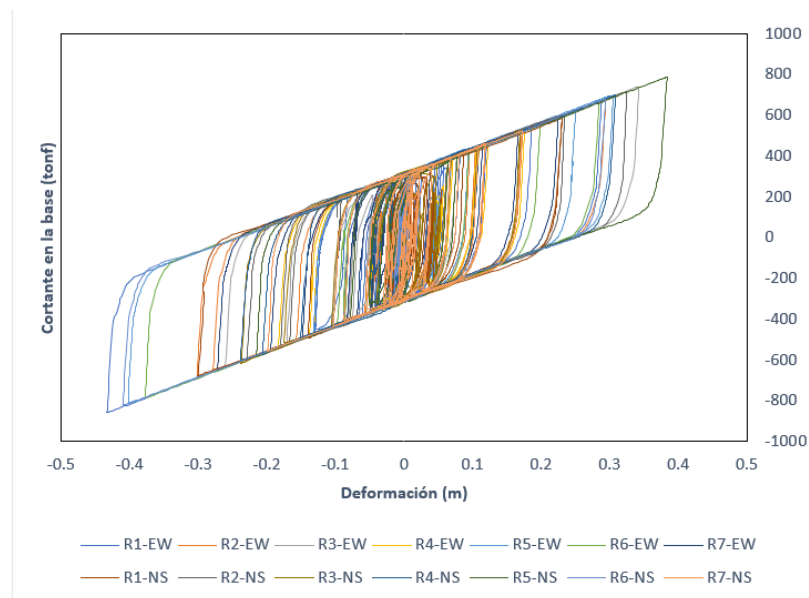


Figura 199. Histeresis Sistema de Aislación LRB para los 7 Registros Sísmicos (EW-NS) - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

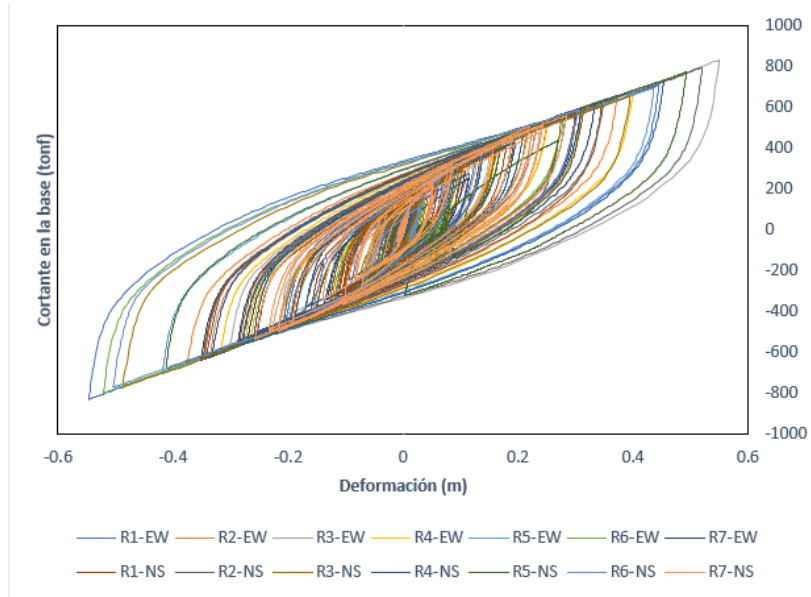


Figura 200. Histeresis Sistema de Aislación HDR para los 7 Registros Sísmicos (EW-NS) - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

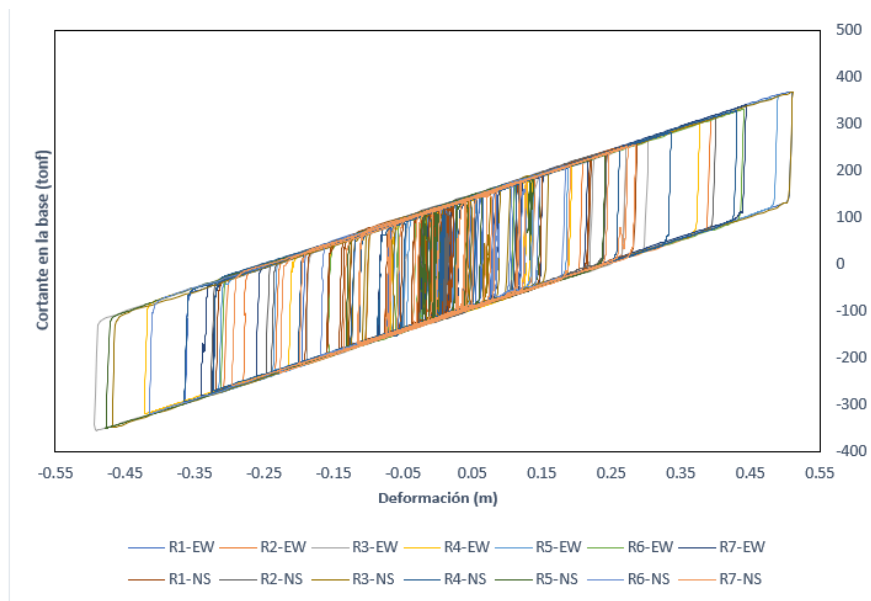


Figura 201. Histeresis Sistema de Aislación FPS para los 7 Registros Sísmicos (EW-NS) - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

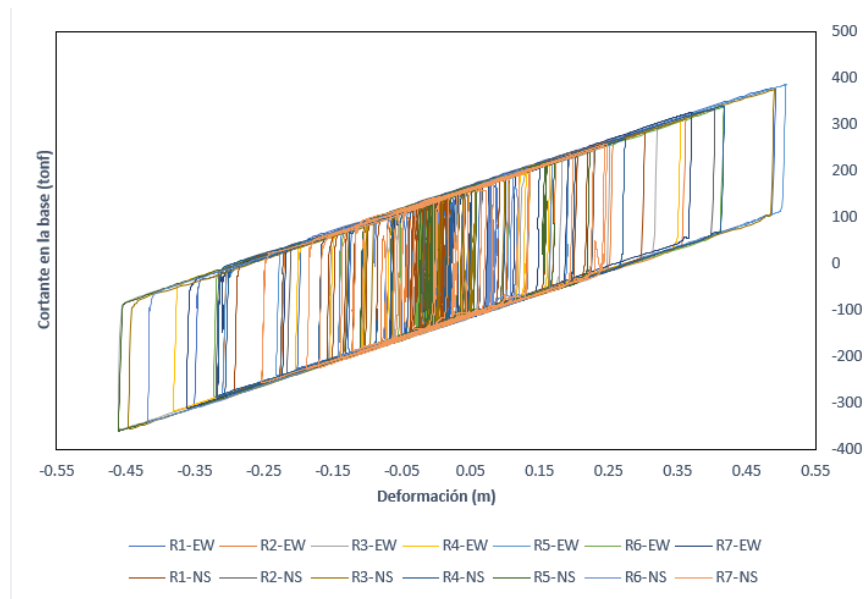


Figura 202. Histeresis Sistema de Aislación DFP para los 7 Registros Sísmicos (EW-NS) - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

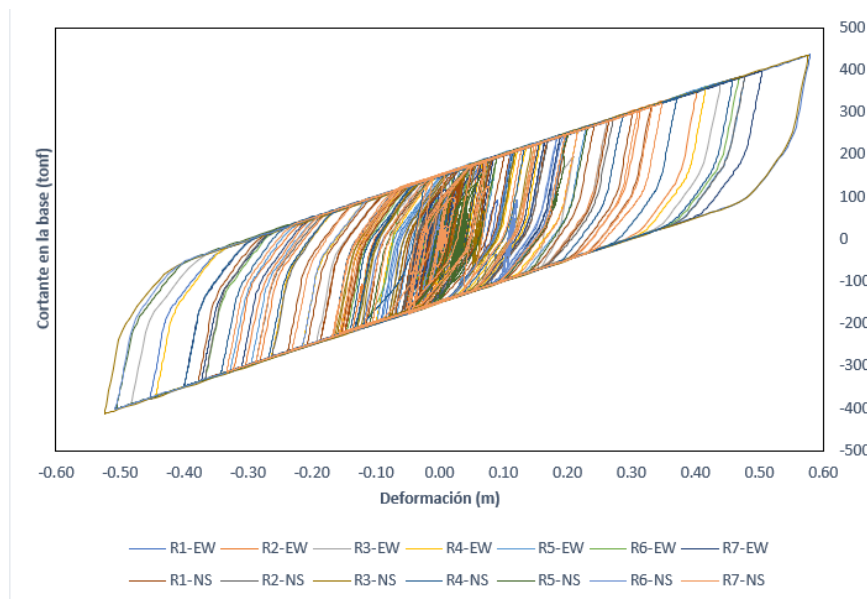


Figura 203. Histeresis Sistema de Aislación TFP para los 7 Registros Sísmicos (EW-NS) - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

Los resultados para este tópico de análisis resultan ser coherentes, no superando en ningún caso los valores topes para el máximo sismo esperado. El comportamiento de cada sistema es apropiado. Es importante observar para el sistema TFP se generan las diferentes pendientes de las fases de trabajo que desarrollan los aisladores.

Energía disipada y amortiguamiento sistemas de aislación.

En las gráficas de la Figura 204 y la Figura 205 se observa un ejemplo de representación de la energía disipada para un sistema de aislación para una componente de un registro sísmico, se aprecia la gran cantidad de porcentaje de energía de entrada que absorbe el sistema de aislación. En cuanto a la amortiguación se incrementa un poco el valor con respecto al amortiguamiento inherente de la estructura. Mas adelante, se presenta de manera resumida tabulados los resultados para cada sistema de aislación y microzona estudiado.

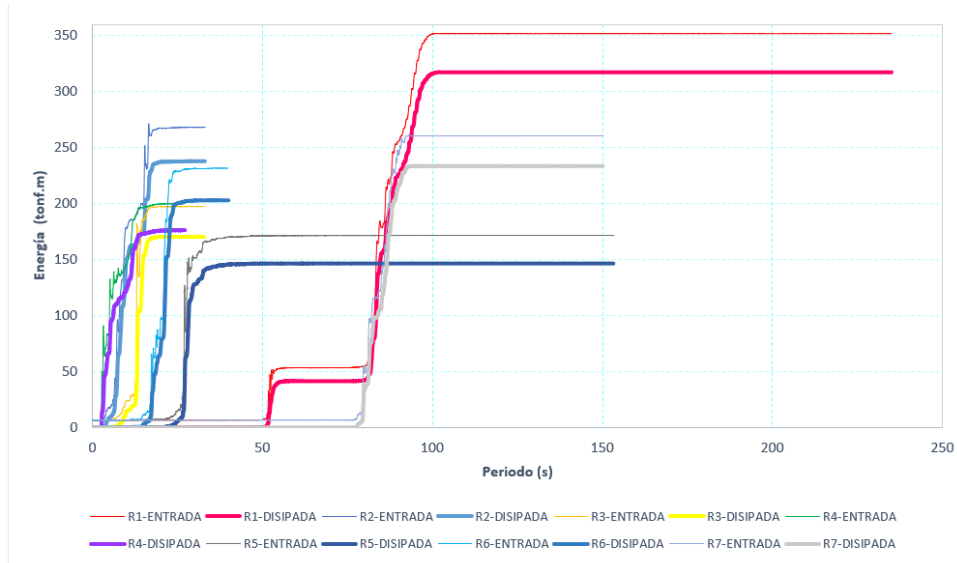


Figura 204. Disipación de energía proveniente de 7 Registros Sísmicos (Componente EW – Aislador LRB) - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

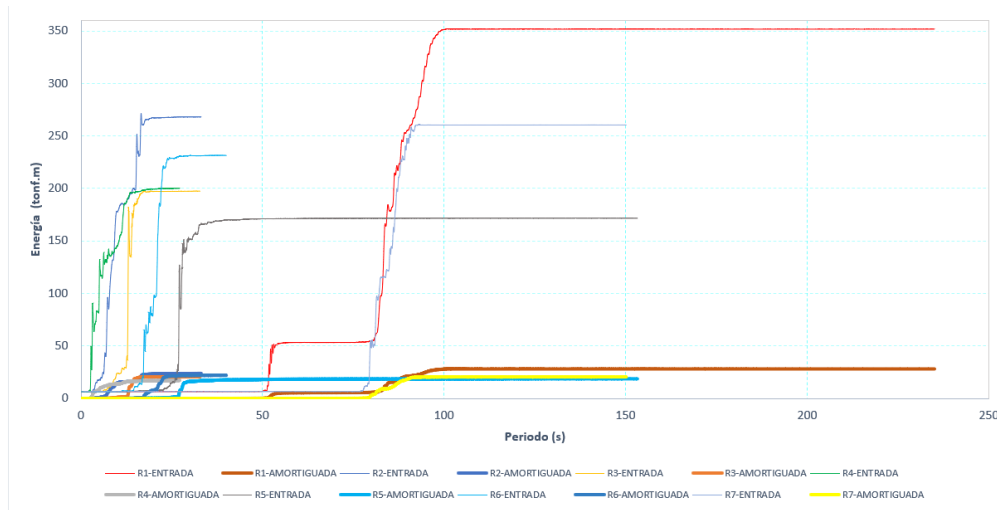


Figura 205. Amortiguamiento Sistema de Aislación vs. 7 Registros Sísmicos (Componente EW – Aislador LRB) - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

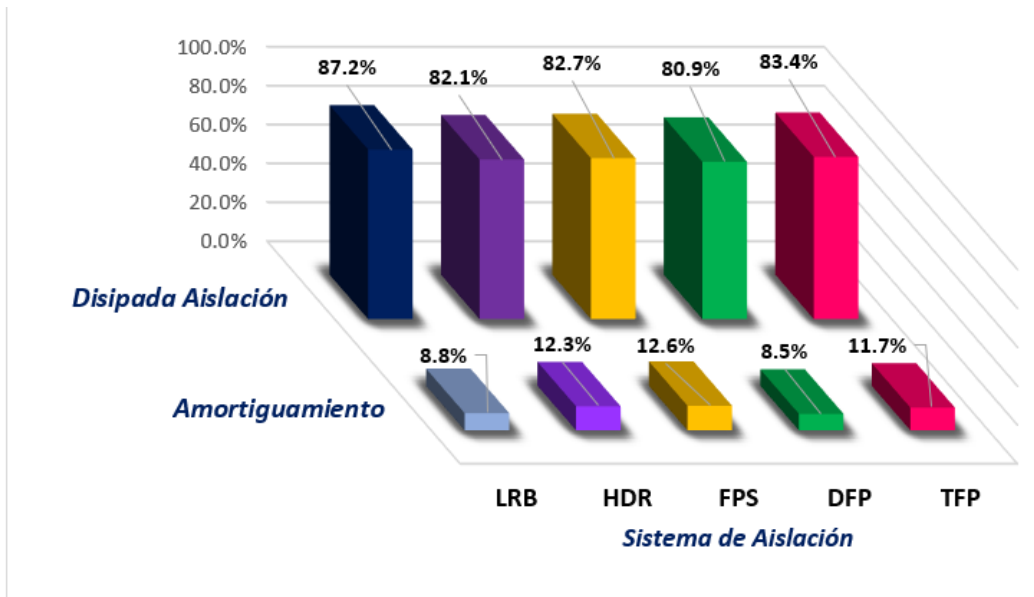


Figura 206. Energía disipada y Amortiguamiento Promedio por Sistema de Aislación para los 7 Registros Sísmicos (EW-NS) - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

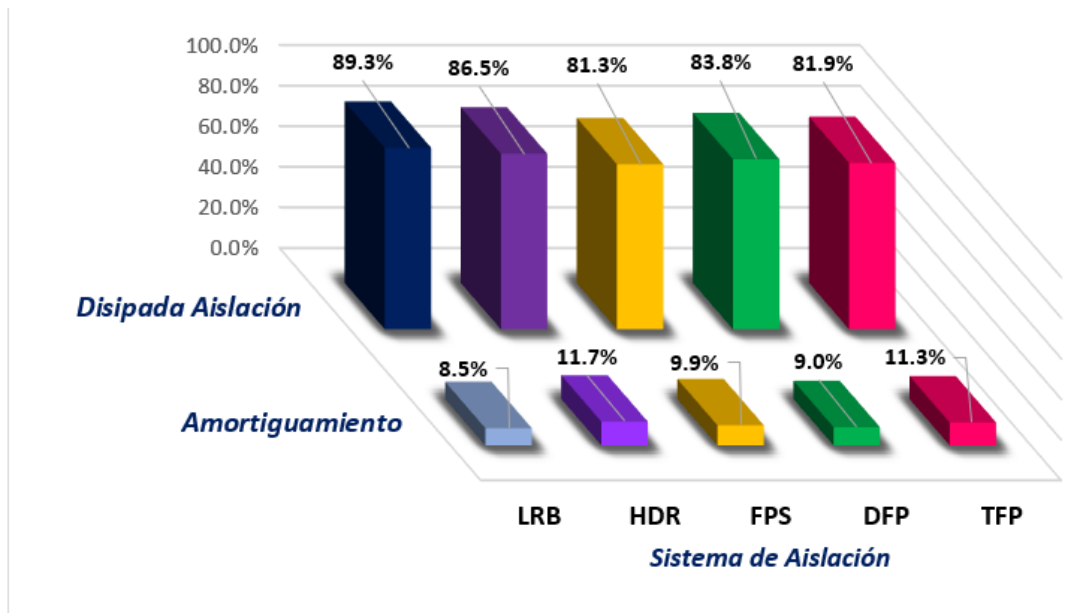
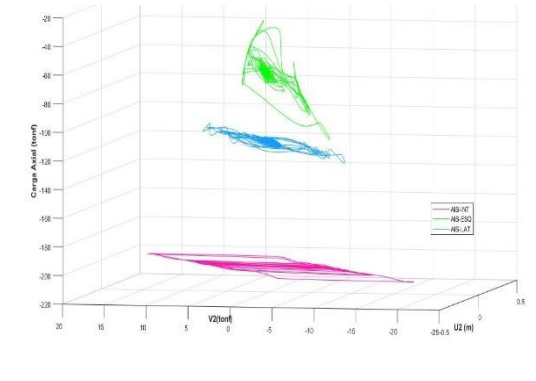
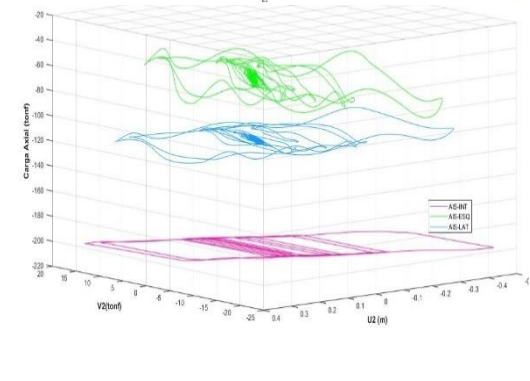
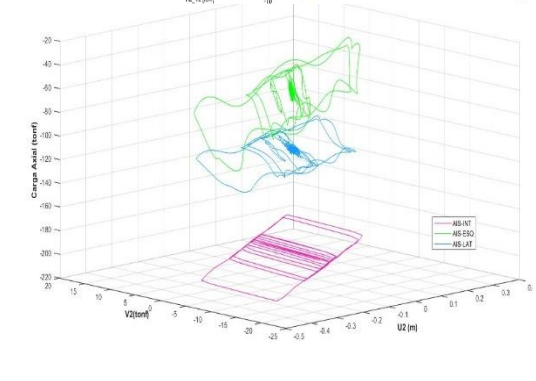
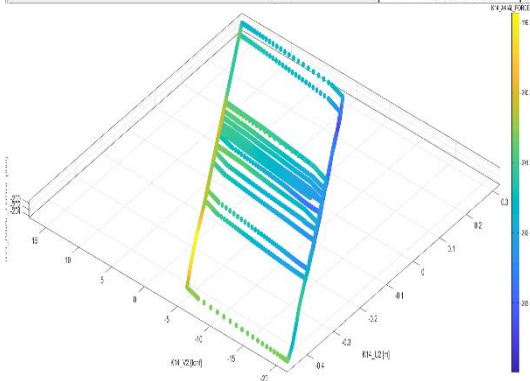
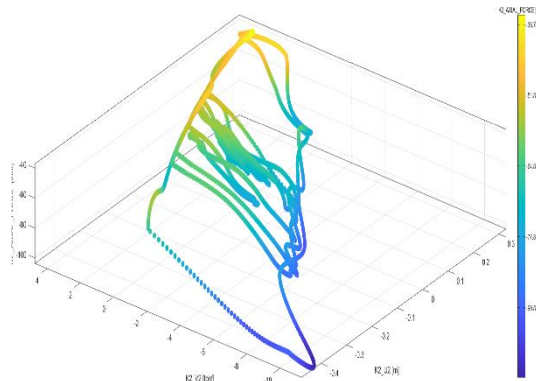
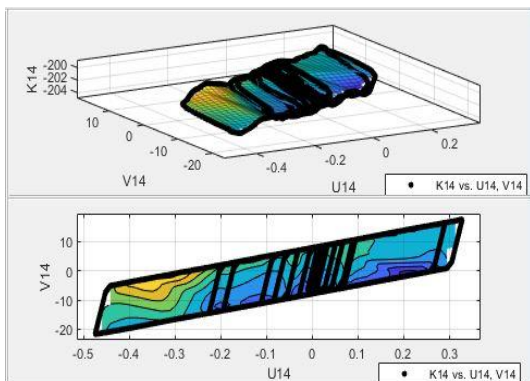
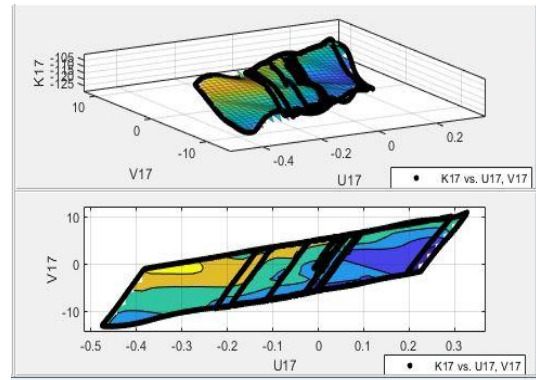
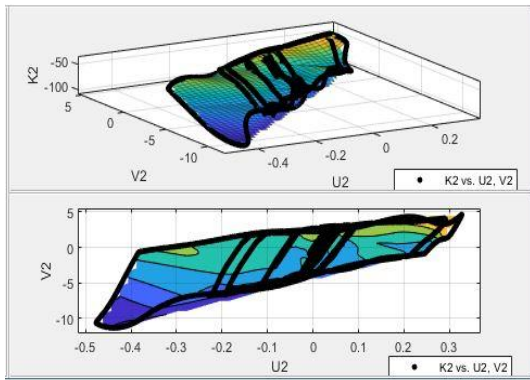


Figura 207. Energía disipada y Amortiguamiento Promedio por Sistema de Aislación para los 7 Registros Sísmicos (EW-NS) - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

Los valores promedios de energía disipada y amortiguamiento por sistema de aislación que se aprecian en la Figura 206 y Figura 207, indican que para ambas microzonas, los más eficientes son el LRB y HDR. Aunque para los otros sistemas se tienen valores aceptables dentro de los esperados en cuanto a disipación y amortiguamiento.

Influencia variación de carga axial en la respuesta local de aislador.



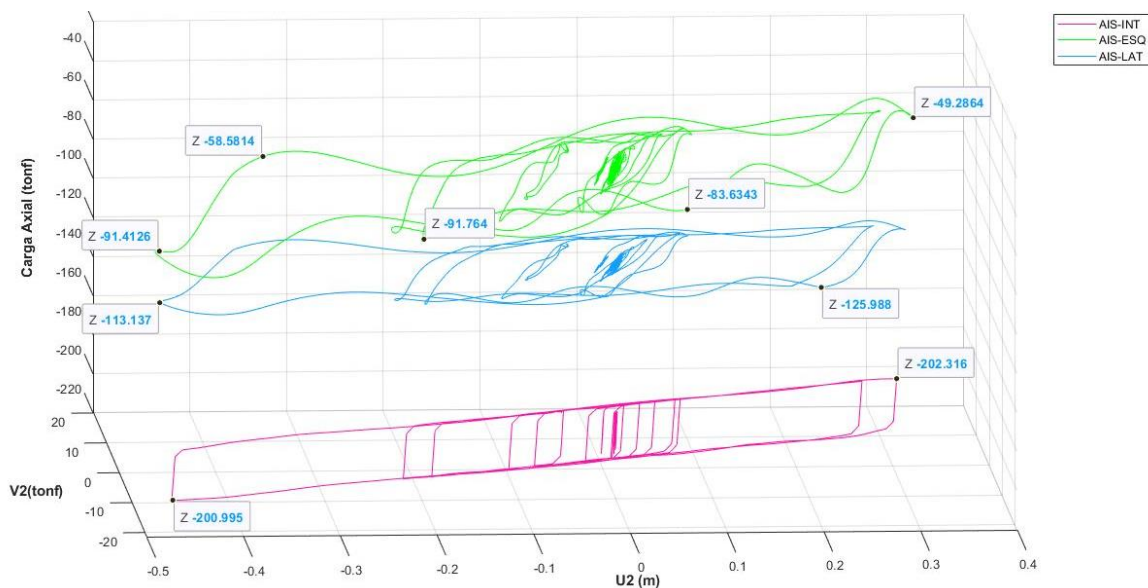


Figura 208. Comparación del comportamiento de la respuesta local histerética de un aislador de Esquina vs. Lateral vs. Interior (R5-EW-DFP) - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

Se incluyó este campo de análisis porque en la respuesta local de los aisladores se observan comportamientos que difieren del modelo bilineal idealizado, según la localización o ubicación en planta del aislador, es decir si está en una esquina, en la parte lateral o en el interior de la edificación. Por lo cual, los aisladores que tienen poca variación de carga axial, o que se mantienen con carga axial casi constante durante la aplicación de los distintos registros sísmicos la respuesta histerética es muy cercana al modelo bilineal idealizado. En cuanto se van presentando variaciones de carga axial mayores, se va distorsionando y se empiezan a obtener diferencias apreciables del modelo bilineal idealizado (aislador lateral), para el caso de variación de carga axial con excesivos o abruptos cambios en la carga axial (aislador de esquina) o de pronto que ocurra un leve levantamiento, los desplazamientos se salen de los límites del modelo bilineal idealizado.

En el Apéndice 1 se muestran varias respuestas de los distintos tipos de aisladores para los distintos registros sísmicos, según su ubicación en planta. En este caso, el sistema que mejor contrarrestó estos efectos perjudiciales fue el LRB al trabajar en conjunto con los deslizadores.

En resumen y teniendo en cuenta los aspectos analizados, cualquier sistema de aislación cumple las expectativas de comportamiento esperados, algunos destacándose por poco sobre los demás en ciertos tópicos, se debe también tener en cuenta al momento de escoger la selección, los parámetros de diseño de cada sistema, siendo en algunos más demandantes en cuestión de tiempos, por los múltiples criterios a verificar y variables involucradas, así mismo, la disponibilidad y el costo. Se escoge por las respuestas a las variables analizadas, el sistema de aislación DFP, por su consistencia en los resultados obtenidos, la practicidad en los cálculos, aunque se limita un poco para controlar los efectos torsionales y a pesar de las variaciones en las respuestas locales en los aisladores con variación abrupta de carga axial. El sistema TFP y FPS también presentaron buen desempeño, pero el uno sólo es comercializado por una sola empresa, mientras el FPS no hay tanta maniobra de cálculo para poder acercarse a los valores objetivos especificados en el análisis. Los sistemas LRB y HDR, presentan muchas variables a considerar y otros chequeos adicionales por los materiales con los que se construyen, lo que genera mayores puntos de control y verificación.

Un tema adicional es la microzonificación, para la microzona Piedemonte C, los comportamientos de todos los sistemas fueron excelentes (exceptuando la influencia de la variabilidad de carga axial), se logra aislar la estructura de forma óptima y en concordancia del desacople de la superestructura y el sistema de aislación. Para la microzona Lacustre 200, fue algo complicado hacer que el sistema de aislación funcionara para los tipos pendulares en el periodo objetivo de 3 s, sino que se tuvo que llevar hasta 4 s para alejarse aún más de los valores altos del espectro de diseño máximo. Es como si para esta microzona, se entrara en una especie de resonancia para algunos de los registros analizados.

5.3 Diseño de la estructura con base aislada.

Para el sistema de aislación y para elementos estructurales debajo del sistema de aislación, se deben diseñar para contrarrestar un valor mínimo de fuerza lateral denominada V_b , usando las provisiones de una estructura no aislada.

Microzona Piedemonte C.

Fuerza sísmica lateral del sistema de aislamiento (Cortante sistema de aislamiento).

$$V_b = 500 \text{ ton.}$$

Donde, para todos los casos, V_b no puede ser menor que la máxima fuerza en el sistema de aislación a cualquier desplazamiento incluyendo el desplazamiento de diseño.

Para el diseño de la superestructura se debe usar las fuerzas laterales mínimas, resultantes de los siguientes parámetros de comparación.

Fuerza cortante no reducida de la superestructura

$$V_{st} = 450 \text{ ton}$$

$$R_a = \text{Mínimo } (2 \text{ ó } 3/8R) = 1.875$$

Fuerza cortante reducida de la superestructura

$$V_s = 240 \text{ ton}$$

En ningún caso V_s puede ser menor a:

Fuerza lateral requerida para una estructura de base fija del mismo peso y con un periodo igual al periodo aislado T_D .

$$V_f = 117 \text{ ton.}$$

Fuerza lateral para activar completamente el sistema de aislamiento multiplicado por 1.5.

$$1.5Q_{ds} = 199 \text{ ton.}$$

El análisis dinámico modal espectral arrojó resultados del cortante dinámico en la base de diseño mayores al estático, por tanto, no hubo necesidad de realizar ajustes y se trabajó con el valor del análisis dinámico para las combinaciones de diseño.

Microzona Lacustre 200.

Fuerza sísmica lateral del sistema de aislamiento (Cortante sistema de aislamiento).

$$V_b = 585 \text{ ton.}$$

Donde, para todos los casos, V_b no puede ser menor que la máxima fuerza en el sistema de aislamiento a cualquier desplazamiento incluyendo el desplazamiento de diseño.

Para el diseño de la superestructura se debe usar las fuerzas laterales mínimas, resultantes de los siguientes parámetros de comparación.

Fuerza cortante no reducida de la superestructura

$$V_{st} = 562 \text{ ton}$$

$$R_a = \text{Mínimo } (2 \text{ ó } 3/8R) = 1.875$$

Fuerza cortante reducida de la superestructura

$$V_s = 300 \text{ ton}$$

En ningún caso V_s puede ser menor a:

Fuerza lateral requerida para una estructura de base fija del mismo peso y con un periodo igual al periodo aislado T_D .

$$V_f = 180 \text{ ton.}$$

Fuerza lateral para activar completamente el sistema de aislamiento multiplicado por 1.5.

$$1.5Q_{ds} = 237 \text{ ton.}$$

El análisis dinámico modal espectral arrojó resultados del cortante dinámico en la base de diseño mayores al estático, por tanto, no hubo necesidad de realizar ajustes y se trabajó con el valor del análisis dinámico para las combinaciones de diseño.

Los resultados del diseño para los modelos aislados resultan en refuerzos prácticamente mínimos en elementos vigas, se usarán las mismas secciones y sus correspondientes diagramas momento curvatura, descritos anteriormente. En cuanto a columnas, por tener secciones brutas diferentes, se realizó el diseño y se muestran las secciones definitivas obtenidas y los diagramas respectivos momento curvatura para ambas microzonas.

Sección Columna

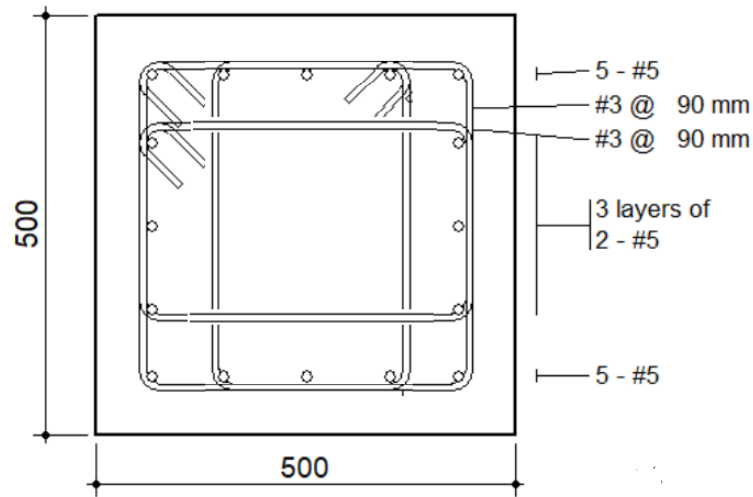
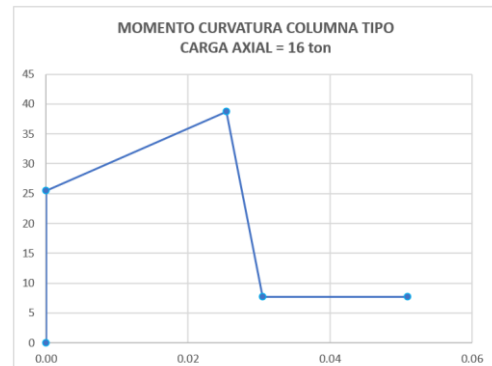
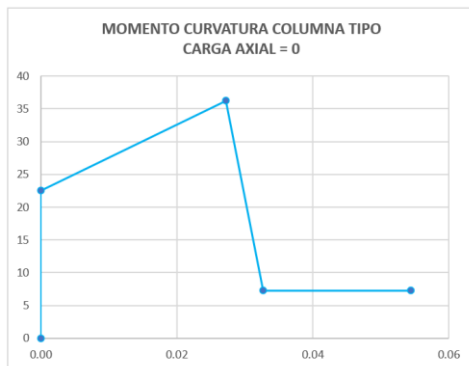


Figura 209. Sección de columna Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia.

Con estas secciones se construyeron los diagramas momento curvatura para cada una de las rótulas a asignar al modelo para el análisis por desempeño, los parámetros para los gráficos se obtuvieron mediante la aplicación Section Designer del software Sap2000.



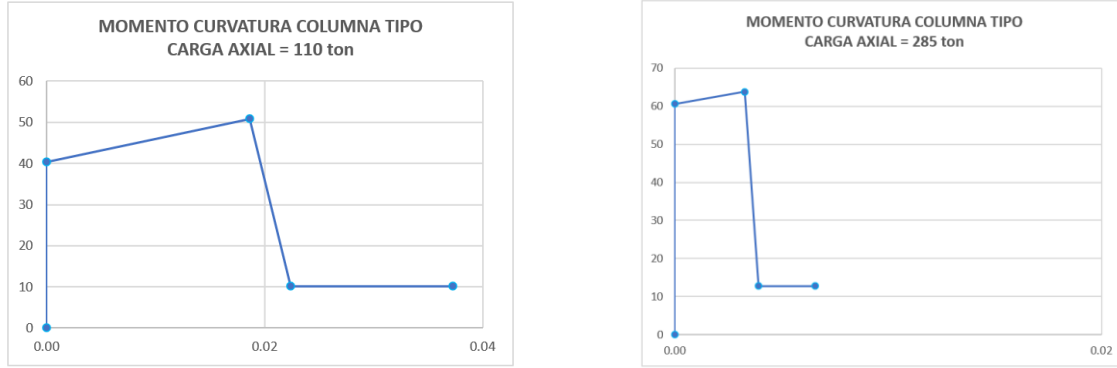


Figura 210. Diagrama Momento – Curvatura Columnas Microzona Piedemonte C para varias cargas axiales. Fuente: Propia.

Sección Columna

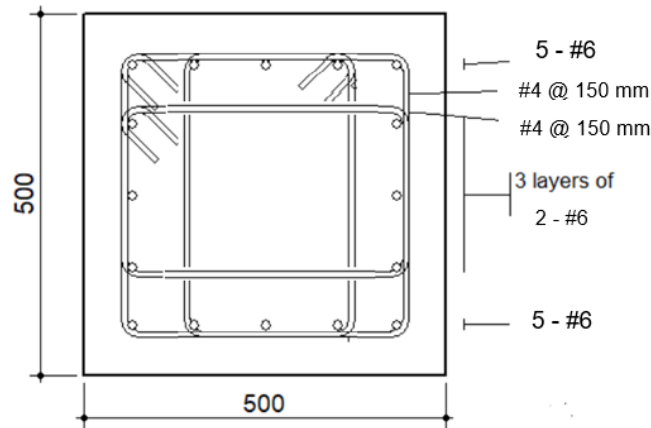
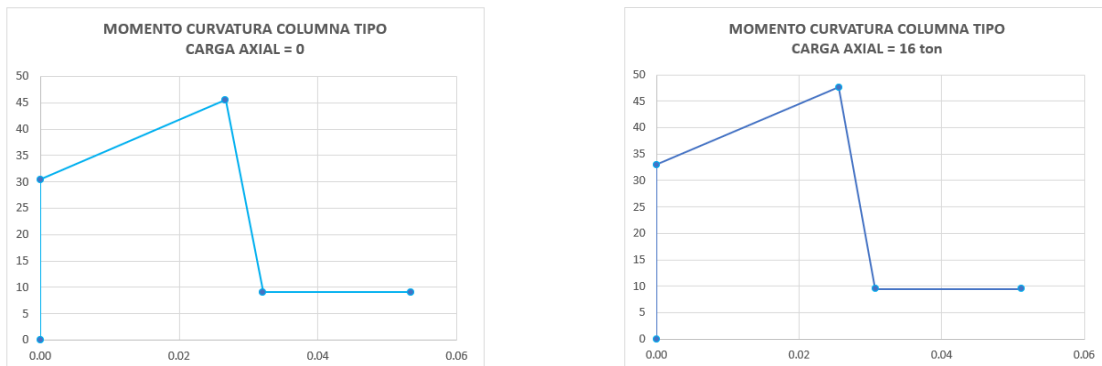


Figura 211. Sección de columna Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia.

Con estas secciones se construyeron los diagramas momento curvatura para cada una de las rótulas a asignar al modelo para el análisis por desempeño, los parámetros para los gráficos se obtuvieron mediante la aplicación Section Designer del software Sap2000.



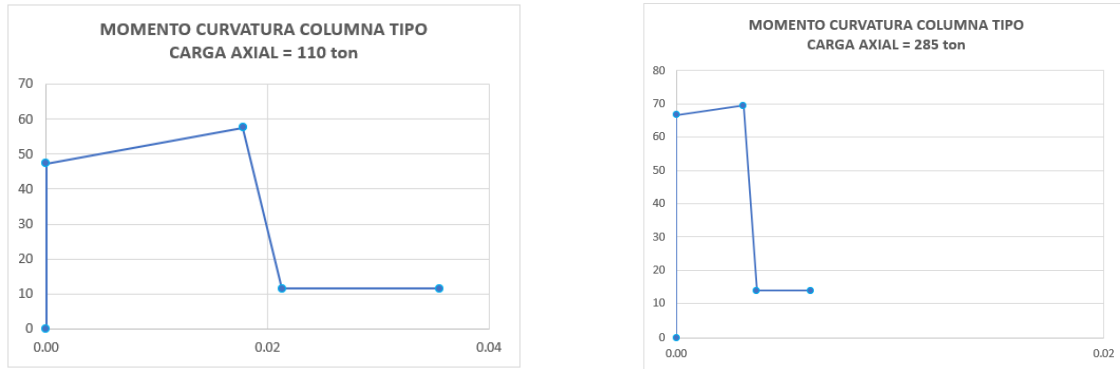


Figura 212. Diagrama Momento – Curvatura Columnas Microzona Lacustre 200 para varias cargas axiales. Fuente: Propia.

Para el diseño de los elementos que conforman la superestructura hay que tener en cuenta que se usa el espectro elástico de diseño de la normativa (escalado al sismo máximo esperado SMD) para un amortiguamiento del crítico del 5%, y para el sistema de aislación y sus componentes debajo de él, este espectro debe afectarse o escalarse por el factor de amortiguamiento adicional aportado por el aislamiento basal, a partir de un valor de referencia cercano donde con certeza se encuentren a partir de allí, los periodos aislados de los 3 modos principales de vibración. También se debe incluir en las vigas y pedestales que hacen parte del sistema de aislación los momentos de segundo orden que se generan por el efecto P-Δ. Dichos espectros se muestran en la Figura 213.

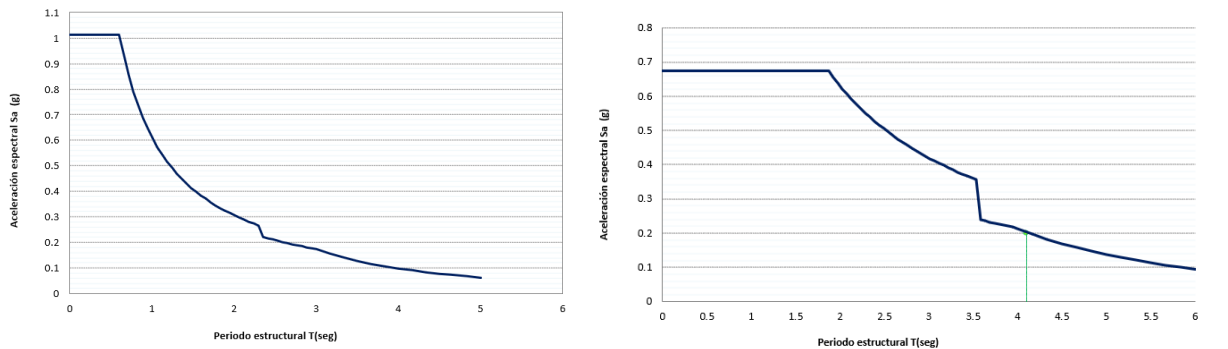


Figura 213. Espectros SMD reducido por amortiguamiento factor B_M – Microzona Piedemonte C y Lacustre 200. Fuente: Propia.

5.4 Desempeño Edificaciones con Base Fija.

Se realizó el análisis por desempeño de las estructuras con base fija para ambas microzonas sísmicas usando el método del análisis no lineal estático Push Over.

Microzona Piedemonte C.

A continuación, se presentan los cálculos, resultado de la aplicación del método Push Over en ambas direcciones. Los resultados en la dirección Y fueron similares a los de la dirección X. Se

obtuvo un nivel importante de daño en rótulas cuando se llevó el análisis hasta un desplazamiento de aproximadamente 52 cm. Para los niveles sismo de diseño y sismo máximo esperado, se encontró el punto de desempeño en las categorías seguridad a la vida y prevención del colapso respectivamente, que es el comportamiento esperado según el diseño por los requerimientos del código. La primera rótula se presentó para un desplazamiento de aproximadamente 3.2 cm.

Las vigas para el nivel de desplazamiento en cubierta de $1.5\delta_i$ alcanzaron niveles de formación de rótulas plásticas LS a CP, con un porcentaje de daño en un 25%. El restante 75% no presenta daños. En cuanto a las columnas, las rótulas en un 93.5% no presentan daños, y alrededor del 6.5% de las mismas alcanza algún nivel de daño. De manera global la estructura presenta rótulas con algún nivel de daño en un 34%. Las derivas se pasan en el nivel tres del valor permisible.

PUSH-OVER ASCE 41-17

Datos análisis de pushover en la dirección X

$S_a = 0.50g$	(Aceleracion espectral)
$V_y = 519.72 \text{ Ton}$	(cortante efectivo de fluencia)
$V_i = 459.79 \text{ Ton}$	(cortante en el rango lineal))
$W = 3017 \text{ Ton}$	(masa de la estructura)
$\delta_y = 0.06237m$	(desplazamiento efectivo de fluencia)
$\delta_i = 0.04547m$	(desplazamiento en el rango lineal)
$T_c = 0.60 \text{ s}$	(Periodo corto del espectro)

7.4.3.3.2 Target Displacement

General For buildings with rigid diaphragms at each floor level, the target displacement, δ_i shall be calculated in accordance with Eq. 7-28 or by a calculated approved procedure that accounts for the nonlinear response of the building.

Periodo efectivo:

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \quad \text{Ec. (7-27)}$$

$$T_e = 0.89 \text{ s}$$

Periodo fundamental elástico:	$T_i = 0.81 \text{ s}$
Rigidez elástica:	$K_i = 10112 \text{ Ton/m}$
Rigidez efectiva:	$K_e = 8333 \text{ Ton/m}$

Coefficientes para el cálculo del target displacement:

C_o = modification factor to relate spectral displacement of an equivalent single-degree of freedom (SDOF) system to the roof displacement of the building.

Table 7-5. Values for Modification Factor C_o

Number of Stories	Shear Buildings ²		Other Buildings
	Triangular Load Pattern (1.1, 1.2, 1.3)	Uniform Load Pattern (2.1)	Any Load Pattern
1	1.0	1.0	1.0
2	1.2	1.15	1.2
3	1.2	1.2	1.3
5	1.3	1.2	1.4
10+	1.3	1.2	1.5

¹Linear interpolation shall be used to calculate intermediate values.

²Buildings in which, for all stories, story drift decreases with increasing height.

$$C_o = 1.42$$

C_1 = modification factor to relate expected maximum inelastic displacements to displacements calculated for linear elastic response. For periods less than 0.2 sec, C_1 , need not be taken greater than the value at $T = 0.2$ sec. For periods greater than 1.0 sec, $C_1 = 1.0$.

$$C_1 = 1 + \frac{\mu_{\text{strength}} - 1}{aT_e^2} \quad (7-29)$$

$$\mu_{\text{strength}} = \frac{S_a}{V_y/W} \cdot C_m \quad (7-31)$$

Table 7-4. Values for effective Mass Factor C_m

No. of Stories	Concrete Moment Frame	Concrete Shear Wall	Concrete Pier-Spandrel	Steel Moment Frame	Steel Concentric Braced Frame	Steel Eccentric Braced Frame	Other
1-2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
3 or more	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0

Factor de masa efectiva:

$$C_m = 0.9$$

Factor de clase de sitio:

$$a = 90$$

Relación de demanda elástica con la de fluencia:

$$\mu_{\text{strength}} = 2.63$$

$$C_1 = 1.02$$

C_2 , = modification factor to represent the effect of pinched hysteresis shape, cyclic stiffness degradation, and strength deterioration on maximum displacement response. For periods greater than 0.7 sec, $C_2 = 1.0$;

$$C_2 = 1 + \frac{1}{800} \left(\frac{\mu_{\text{strength}} - 1}{T_e} \right)^2 \quad (7-30) \quad C_2 = 1.00$$

Target Displacement:

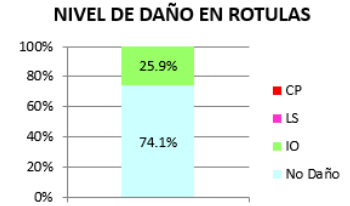
$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (7-28) \quad \delta_t = 0.145m$$

El análisis debe llevarse por lo menos hasta el 150% del target displacement. (C7.4.3.2.1 - ASCE 41-17)

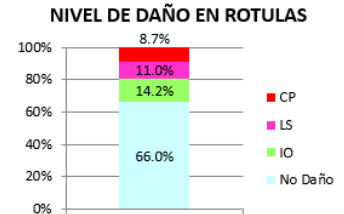
$$1.5 \delta_t = 0.22m$$

Figura 214. Cálculos Pushover Dir. - X - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

Target X	AISC41-13 $\delta_t = 0,14m$	ESTADO DE ROTULAS EN X EN EL TARGET DISPLACEMENT - AISCE 41-17			
		ESTADO DE ROTULAS			
		Total de rotulas asignadas = 780			
		NO DAÑO	IO	LS	CP
578	202	0	0		
74.10%	25.90%	0.00%	0.00%		



Ultimate Target X	1,5 $\delta_t = 0,22m$	ESTADO DE ROTULAS EN X-1.5 TARGET DISPLACEMENT - AISCE 41-17			
		ESTADO DE ROTULAS			
		Total de rotulas asignadas = 780			
		NO DAÑO	IO	LS	CP
515	111	86	68		
66.03%	14.23%	11.03%	8.72%		



Final Análisis X	$\delta_t = 0,52m$	ESTADO DE ROTULAS EN X- FINAL DEL ANÁLISIS			
		ESTADO DE ROTULAS			
		Total de rotulas asignadas = 780			
		NO DAÑO	IO	LS	CP
515	0	0	265		
66.03%	0.00%	0.00%	33.97%		

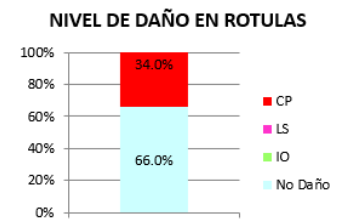


Figura 215. Niveles de daño en rótulas para desplazamiento objetivo y final del análisis del Cálculo Pushover Dir. - X - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

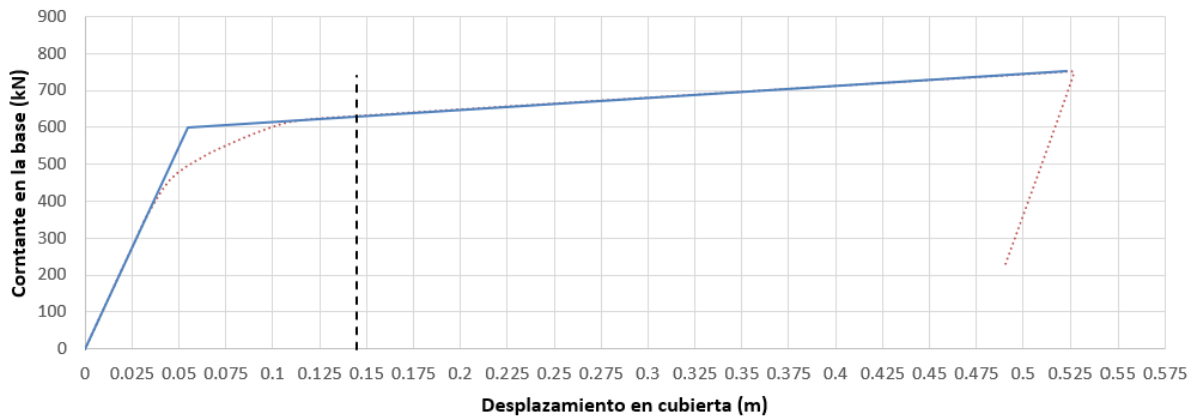


Figura 216. Curva de Capacidad Cálculo Pushover Dir. - X - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

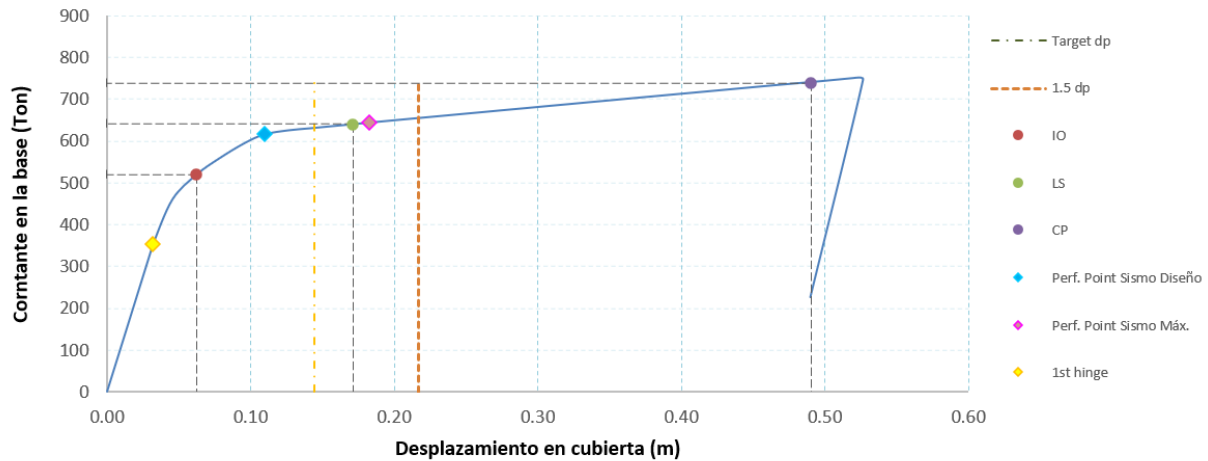


Figura 217. Curva de Capacidad Final del Análisis Cálculo Pushover Dir. - X - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

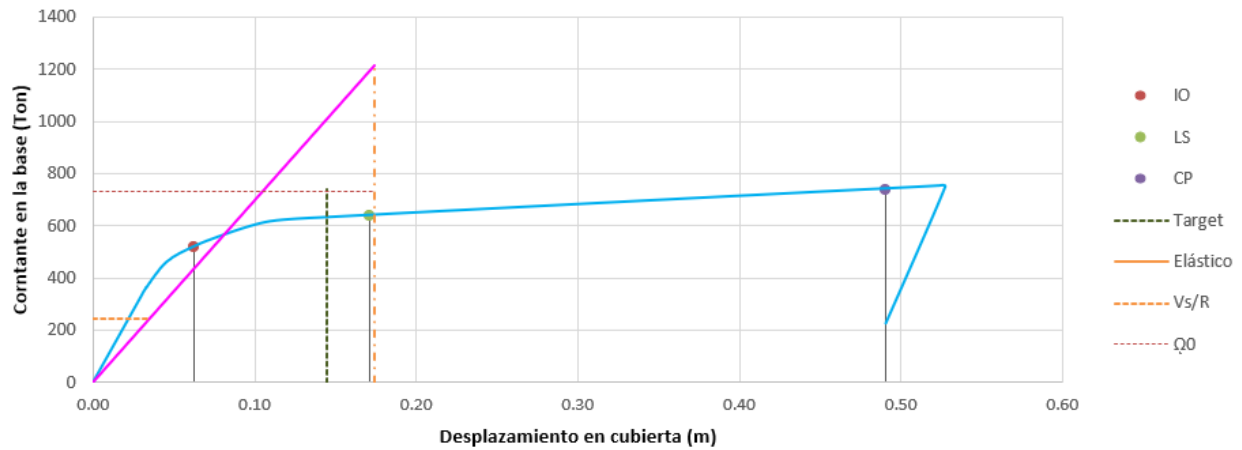


Figura 218. Representación Gráfica Sobrerresistencia, ductilidad, límites de comportamiento, análisis lineal y Curva de Capacidad Final del Análisis Cálculo Pushover Dir. - X - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

Se observa en esta última gráfica que el análisis pushover arrojó para capacidad máxima un cortante de valor 752 toneladas, correspondientes a un desplazamiento en cubierta aproximado de 52 cm, el valor de diseño para cortante fue de 243 toneladas y el desplazamiento de fluencia alrededor de 6.2 cm, comparando estos datos se obtiene una sobrerresistencia a colapso respecto a la demanda de diseño de 3.09 y una ductilidad en cuanto a desplazamiento de 8.45.

Nivel de daño en Rotulas de vigas

NO DAÑO	IO OCUPACION INMEDIATA	LS SEGURIDAD DE VIDA	CP COLAPSO PREVENTIVO
360	0	120	0
75.0%	0.0%	25.0%	0.0%

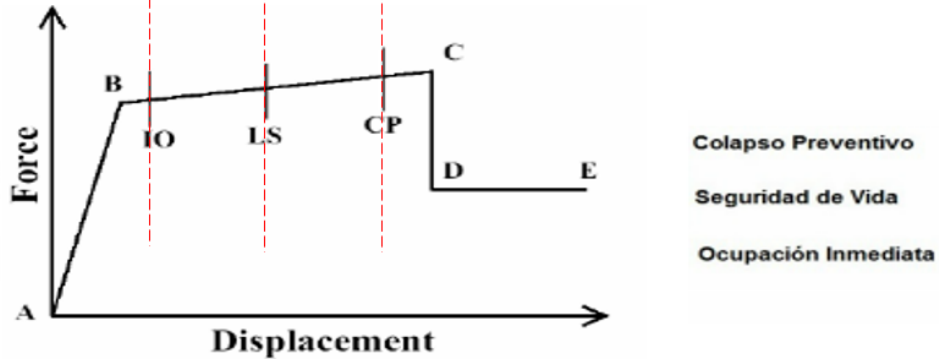


Figura 219. Nivel de daño en vigas para el desplazamiento $1.5\delta_t$, Cálculo Pushover Dir. - X - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

Nivel de daño en Rotulas de columnas

NO DAÑO	IO OCUPACION INMEDIATA	LS SEGURIDAD DE VIDA	CP COLAPSO PREVENTIVO
281	3	17	0
93.5%	1.0%	5.5%	0.0%

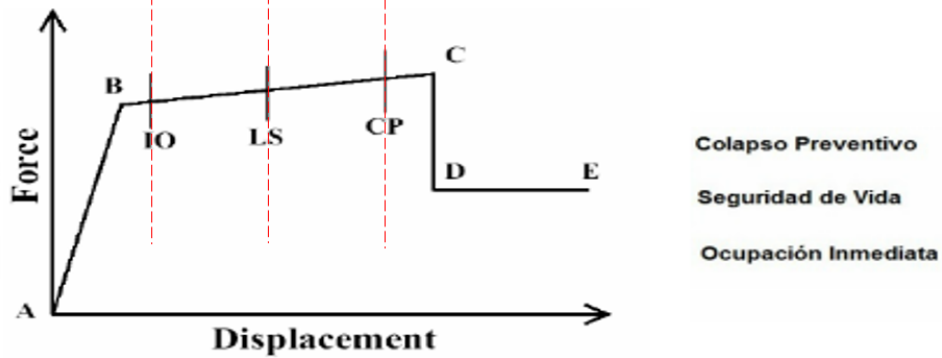


Figura 220. Nivel de daño en columnas para el desplazamiento $1.5\delta_t$, Cálculo Pushover Dir. - X - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

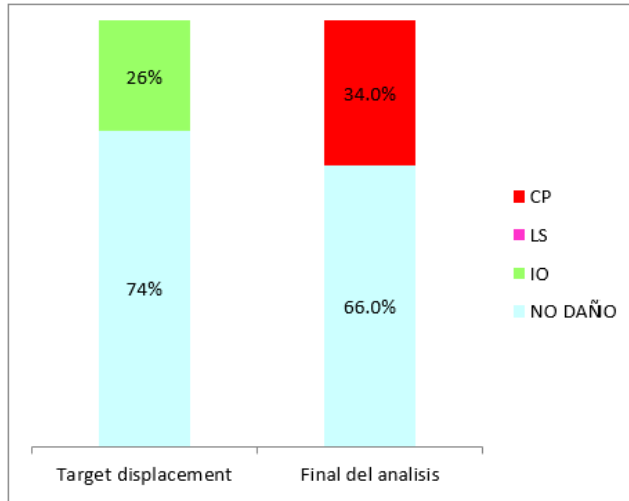


Figura 221. Comparativo nivel de daño en rótulas desplazamiento objetivo vs final del análisis, Cálculo Pushover Dir. - X - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

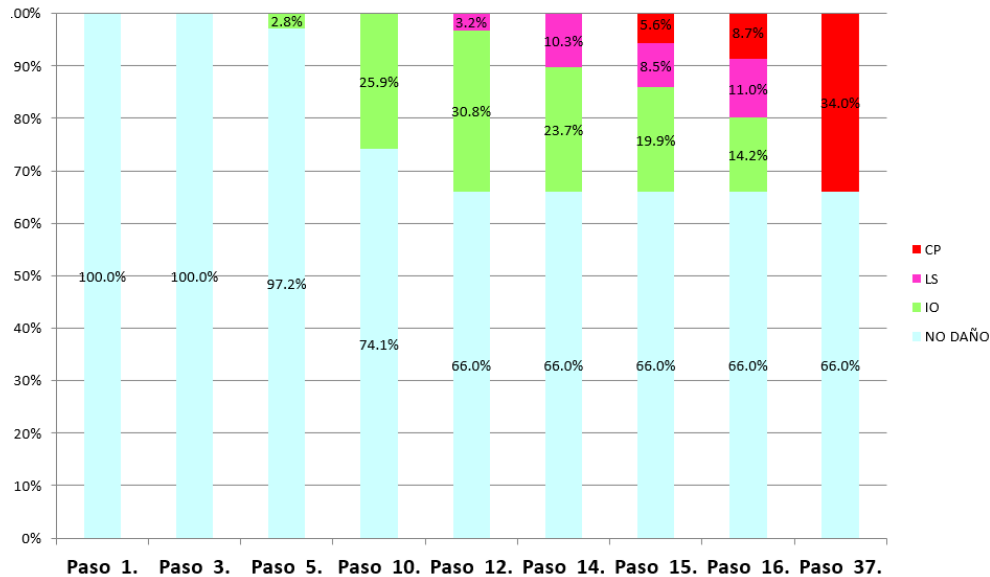


Figura 222. Plastificación progresiva, Cálculo Pushover Dir. - X - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

PUSHOVER SENTIDO X	DERIVAS EN EL TARGET DISPLACEMENT					
	Alt. piso	δx (m)	δy (m)	$\Delta\alpha$ (cm)	$\Delta\rho$ (cm)	%
Story6	2.90	0.1413	0.0000	1.45	2.90	OK 0.50
Story5	2.90	0.1268	0.0000	2.16	2.90	OK 0.75
Story4	2.90	0.1052	0.0000	2.86	2.90	OK 0.99
Story3	2.90	0.0766	0.0000	3.21	2.90	NO 1.11
Story2	2.90	0.0445	0.0000	2.86	2.90	OK 0.99
Story1	2.90	0.0159	0.0000	1.59	2.90	OK 0.55
Base	2.90	0.0000	0.0000			

Figura 223. Derivas por piso, Cálculo Pushover Dir. - X - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

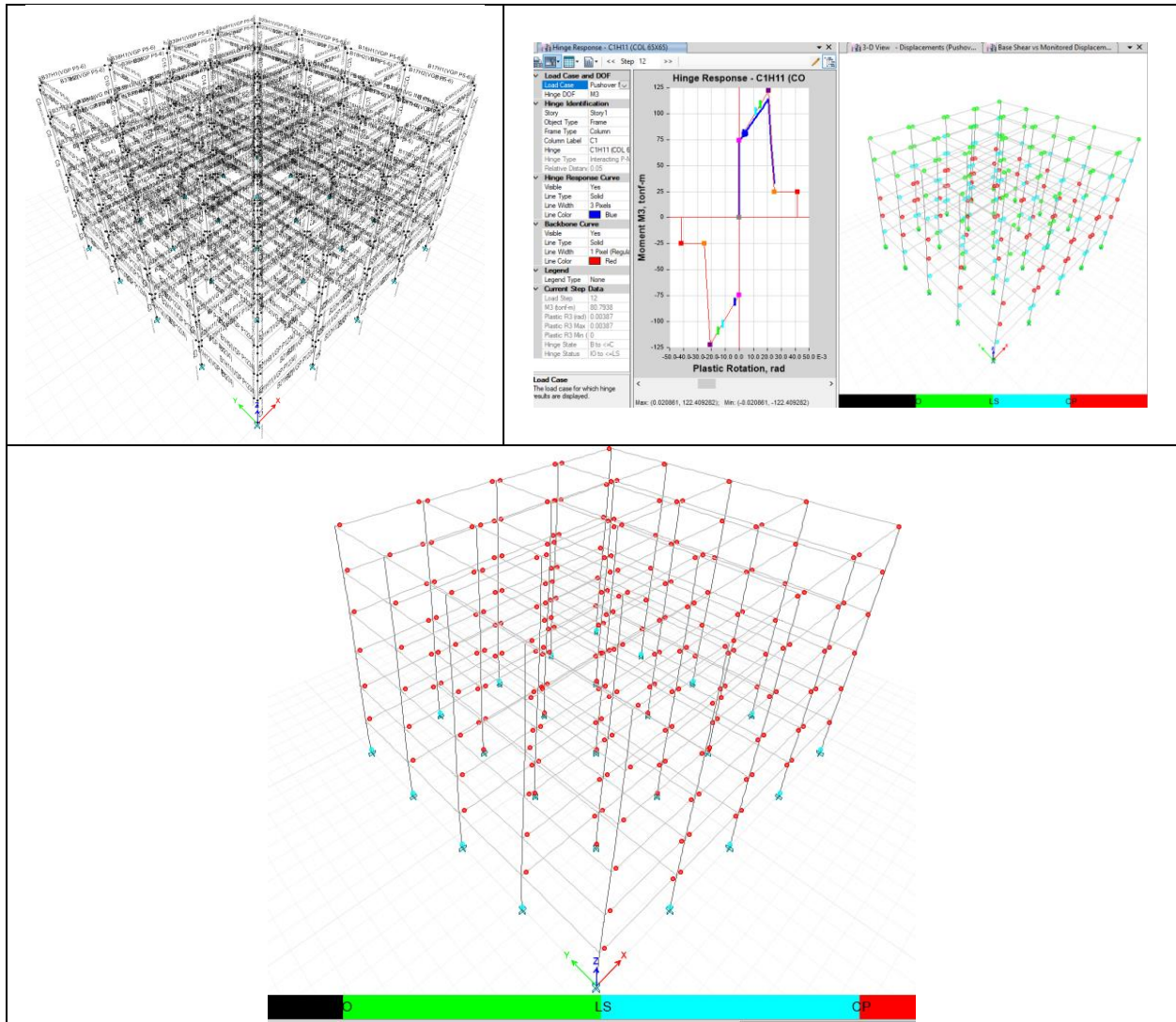


Figura 224. Proceso asignación de rótulas, rótulas formadas en vigas en nivel CP y rótulas para el desplazamiento de 36 cm, Cálculo Pushover Dir. - X - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

Microzona Lacustre 200.

A continuación, se presentan los cálculos, resultado de la aplicación del método Push Over en ambas direcciones. Los resultados en la dirección Y fueron similares a los de la dirección X. Se obtuvo un nivel importante de daño en rótulas cuando se llevó el análisis hasta un desplazamiento de aproximadamente 60 cm. Para los niveles sismo de diseño y sismo máximo esperado, se encontró el punto de desempeño traspasando el límite de la categoría seguridad a la vida y en el rango de la franja hasta prevención del colapso, que no es un comportamiento esperado según el diseño por los requerimientos del código. La primera rótula se presentó para un desplazamiento de aproximadamente 3.3 cm.

Las vigas para el nivel de desplazamiento en cubierta de $1.5\delta_i$ alcanzaron niveles de formación de rótulas plásticas LS a CP, con un porcentaje de daño en un 25%. El restante 75% se encuentra no presenta daños. En cuanto a las columnas, las rótulas en un 95% no presentan daños, y alrededor del 5% de las mismas alcanza algún nivel de daño. De manera global la estructura presenta rótulas con algún nivel de daño en un 23%, con un 0.6% en prevención en colapso. Las derivas se pasan en los niveles dos, tres y cuatro del valor permisible. Este diseño no es satisfactorio para los niveles de desempeño, por la aparición temprana de rótulas en columnas en nivel de prevención del colapso en el paso 11. Para el final del análisis se evidencia que no se cumple con el mecanismo de falla deseada, viga débil - columna fuerte.

PUSH-OVER ASCE 41-17

Datos análisis de pushover en la dirección X

$S_a = 0.45g$	(Aceleración espectral)
$V_y = 447.49 \text{ Ton}$	(cortante efectivo de fluencia)
$V_i = 393.49 \text{ Ton}$	(cortante en el rango lineal)
$W = 2913 \text{ Ton}$	(masa de la estructura)
$\delta_y = 0.06287m$	(desplazamiento efectivo de fluencia)
$\delta_i = 0.04457m$	(desplazamiento en el rango lineal)
$T_e = 1.87 \text{ s}$	(Periodo corto del espectro)

7.4.3.3.2 Target Displacement

General For buildings with rigid diaphragms at each floor level, the target displacement, δ_t shall be calculated in accordance with Eq. 7-28 or by a calculated approved procedure that accounts for the nonlinear response of the building.

Periodo efectivo:

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \quad \text{Ec. (7-27)}$$

$$T_e = 0.82 \text{ s}$$

Periodo fundamental elástico:	$T_1 = 0.74 \text{ s}$
Rigidez elástica:	$K_i = 8828 \text{ Ton/m}$
Rigidez efectiva:	$K_e = 7117 \text{ Ton/m}$

Coefficientes para el cálculo del target displacement:

C_o = modification factor to relate spectral displacement of an equivalent single-degree of freedom (SDOF) system to the roof displacement of the building.

Table 7-5. Values for Modification Factor C_o

Number of Stories	Shear Buildings ¹		Other Buildings
	Triangular Load Pattern (1.1, 1.2, 1.3)	Uniform Load Pattern (2.1)	Any Load Pattern
1	1.0	1.0	1.0
2	1.2	1.15	1.2
3	1.2	1.2	1.3
5	1.3	1.2	1.4
10+	1.3	1.2	1.5

¹Linear interpolation shall be used to calculate intermediate values.

²Buildings in which, for all stories, story drift decreases with increasing height.

$$C_o = 1.42$$

C_1 = modification factor to relate expected maximum inelastic displacements to displacements calculated for linear elastic response. For periods less than 0.2 sec, C_1 , need not be taken greater than the value at $T = 0.2 \text{ sec}$. For periods greater than 1.0 sec, $C_1 = 1.0$.

$$C_1 = 1 + \frac{\mu_{\text{strength}} - 1}{aT_e^2} \quad (7-29)$$

$$\mu_{\text{strength}} = \frac{S_a}{V_y / W} \cdot C_m \quad (7-31)$$

Table 7-4. Values for effective Mass Factor C_m

No. of Stories	Concrete Moment Frame	Concrete Shear Wall	Concrete Pier-Spandrel	Steel Moment Frame	Steel Concentric Braced Frame	Steel Eccentric Braced Frame	Other
1-2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
3 or more	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0

Factor de masa efectiva: $C_m = 0.9$
 Factor de clase de sitio: $a = 90$
 Relación de demanda elástica con la de fluencia: $\mu_{strength} = 2.64$
 $C_1 = 1.03$

C_2 = modification factor to represent the effect of pinched hysteresis shape, cyclic stiffness degradation, and strength deterioration on maximum displacement response. For periods greater than 0.7 sec, $C_2 = 1.0$;

$$C_2 = 1 + \frac{1}{800} \left(\frac{\mu_{strength} - 1}{T_e} \right)^2 \quad (7-30) \quad C_2 = 1.00$$

Target Displacement:

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (7-28) \quad \delta_t = 0.110m$$

El análisis debe llevarse por lo menos hasta el 150% del target displacement. (C7.4.3.2.1 - ASCE 41-17)

$$1.5 \delta_t = 0.17m$$

Figura 225. Cálculos Pushover Dir. - X - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

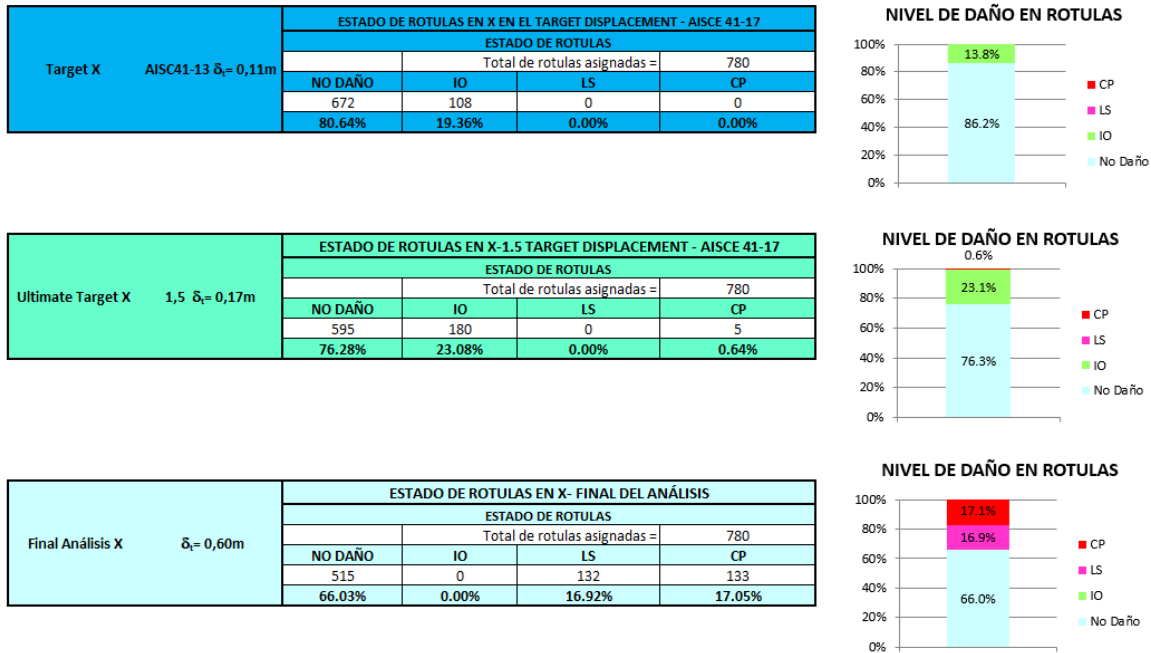


Figura 226. Niveles de daño en rótulas para desplazamiento objetivo y final del análisis del Cálculo Pushover Dir. - X - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

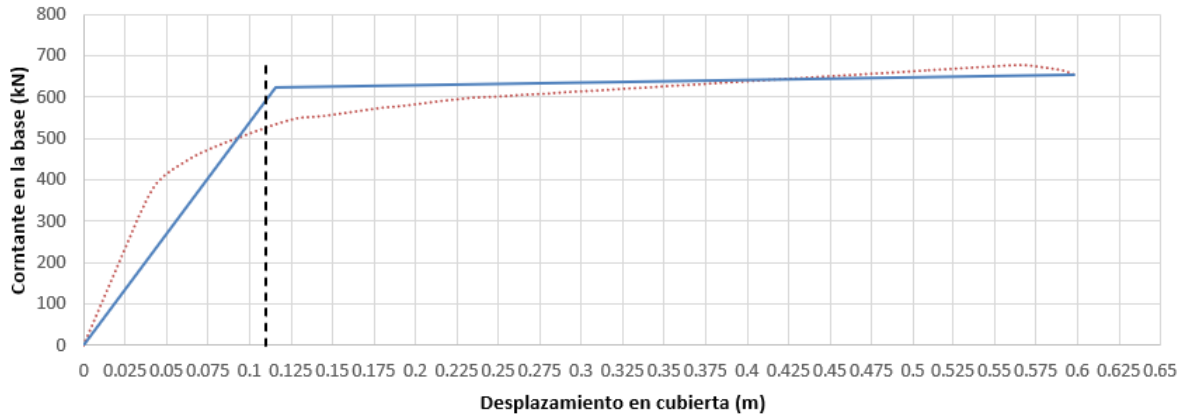


Figura 227. Curva de Capacidad Cálculo Pushover Dir. - X - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

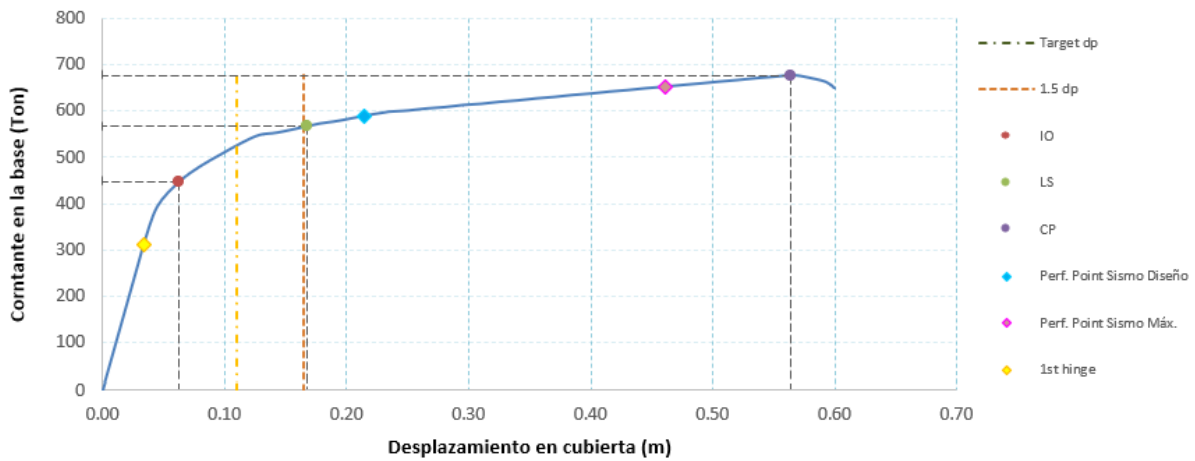


Figura 228. Curva de Capacidad Final del Análisis Cálculo Pushover Dir. - X - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

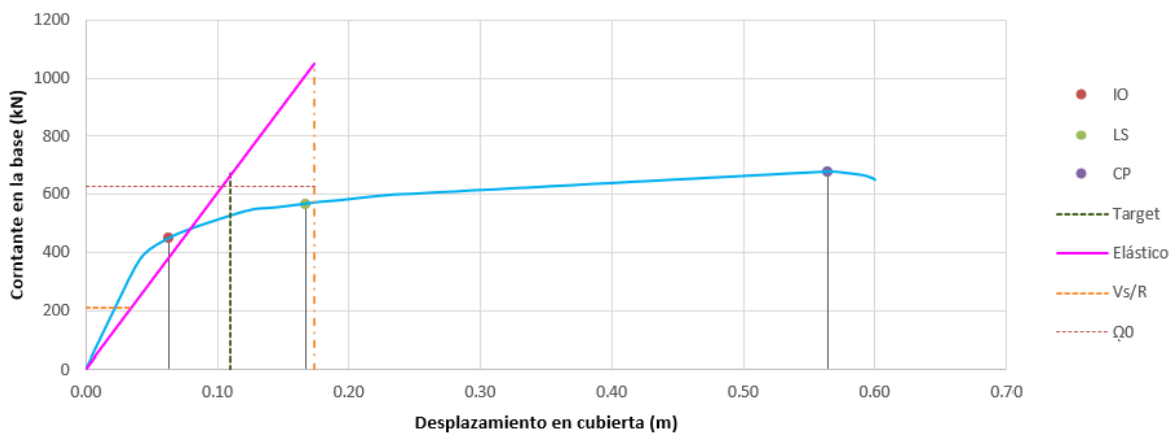


Figura 229. Representación Gráfica Sobrerresistencia, ductilidad, límites de comportamiento, análisis lineal y Curva de Capacidad Final del Análisis Cálculo Pushover Dir. - X - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

Se observa en esta última gráfica que el análisis pushover arrojó para capacidad máxima un cortante de valor 676 toneladas, correspondientes a un desplazamiento en cubierta aproximado de 56 cm, el valor de diseño para cortante fue de 210 toneladas y el desplazamiento de fluencia alrededor de 6.2 cm, comparando estos datos se obtiene una sobrerresistencia a colapso respecto a la demanda de diseño de 3.22 y una ductilidad en cuanto a desplazamiento de 9.

Nivel de daño en Rotulas de vigas

NO DAÑO	IO OCUPACION INMEDIATA	LS SEGURIDAD DE VIDA	CP COLAPSO PREVENTIVO
360	66	54	0
75.0%	13.8%	11.3%	0.0%

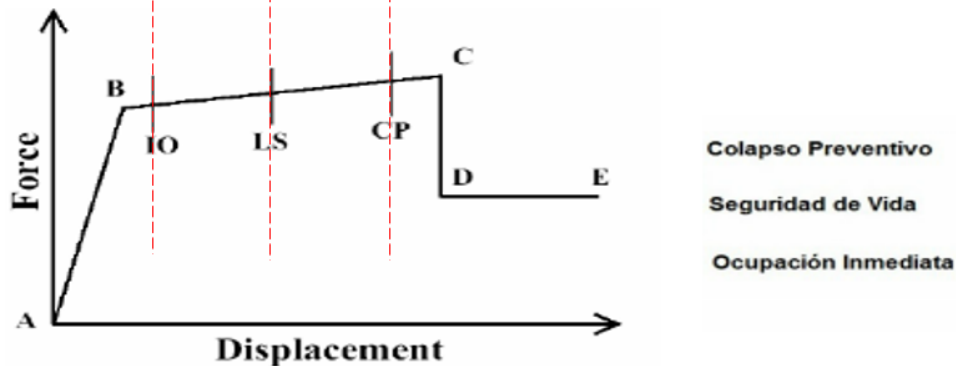


Figura 230. Nivel de daño en vigas para el desplazamiento $1.5\delta_t$, Cálculo Pushover Dir. - X - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

Nivel de daño en Rotulas de columnas

NO DAÑO	IO OCUPACION INMEDIATA	LS SEGURIDAD DE VIDA	CP COLAPSO PREVENTIVO
285	4	12	0
95.0%	1.2%	3.8%	0.0%

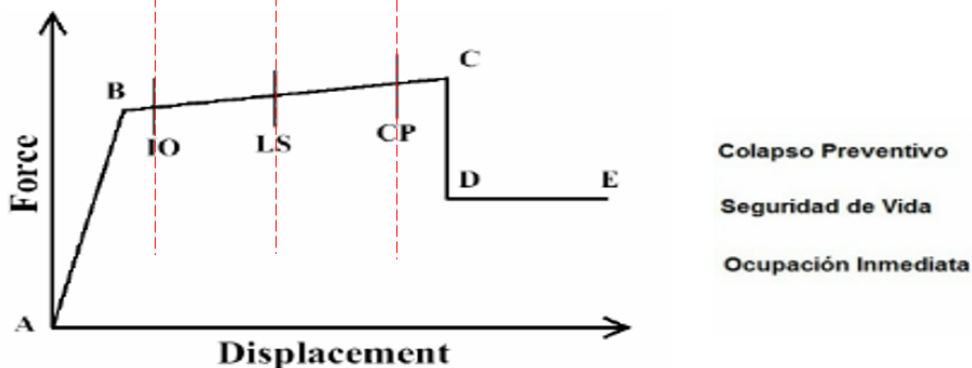


Figura 231. Nivel de daño en columnas para el desplazamiento $1.5\delta_t$, Cálculo Pushover Dir. - X - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

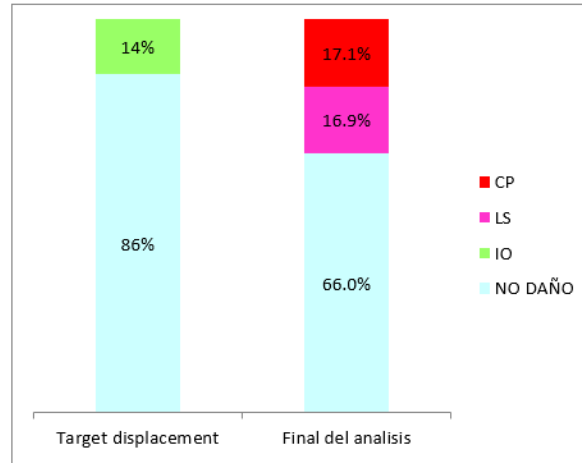


Figura 232. Comparativo nivel de daño en rótulas desplazamiento objetivo vs final del análisis, Cálculo Pushover Dir. - X - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

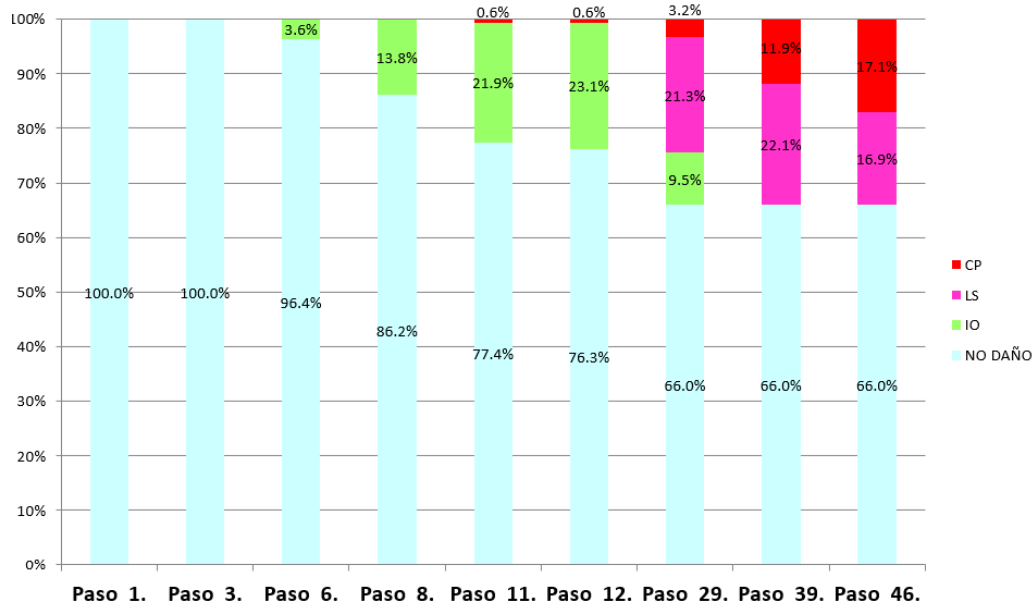


Figura 233. Plastificación progresiva, Cálculo Pushover Dir. - X - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

PUSHOVER SENTIDO X	DERIVAS EN EL TARGET DISPLACEMENT						%
	Alt. piso	δx (m)	δy (m)	$\Delta\alpha$ (cm)	Δp (cm)		
Story6	2.90	0.1932	0.0003	1.15	2.90	OK	0.40
Story5	2.90	0.1816	0.0003	2.38	2.90	OK	0.82
Story4	2.90	0.1579	0.0003	3.74	2.90	NO	1.29
Story3	2.90	0.1205	0.0003	4.65	2.90	NO	1.60
Story2	2.90	0.0740	0.0002	4.52	2.90	NO	1.56
Story1	2.90	0.0287	0.0002	2.87	2.90	OK	0.99
Base	2.90	0.0000	0.0000				

Figura 234. Derivas por piso, Cálculo Pushover Dir. - X - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

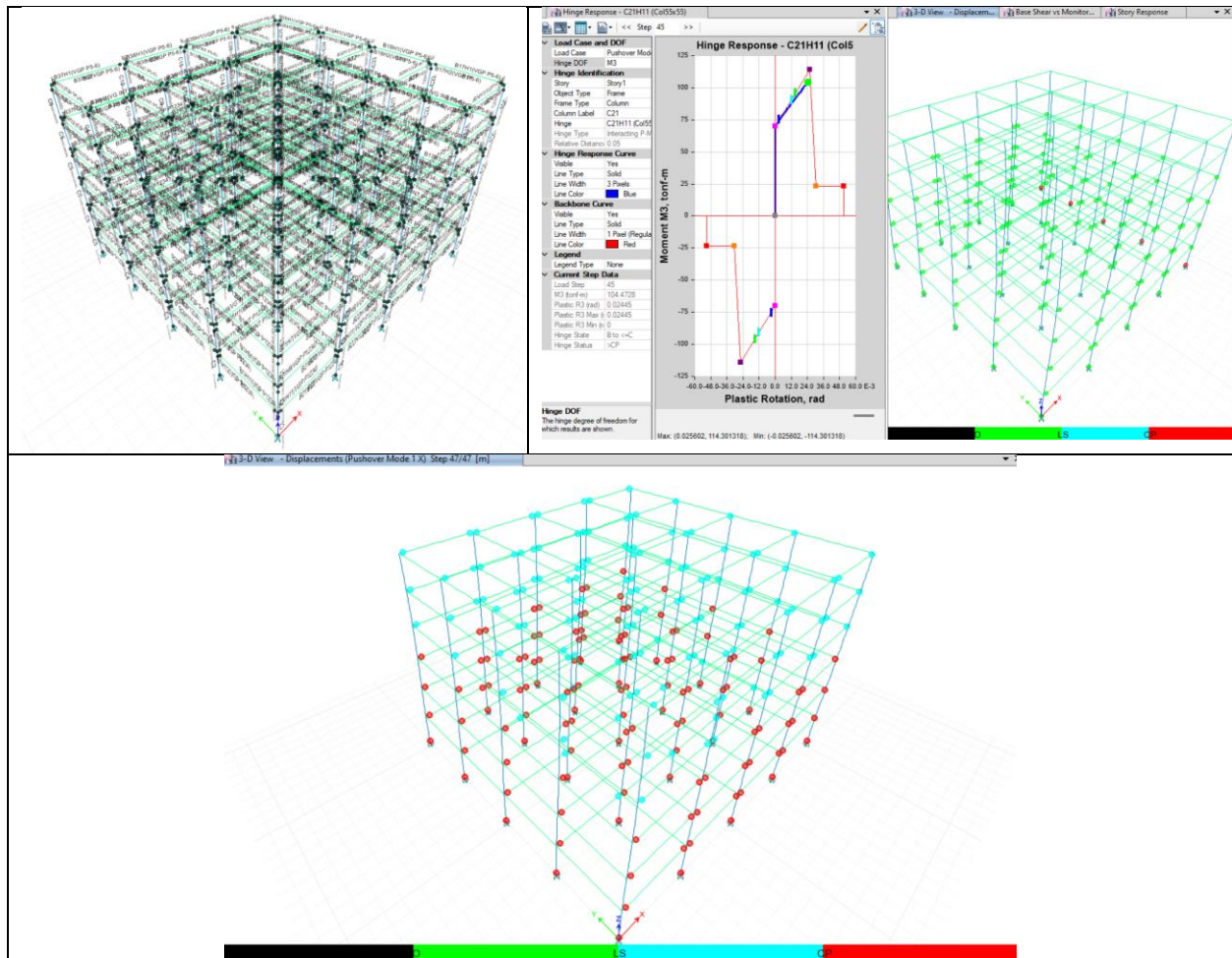


Figura 235. Proceso asignación de rótulas, rótulas tempranas formadas en columnas en nivel CP y rótulas para el desplazamiento de 60 cm al final del análisis, Cálculo Pushover Dir. - X - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

5.5 Desempeño Edificaciones con Base Aislada.

Se realizó el análisis por desempeño de las estructuras con base aislada para ambas microzonas sísmicas usando el método del análisis no lineal dinámico tiempo historia (Software ETABS Fast NonLinear Analysis). Se aplicaron de manera simultánea en ambas direcciones de análisis el 100% de cada par de registros sísmicos escalados, al modelo con base aislada y se asignaron las rótulas plásticas en los elementos estructurales, al final de la aplicación de cada evento se vio la respuesta global, el desplazamiento máximo alcanzado en nivel de cubierta durante la ocurrencia del evento y si hubo o no formación de rótulas.

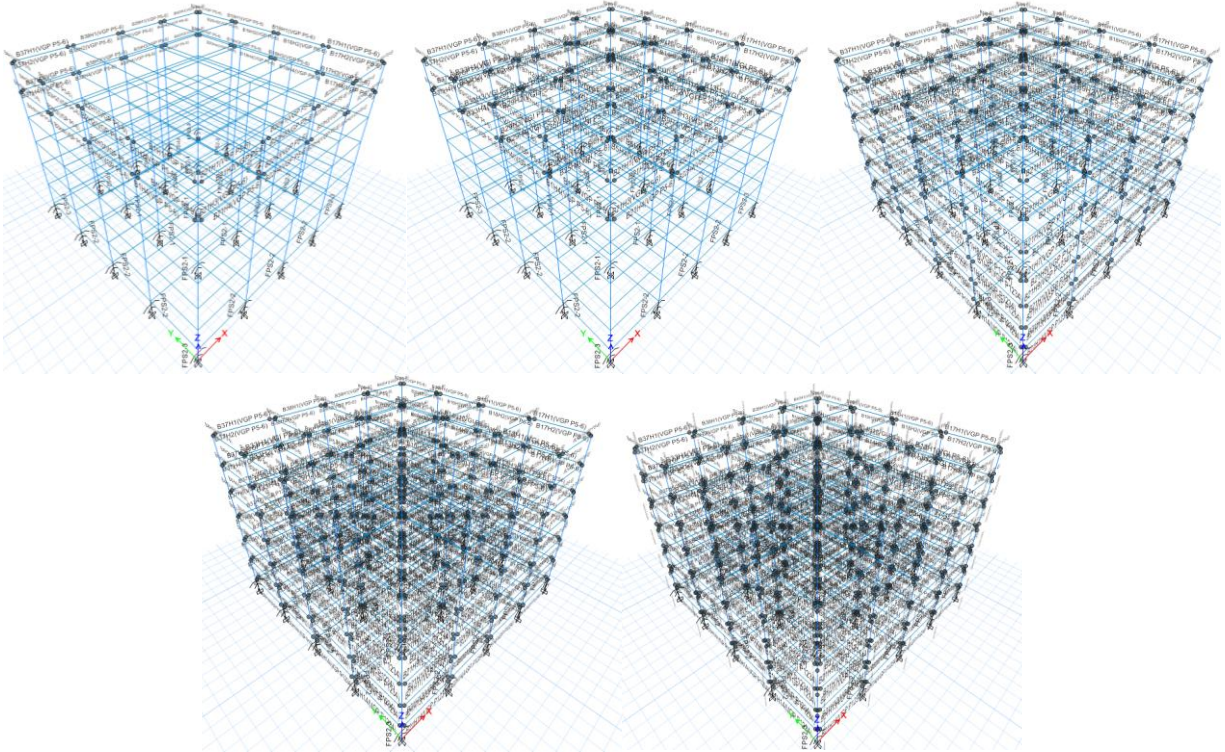
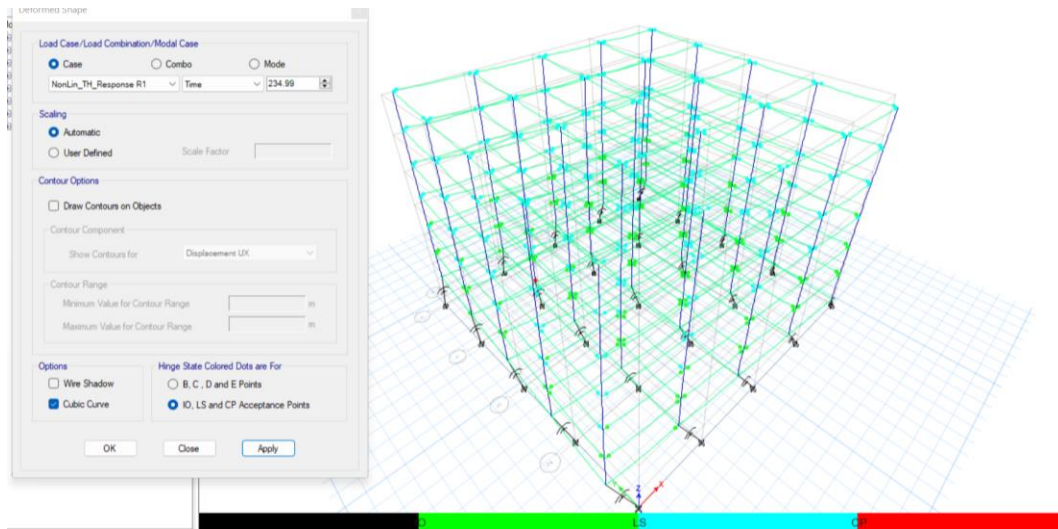


Figura 236. Proceso asignación de rótulas THNLA - Microzona Piedemonte C y Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

Microzona Piedemonte C.

A continuación, se presentan los resultados de la aplicación de cada par de registros sísmicos al modelo aislado DFP.



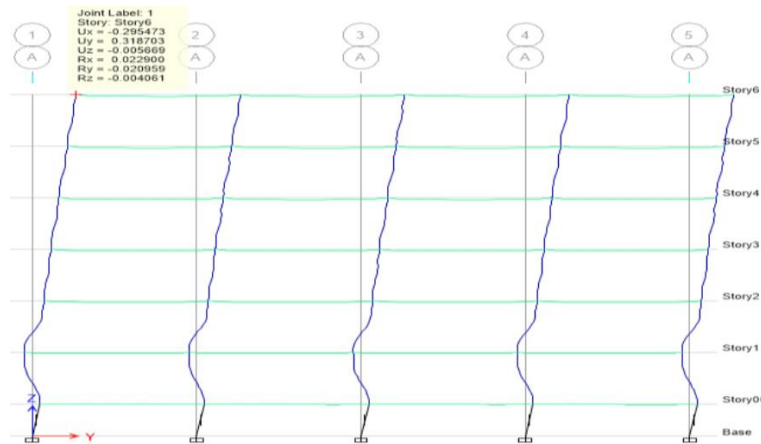


Figura 237. Rótulas generadas al final del análisis THNLA - R1(arriba); Desplazamiento en cubierta $U_{x_{max}} = 26.7$ cm, $U_{y_{max}} = 31.8$ cm (abajo) - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

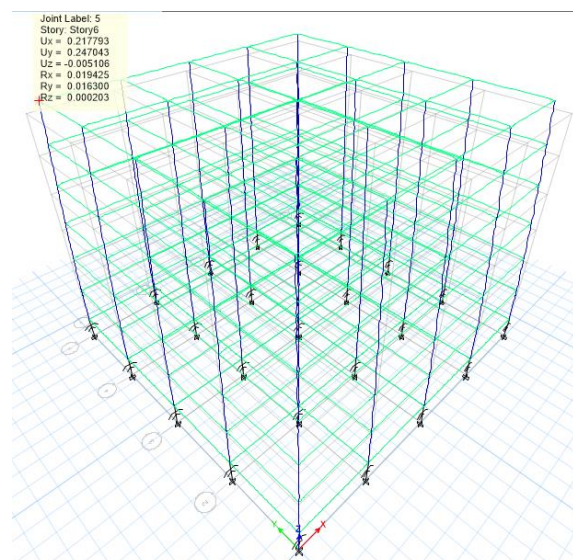
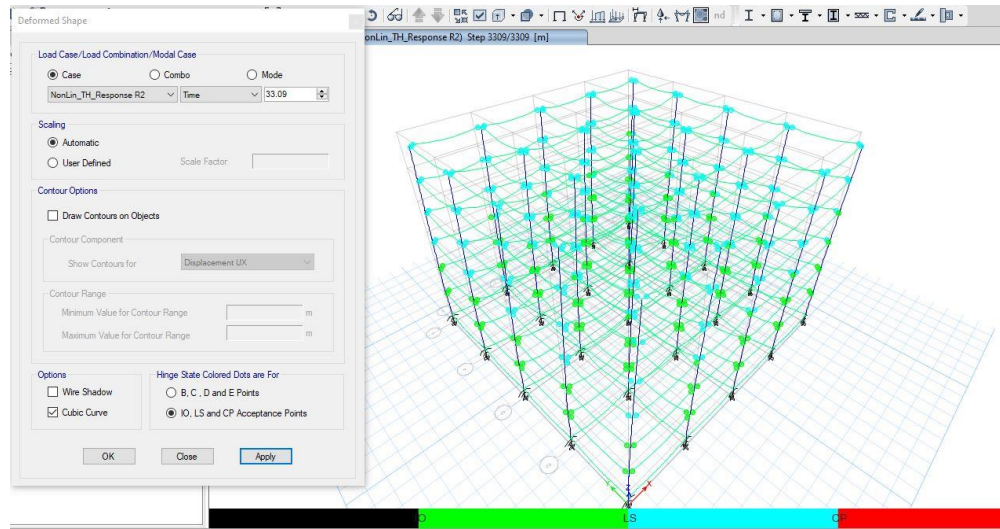


Figura 238. Rótulas generadas al final del análisis THNLA – R2 (arriba); Desplazamiento en cubierta $U_{x_{max}} = 21.8$ cm, $U_{y_{max}} = 24.7$ cm (abajo) - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

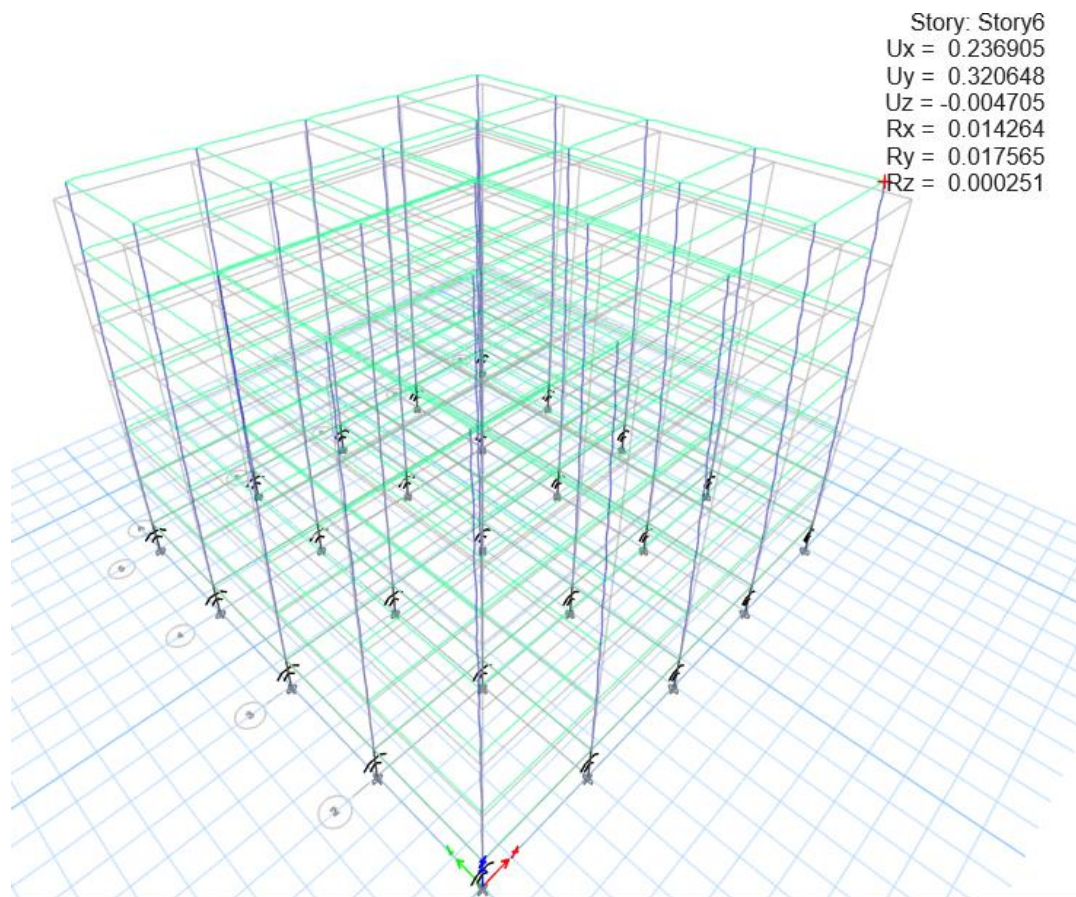
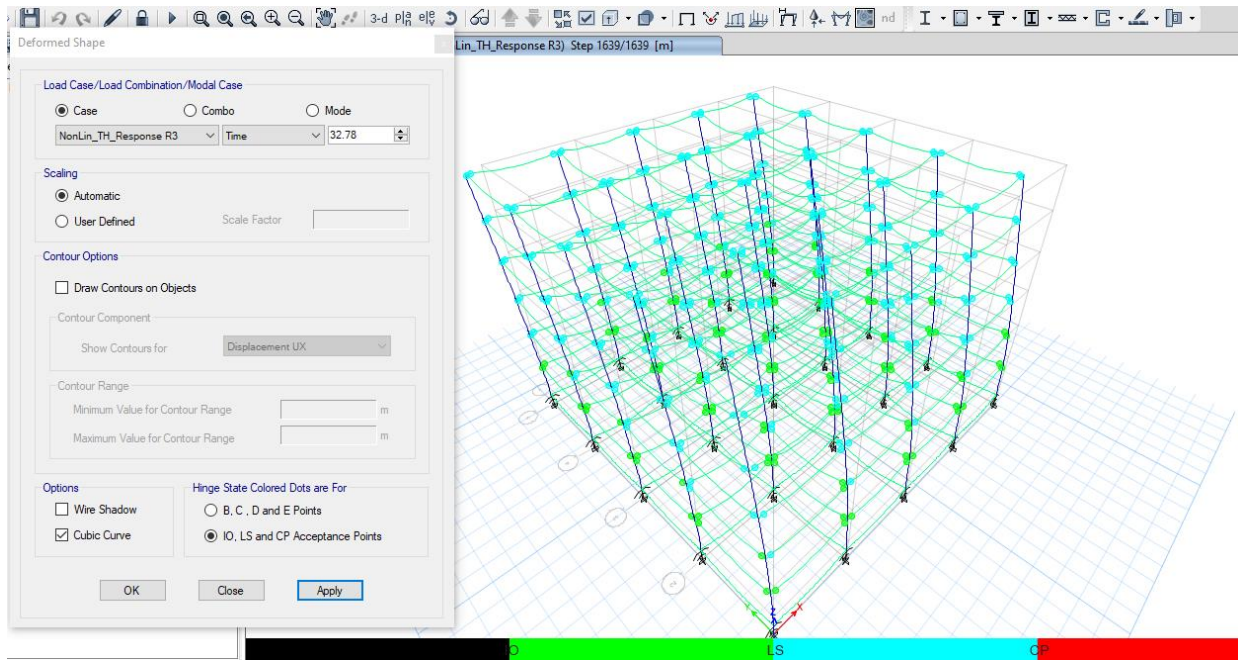


Figura 239. Rótulas generadas al final del análisis THNLA – R3 (arriba); Desplazamiento en cubierta $U_{x_{max}} = 23.7$ cm, $U_{y_{max}} = 32.1$ cm (abajo) - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

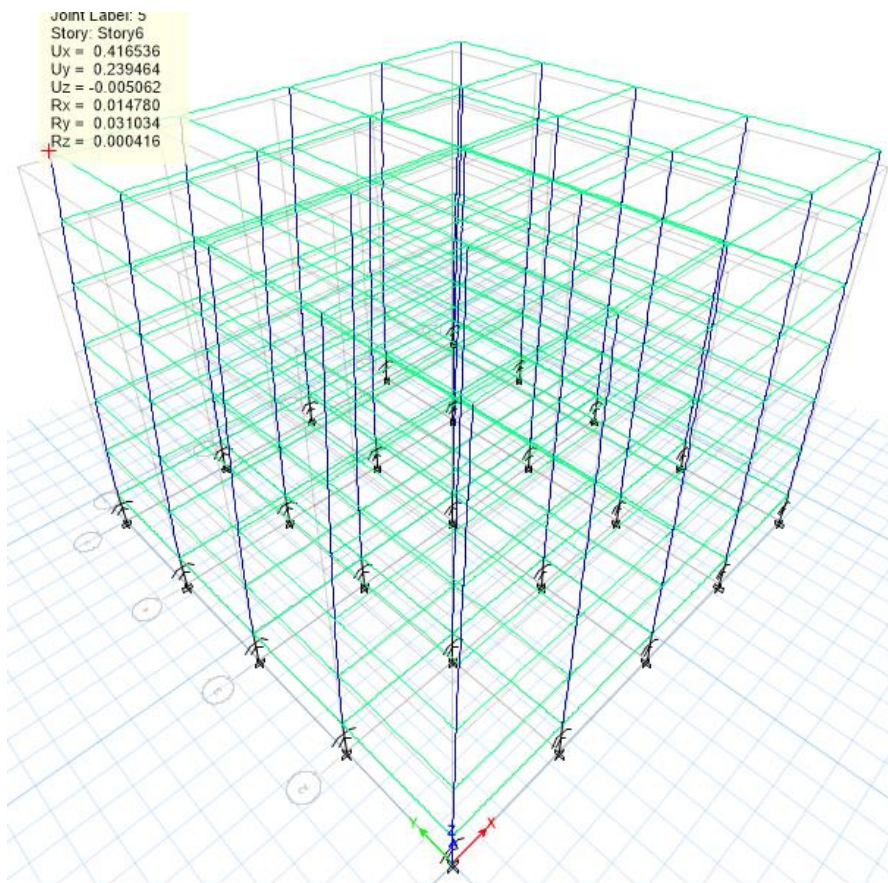
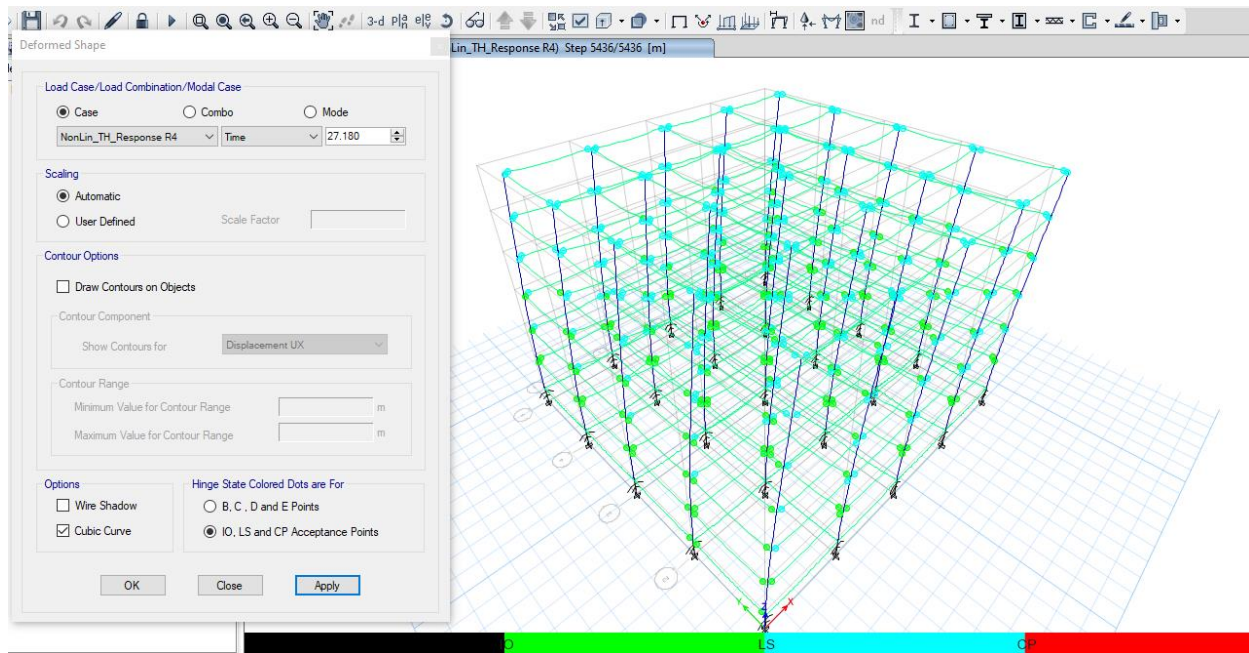


Figura 240. Rótulas generadas al final del análisis THNLA – R4(arriba); Desplazamiento en cubierta $U_{x_{max}} = 41.7$ cm, $U_{y_{max}} = 23.9$ cm (abajo) - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

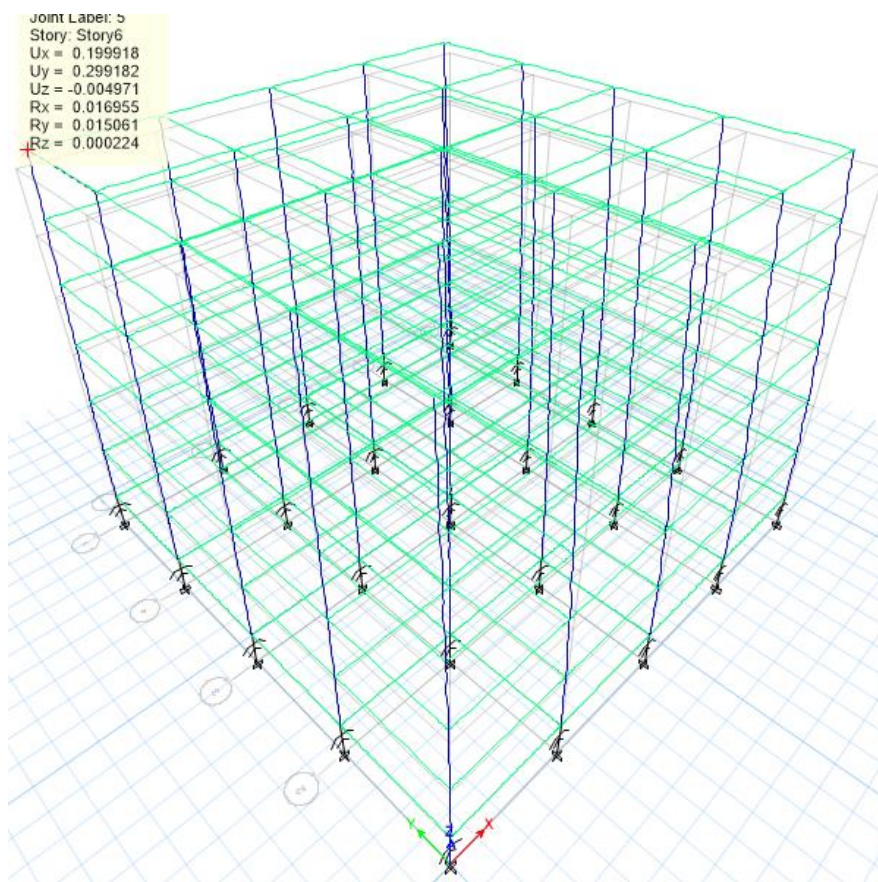
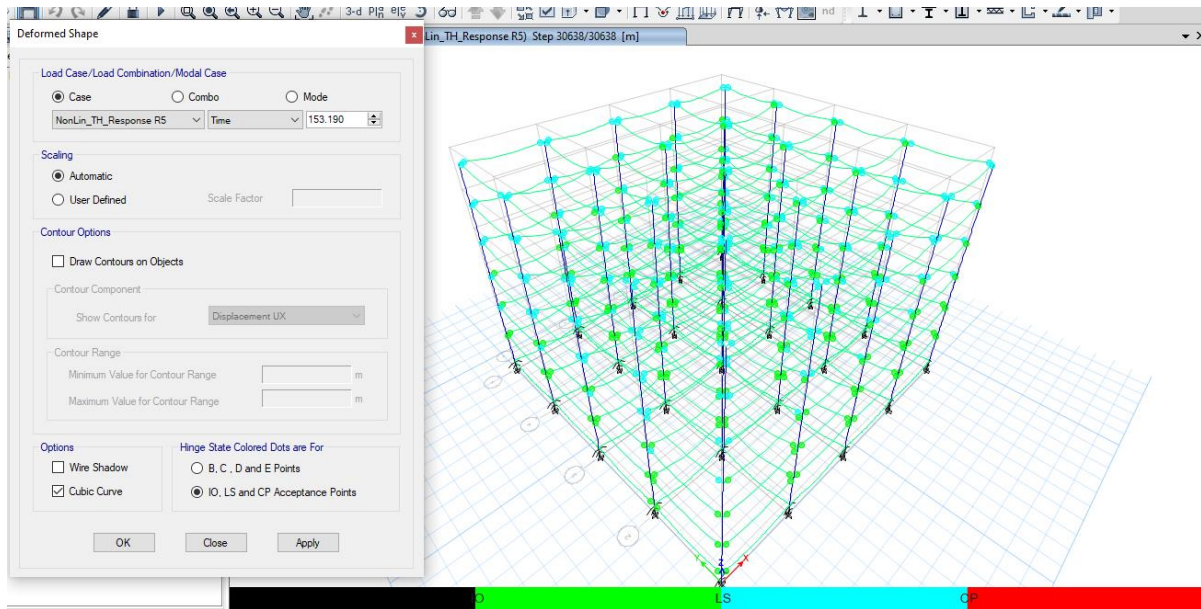


Figura 241. Rótulas generadas al final del análisis THNLA – R5 (arriba); Desplazamiento en cubierta $U_{x_{max}} = 20$ cm, $U_{y_{max}} = 29.9$ cm (abajo) - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

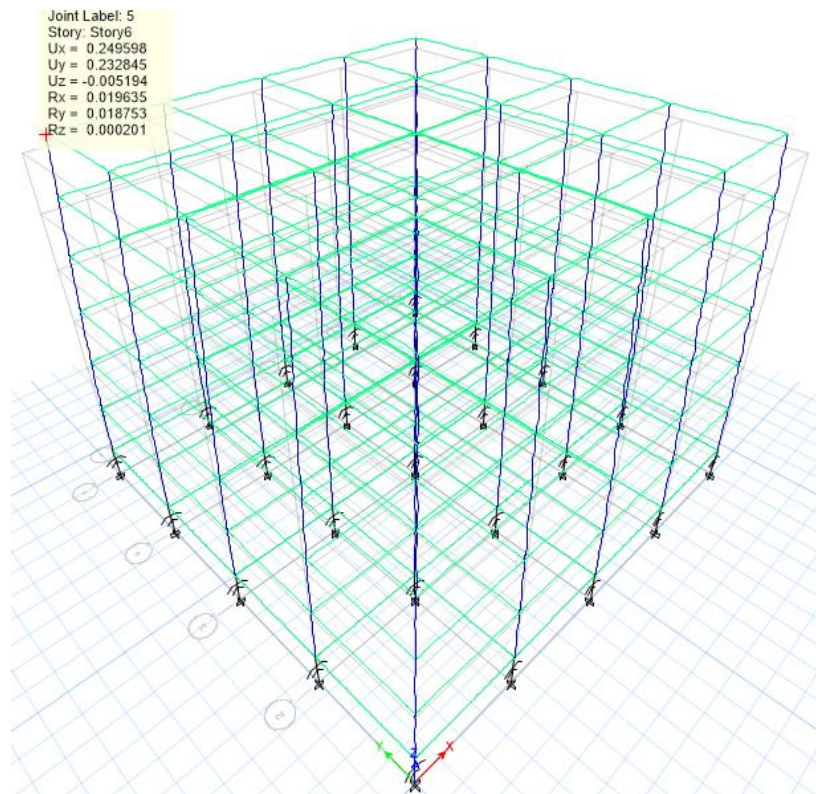
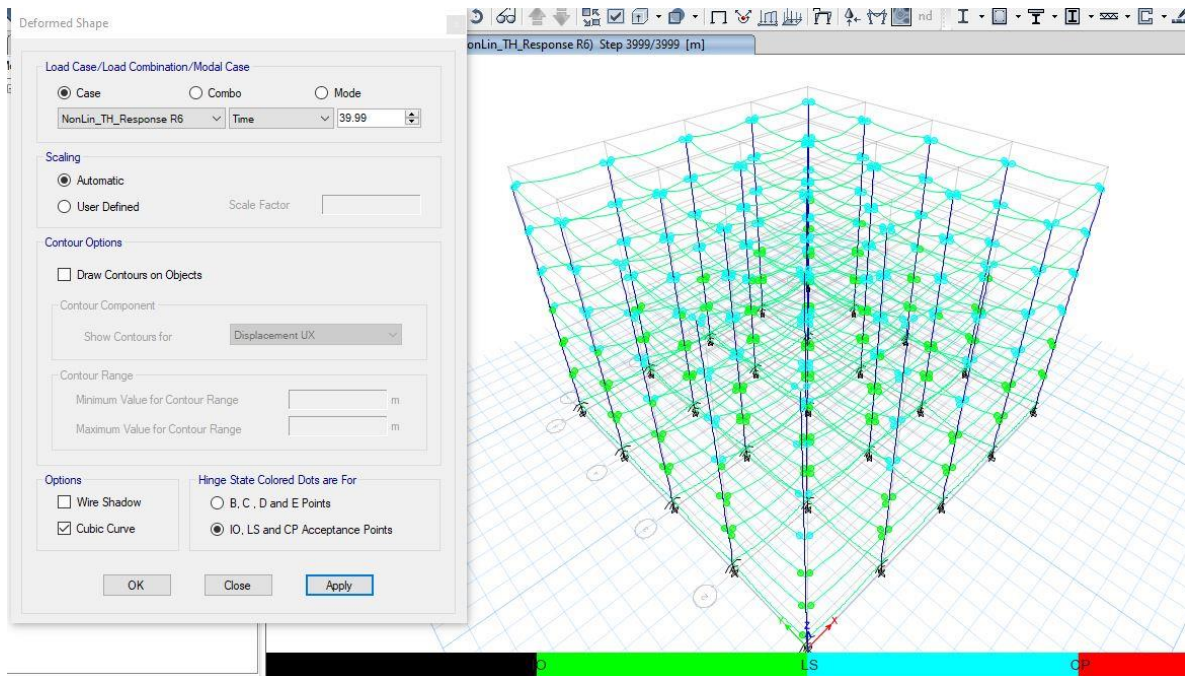


Figura 242. Rótulas generadas al final del análisis THNLA – R6 (arriba); Desplazamiento en cubierta $U_{x_{max}} = 25$ cm, $U_{y_{max}} = 23.2$ cm (abajo) - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

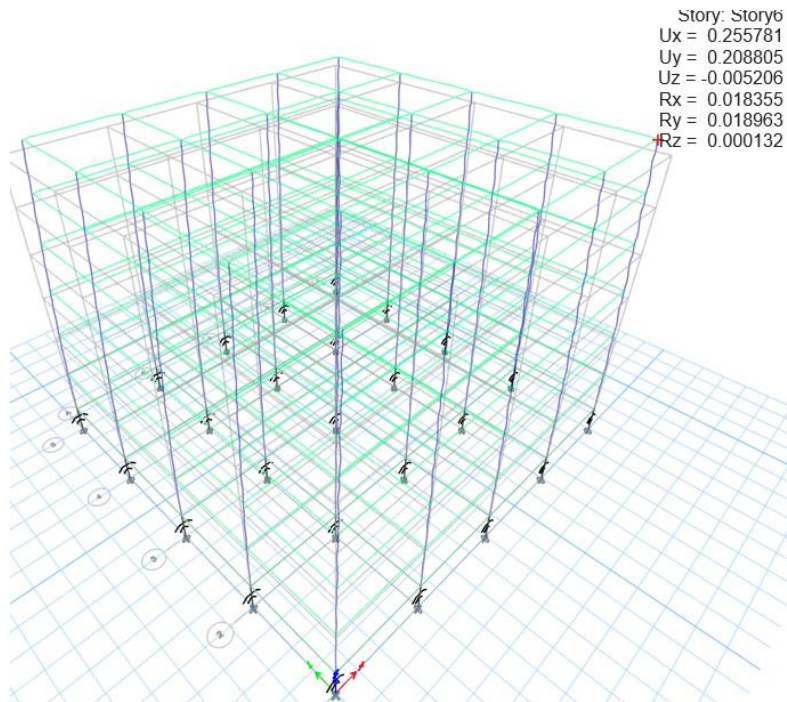
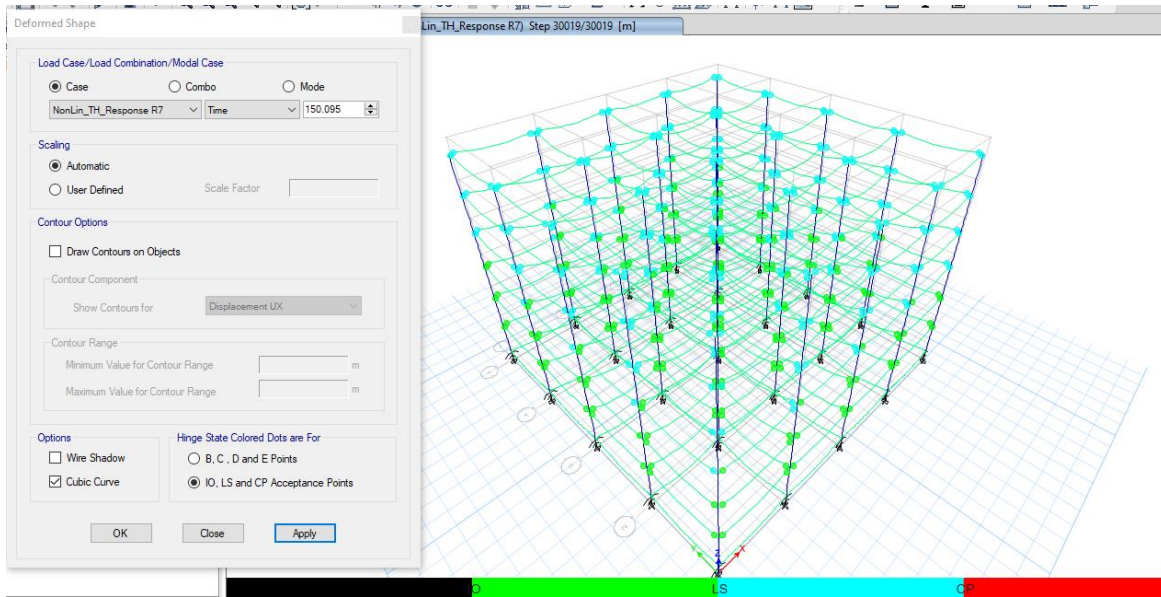
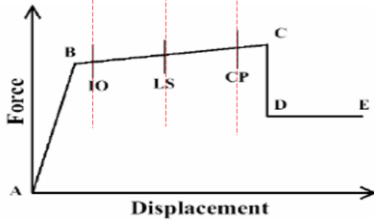


Figura 243. Rótulas generadas al final del análisis THNLA – R7 (arriba); Desplazamiento en cubierta $U_{x_{max}} = 25.6$ cm, $U_{y_{max}} = 20.9$ cm (abajo) - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

En cuanto a la formación de rótulas y sus estados de desempeño al finalizar la aplicación de cada registro y consolidando sus resultados obtenemos en los elementos estructurales, los niveles mostrados a continuación.

Nivel de daño en Rotulas de vigas

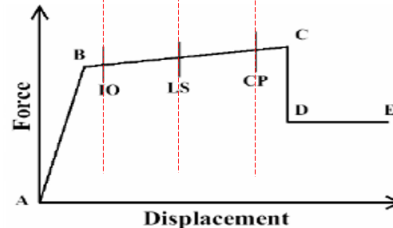
NO DAÑO	IO OCUPACION INMEDIATA	LS SEGURIDAD DE VIDA	CP COLAPSO PREVENTIVO
560	0	0	0
100.0%	0.0%	0.0%	0.0%



Colapso Preventivo
Seguridad de Vida
Ocupación Inmediata

Nivel de daño en Rotulas de columnas

NO DAÑO	IO OCUPACION INMEDIATA	LS SEGURIDAD DE VIDA	CP COLAPSO PREVENTIVO
300	0	0	0
99.98%	0.0%	0.02%	0.0%



Colapso Preventivo
Seguridad de Vida
Ocupación Inmediata

Figura 244. Consolidado Rótulas generadas al final del análisis THNLA – R1 - R7 en Vigas (izquierda); en Columnas (derecha) – Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

Microzona Lacustre 200.

A continuación, se presentan los resultados de la aplicación de cada par de registros sísmicos al modelo aislado DFP.

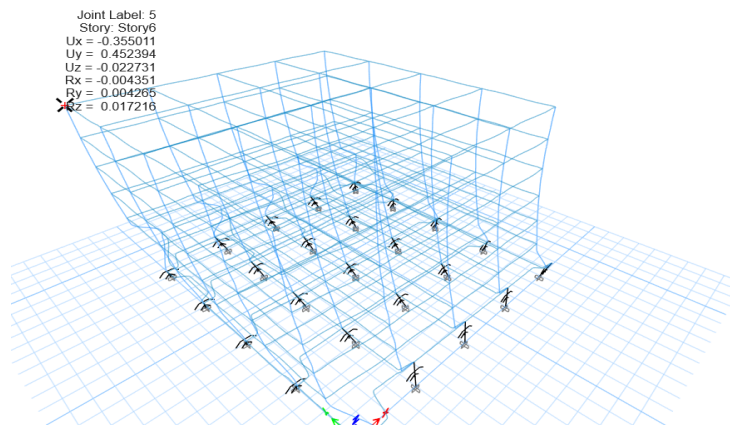
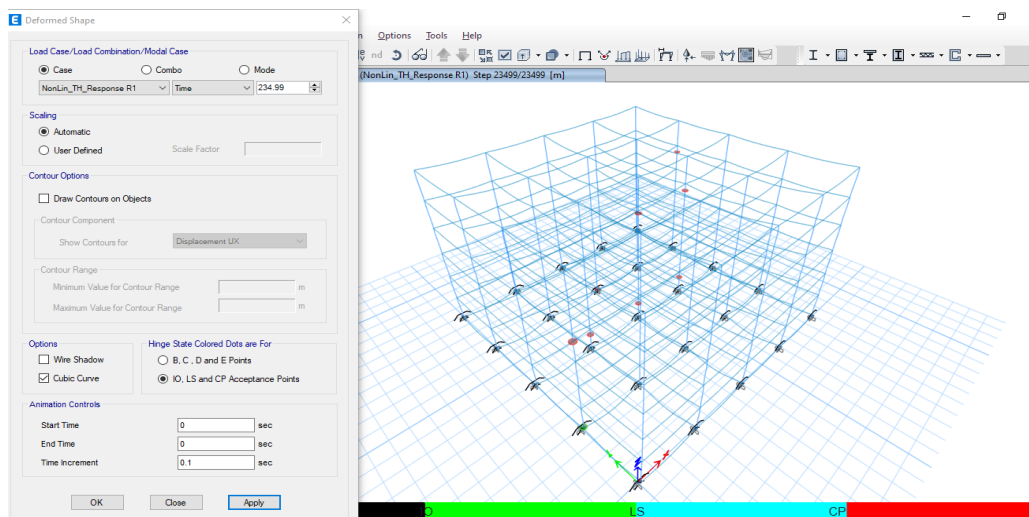


Figura 245. Rótulas generadas al final del análisis THNLA - R1(arriba); Desplazamiento en cubierta $U_{x_{max}} = 35.5$ cm, $U_{y_{max}} = 45.2$ cm (abajo) - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

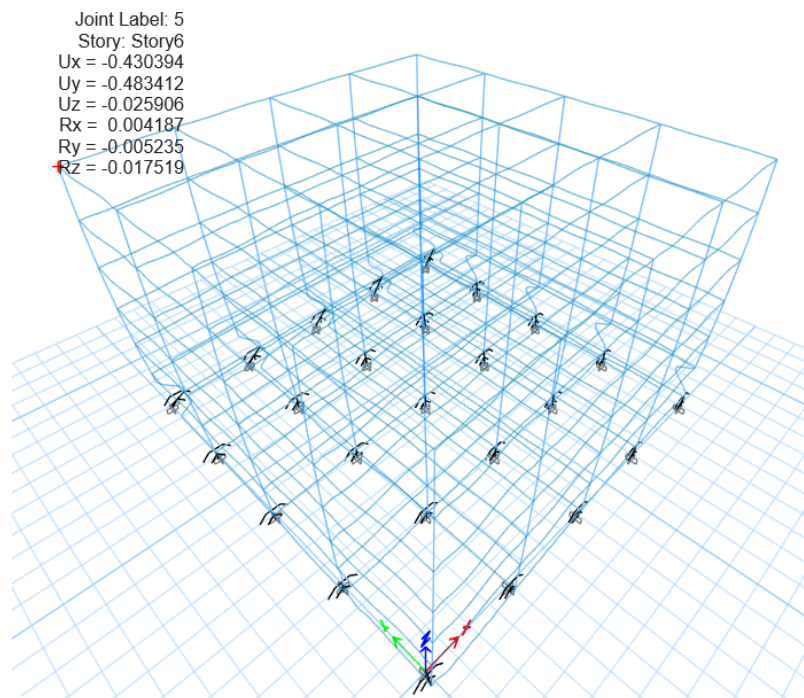
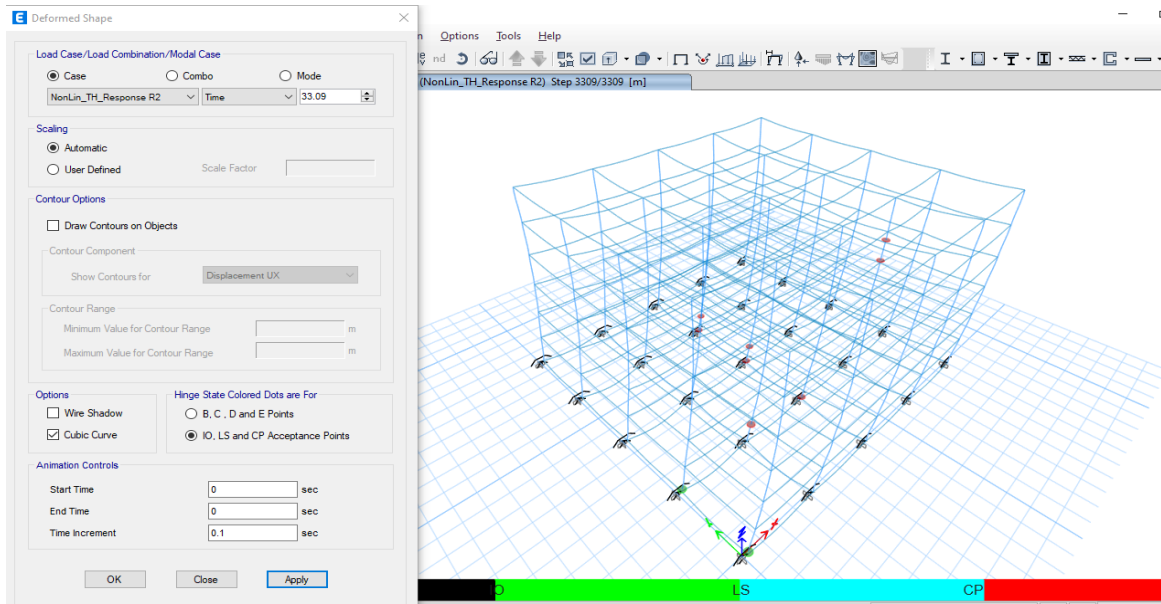
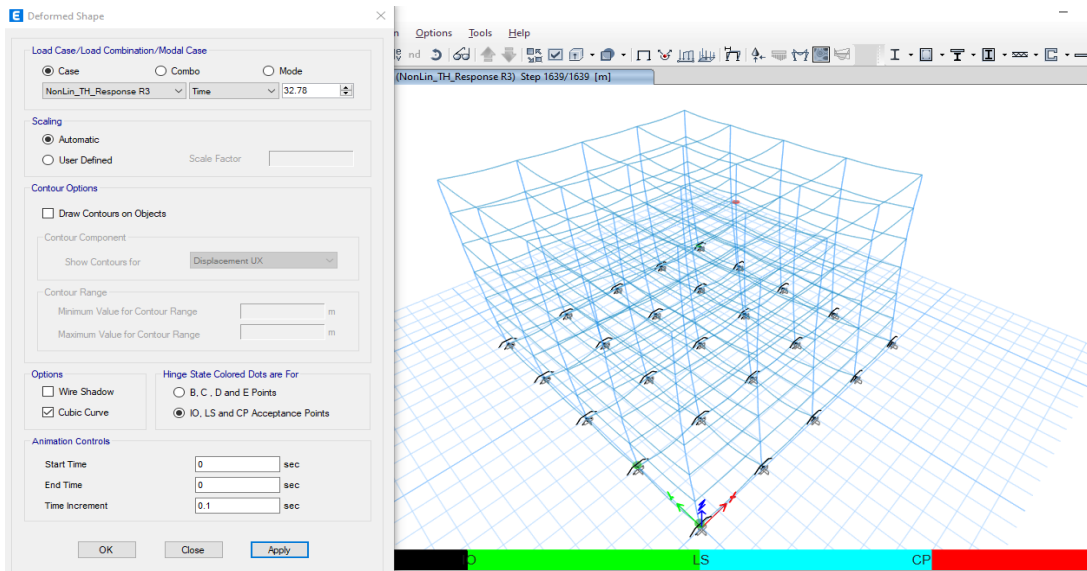


Figura 246. Rótulas generadas al final del análisis THNLA – R2 (arriba); Desplazamiento en cubierta $U_{x_{max}} = 43.0$ cm, $U_{y_{max}} = 48.3$ cm (abajo) - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.



Story: Story6
 Ux = -0.451366
 Uy = 0.605824
 Uz = -0.023246
 Rx = 0.002942
 Ry = 0.005159
 Rz = -0.026570

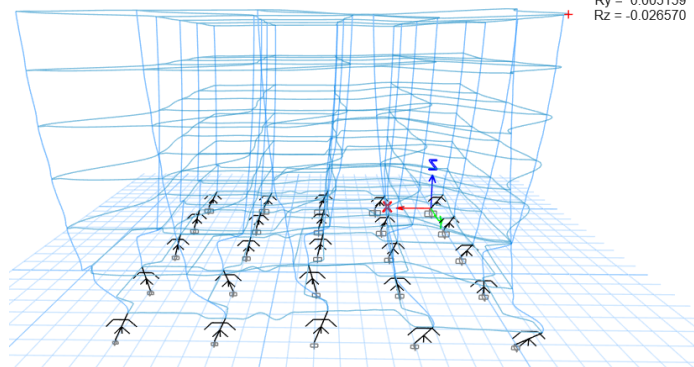
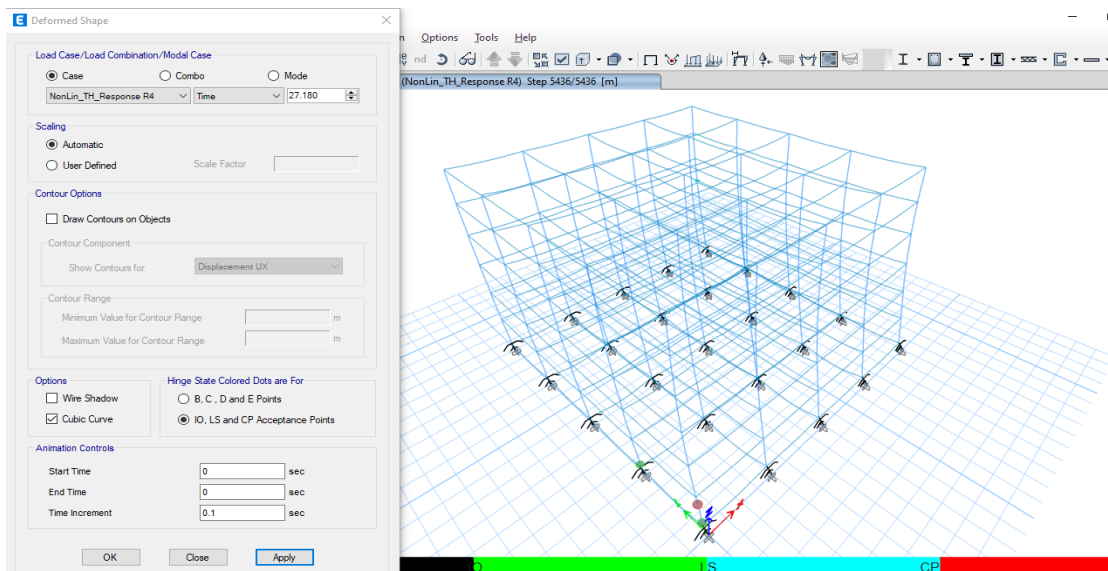


Figura 247. Rótulas generadas al final del análisis THNLA – R3 (arriba); Desplazamiento en cubierta $U_{x_{max}} = 45.1$ cm, $U_{y_{max}} = 60.6$ cm (abajo) - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.



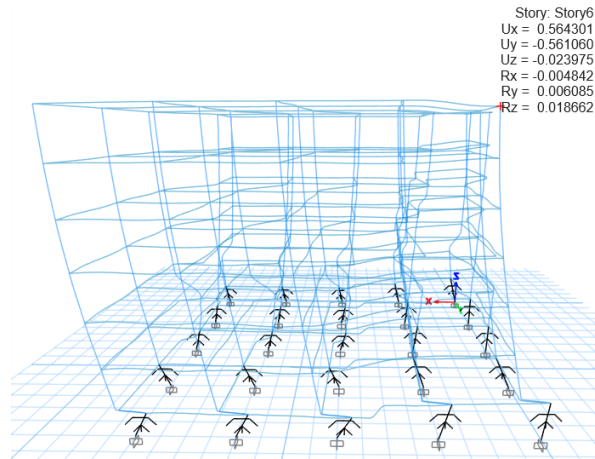


Figura 248. Rótulas generadas al final del análisis THNLA – R4(arriba); Desplazamiento en cubierta $U_{x_{max}} = 56.4$ cm, $U_{y_{max}} = 56.1$ cm (abajo) - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

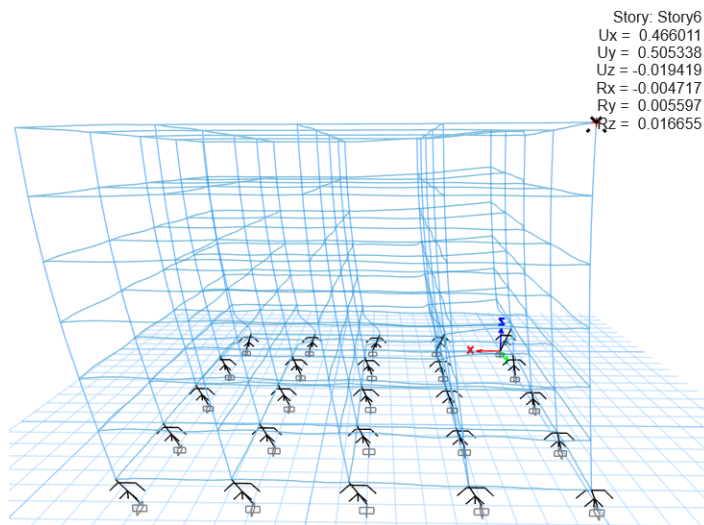
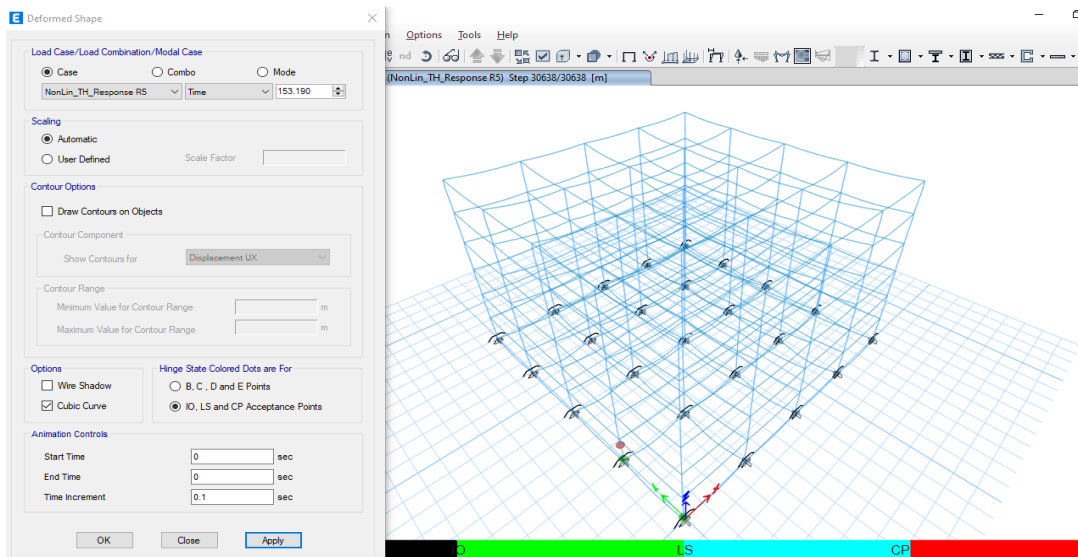


Figura 249. Rótulas generadas al final del análisis THNLA – R5 (arriba); Desplazamiento en cubierta $U_{x_{max}} = 46.6$ cm, $U_{y_{max}} = 50.5$ cm (abajo) - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

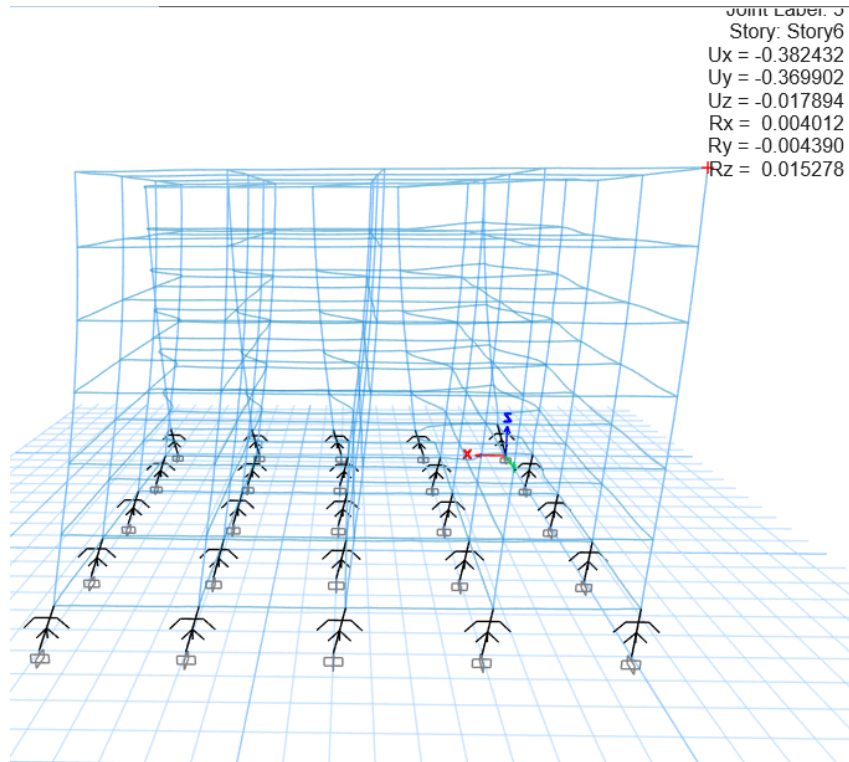
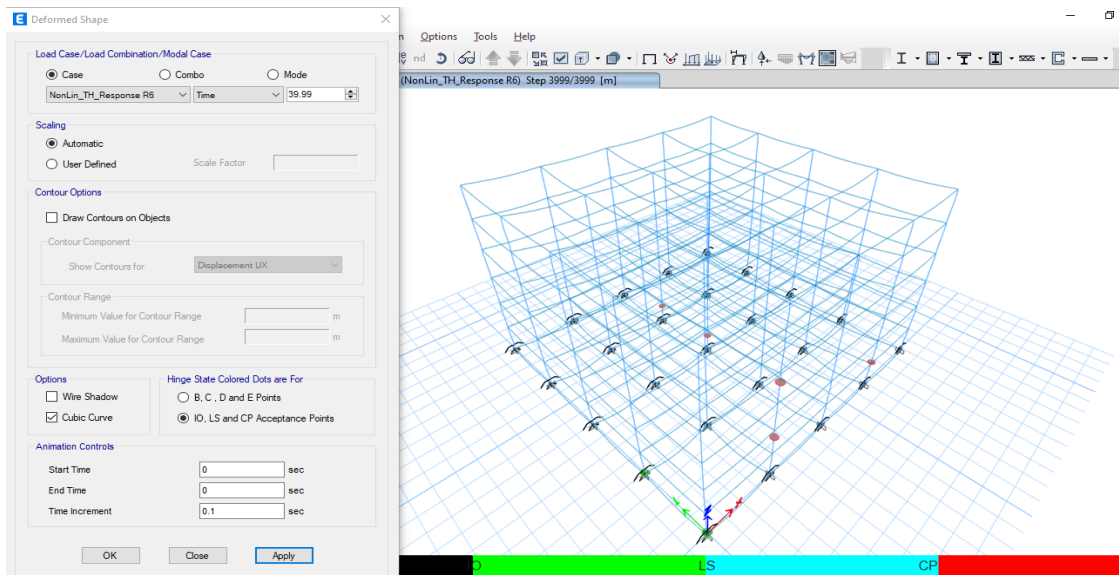


Figura 250. Rótulas generadas al final del análisis THNLA – R6 (arriba); Desplazamiento en cubierta $U_{x_{max}} = 38.2$ cm, $U_{y_{max}} = 37.0$ cm (abajo) - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

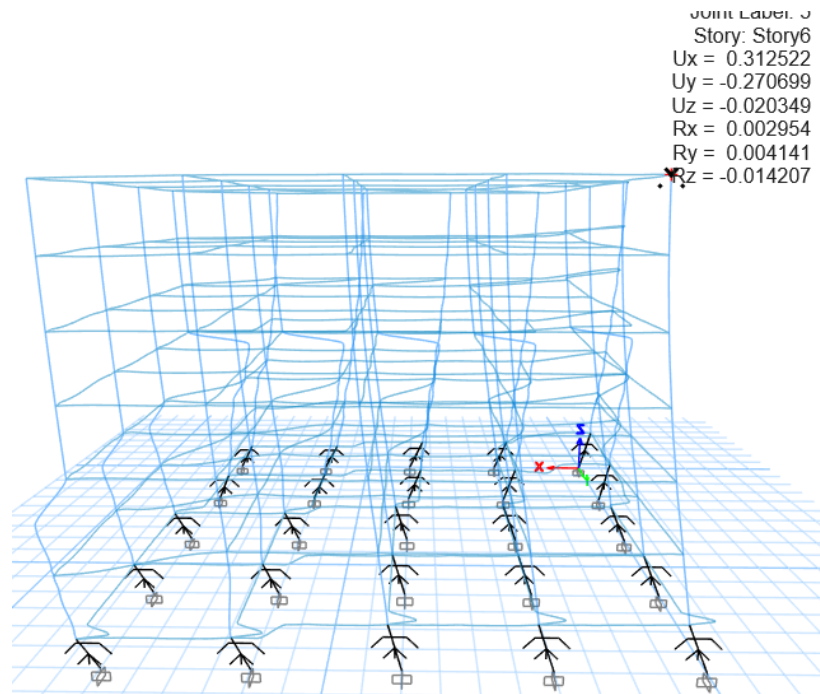
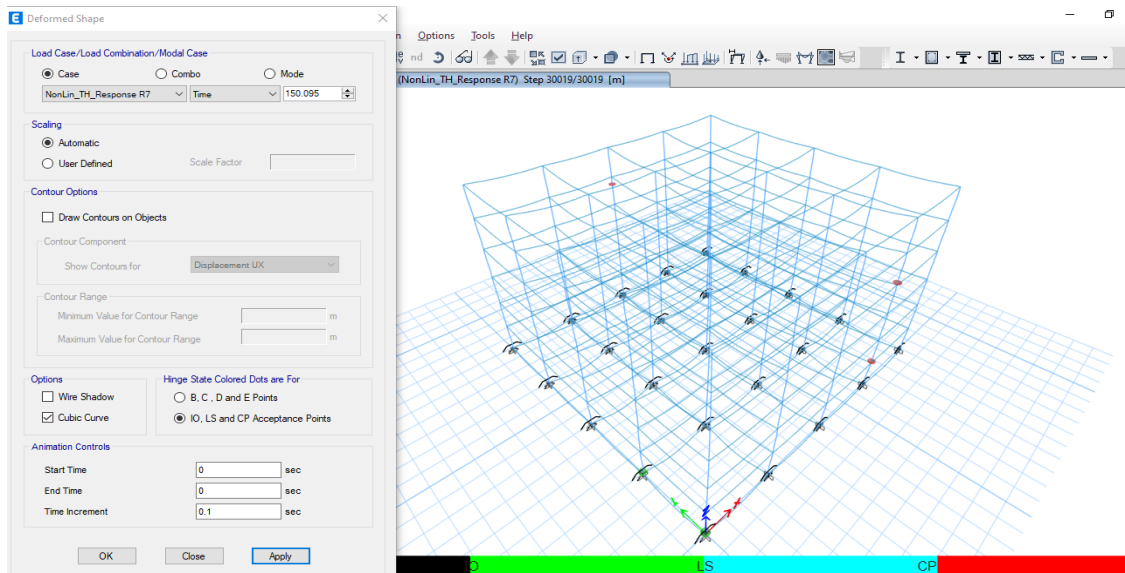
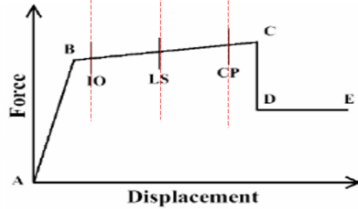


Figura 251. Rótulas generadas al final del análisis THNLA – R7 (arriba); Desplazamiento en cubierta $U_{x_{max}} = 31.3$ cm, $U_{y_{max}} = 27.1$ cm (abajo) - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

En cuanto a la formación de rótulas y sus estados de desempeño al finalizar la aplicación de cada registro y consolidando sus resultados obtenemos en los elementos estructurales, los niveles mostrados a continuación.

Nivel de daño en Rotulas de vigas

NO DAÑO	IO OCUPACION INMEDIATA	LS SEGURIDAD DE VIDA	CP COLAPSO PREVENTIVO
560	0	0	0
100.0%	0.0%	0.0%	0.0%



Nivel de daño en Rotulas de columnas

NO DAÑO	IO OCUPACION INMEDIATA	LS SEGURIDAD DE VIDA	CP COLAPSO PREVENTIVO
296	1	0	3
98.5%	0.3%	0.0%	1.1%

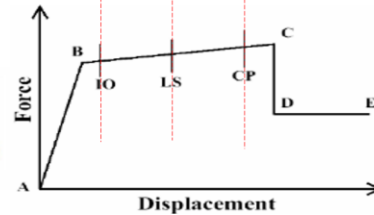


Figura 252. Consolidado Rótulas generadas al final del análisis THNLA – R1 - R7 en Vigas (izquierda); en Columnas (derecha) – Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

Se observa que las vigas no presentaron daños en sus rótulas no alcanzaron a desarrollarse para ninguno de los movimientos del terreno aplicados, las columnas presentaron rótulas en el nivel $>CP$, quiere decir que colapsan para ciertas condiciones de movimientos del terreno, lo cual no es aceptable, aunque se presente en una mínima proporción. De todos modos, se aclara que se está comprobando el desempeño con el máximo sismo esperado actuando simultáneamente en ambas direcciones ortogonales sobre el modelo matemático. De manera global, alrededor del 99.25% de los elementos estructurales permanecen en el comportamiento o rango lineal, que es lo que se busca al aislar en su base a la estructura.

Registro Sísmico	Formación de Rótulas hasta IO	Formación de Rótulas $>CP$
R1	1	7
R2	3	8
R3	3	1
R4	3	1
R5	1	1
R6	2	5
R7	0	3

Tabla 55. Formación de Rótulas Plásticas Consolidado R1-R7 – Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia.

En cuanto a las derivas de los modelos aislados generadas durante la verificación del desempeño, se estableció que para la Microzona Piedemonte C se sobrepasa ligeramente (1.08) el límite por código de 0.020hsx cuando se usa el análisis de historia en el tiempo, mientras que para la Microzona Lacustre 200, las derivas pasan el límite normativo hasta en 1.6 veces.

R1 PIEDEMONTE C									SRSS			SRSS		
Piso	Nivel (m)	X-Dir (m)	Y-Dir (m)	ΔX (m)	ΔY (m)	$\Delta perm.$ (m)	δx (%)	δy (%)	90% EW	44% NS	δ (%)	44% EW	90% NS	δ (%)
Story6	19.2	0.2402	0.3187	0.0491	0.0628	0.058	0.85	1.08	0.2162	0.1402	0.90	0.1057	0.2868	1.04
Story5	16.3	0.1911	0.2559	0.0481	0.0617	0.058	0.83	1.06	0.1720	0.1126	0.88	0.0841	0.2304	1.03
Story4	13.4	0.1430	0.1942	0.0451	0.0583	0.058	0.78	1.01	0.1287	0.0855	0.83	0.0629	0.1748	0.97
Story3	10.5	0.0978	0.1359	0.0392	0.0510	0.058	0.68	0.88	0.0881	0.0598	0.72	0.0431	0.1223	0.85
Story2	7.6	0.0586	0.0849	0.0295	0.0386	0.058	0.51	0.67	0.0528	0.0374	0.54	0.0258	0.0764	0.64
Story1	4.7	0.0292	0.0463	0.0029	0.0118	0.058	0.05	0.20	0.0262	0.0204	0.10	0.0128	0.0417	0.18
Story0 0	1.8	0.0321	0.0581	0.0321	0.0581	0.058			0.0289	0.0256		0.0141	0.0523	
Base	0	0.0000	0.0000						0.0000	0.0000				

Tabla 56. Cálculo de derivas en el modelo aislado por análisis de desempeño para el registro R1 – Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia.

R4 LACUSTRE 200									SRSS			SRSS		
Piso	Nivel (m)	X-Dir (m)	Y-Dir (m)	ΔX (m)	ΔY (m)	$\Delta perm.$ (m)	δx (%)	δy (%)	90% EW	44% NS	δ (%)	44% EW	90% NS	δ (%)
Story6	19.2	0.5643	0.5375	0.0237	0.0196	0.058	0.41	0.34	0.5079	0.2365	0.40	0.2483	0.4838	0.35
Story5	16.3	0.5406	0.5179	0.0404	0.0338	0.058	0.70	0.58	0.4865	0.2279	0.68	0.2378	0.4661	0.61
Story4	13.4	0.5002	0.4841	0.0591	0.0497	0.058	1.02	0.86	0.4502	0.2130	0.99	0.2201	0.4357	0.89
Story3	10.5	0.4411	0.4344	0.0777	0.0655	0.058	1.34	1.13	0.3970	0.1911	1.30	0.1941	0.3909	1.17
Story2	7.6	0.3635	0.3689	0.0936	0.0790	0.058	1.61	1.36	0.3271	0.1623	1.57	0.1599	0.3320	1.42
Story1	4.7	0.2698	0.2899	0.0947	0.0798	0.058	1.63	1.38	0.2428	0.1275	1.59	0.1187	0.2609	1.43
Story0 0	1.8	0.1751	0.2100	0.1751	0.2100	0.058			0.1576	0.0924		0.0771	0.1890	
Base	0	0.0000	0.0000						0.0000	0.0000				

Tabla 57. Cálculo de derivas en el modelo aislado por análisis de desempeño para el registro R4 – Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia.

En las Figuras 253 a 259, se muestran algunas gráficas de los estados de algunas hinged en vigas y columnas para los modelos aislados.

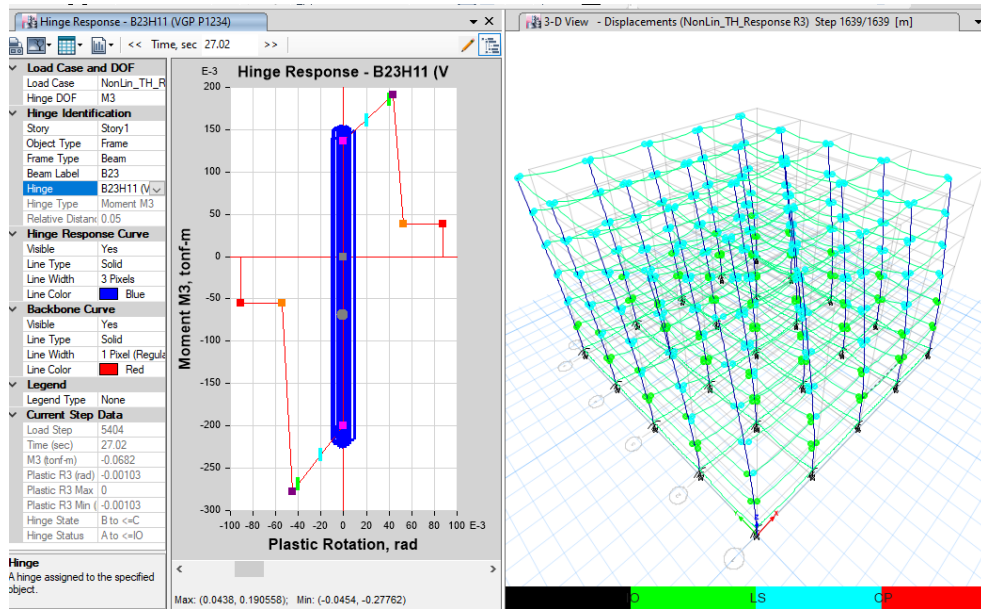


Figura 253. Estado Hinge (Rótula) análisis THNLA – R3 – Viga piso 1 – Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

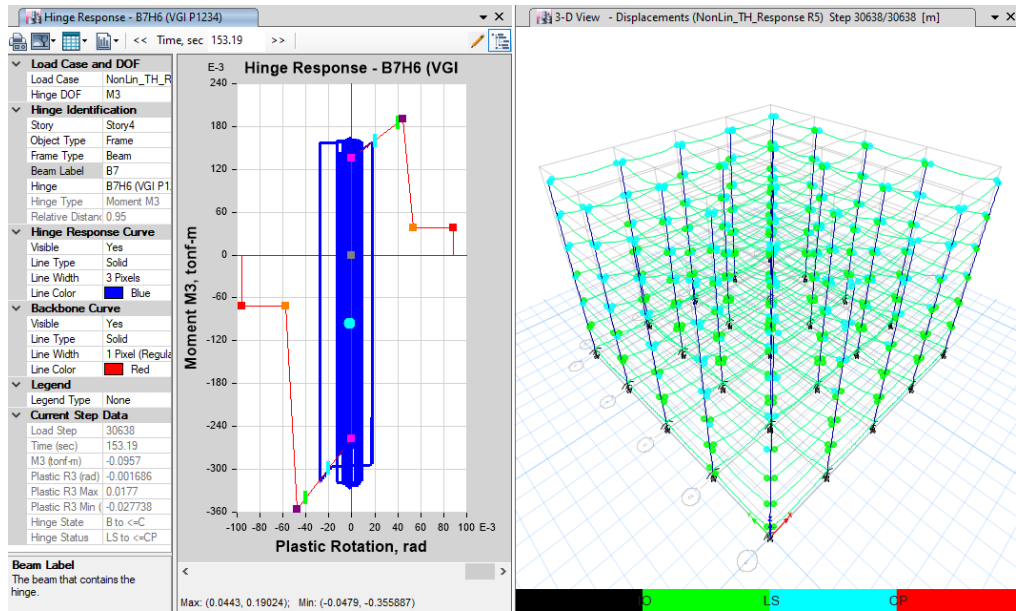


Figura 254. Estado Hinge (Rótula) análisis THNLA – R5 – Viga piso 4 – Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

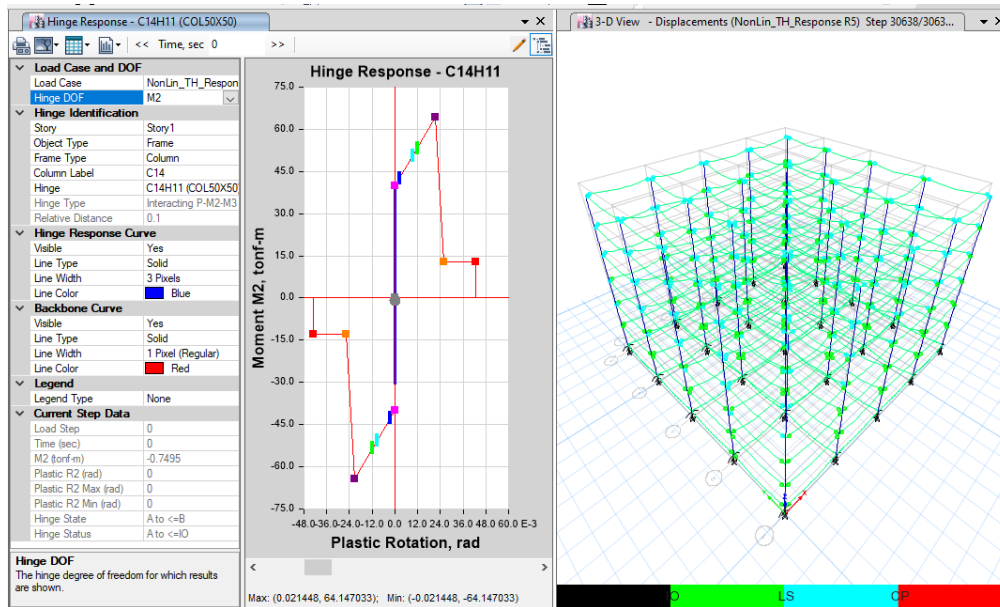


Figura 255. Estado Hinge (Rótula) análisis THNLA – R5 – Columna piso 1 – Microzona Piedemonte C.
Fuente: Propia con análisis en ETABS.

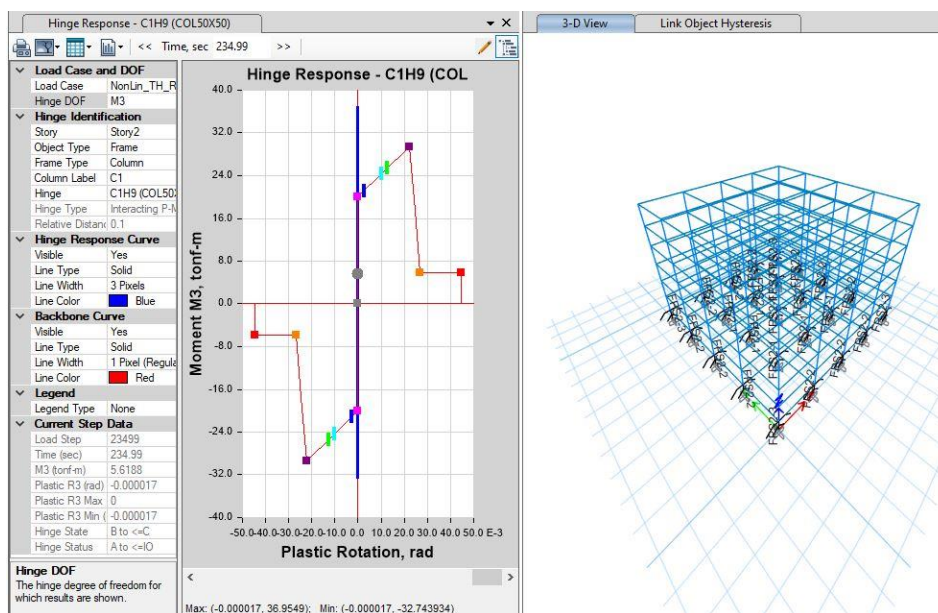


Figura 256. Estado Hinge (Rótula) análisis THNLA – R1 – M3 Columna piso 2 – Microzona Lacustre 200.
Fuente: Propia con análisis en ETABS.

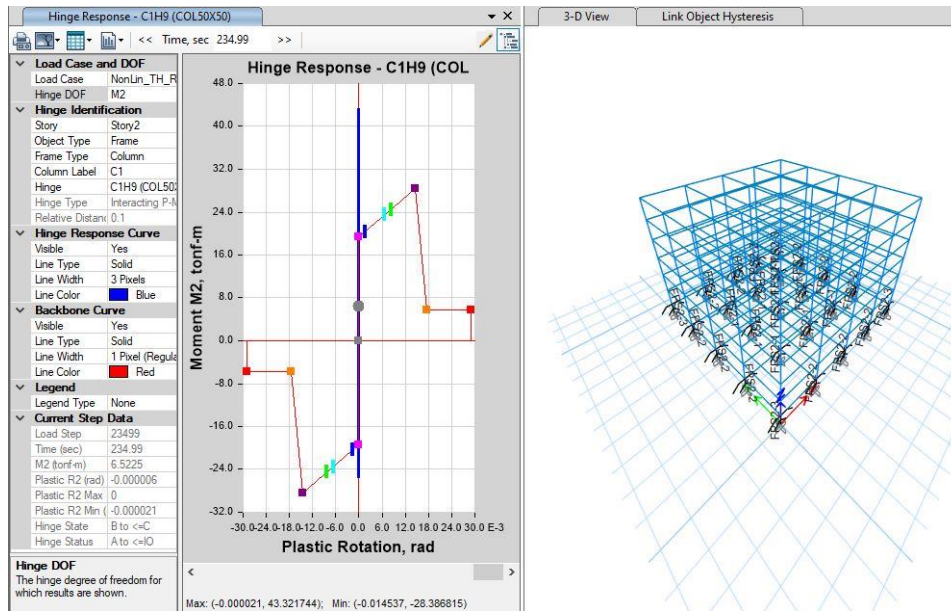


Figura 257. Estado Hinge (Rótula) análisis THNLA – R1 – M2 Columna piso 2 – Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

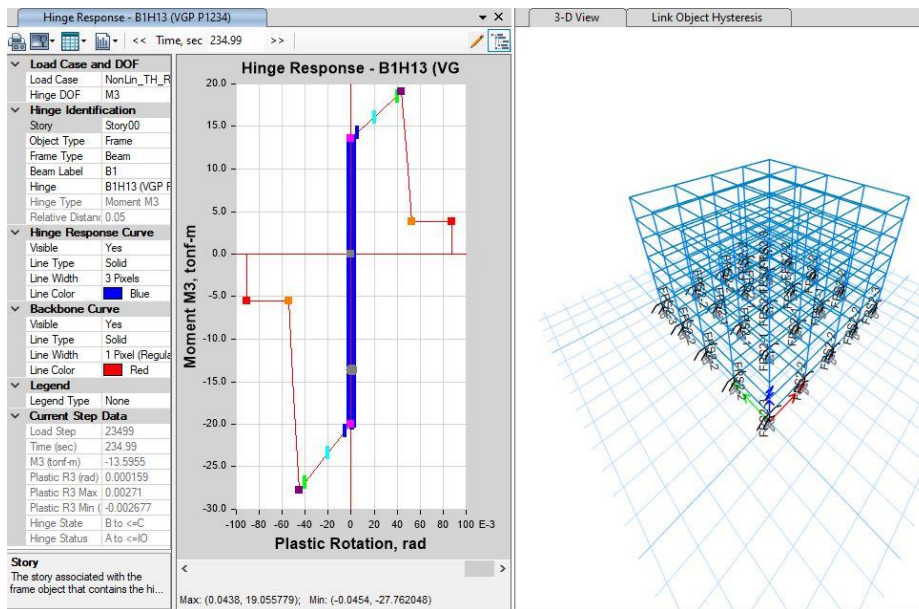


Figura 258. Estado Hinge (Rótula) análisis THNLA – R1 – Viga piso 00 – Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

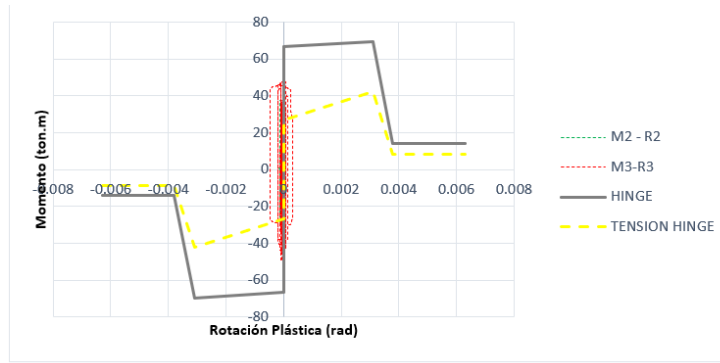


Figura 259. Estado Hinge (Rótula) >CP C16H9 Final Análisis THNLA – R7 – (M2-M3) Columna 16 piso 2 – Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

Como se ve en las siguientes imágenes (Figura 260 a la Figura 262) existen casos puntuales de rótulas en columnas que llegaron al nivel >CP y otras que quedaron en zona IO a LS, en algunas la influencia de la variación de la carga axial, al parecer influye en alguna manera en el comportamiento y desarrollo de la rótula.

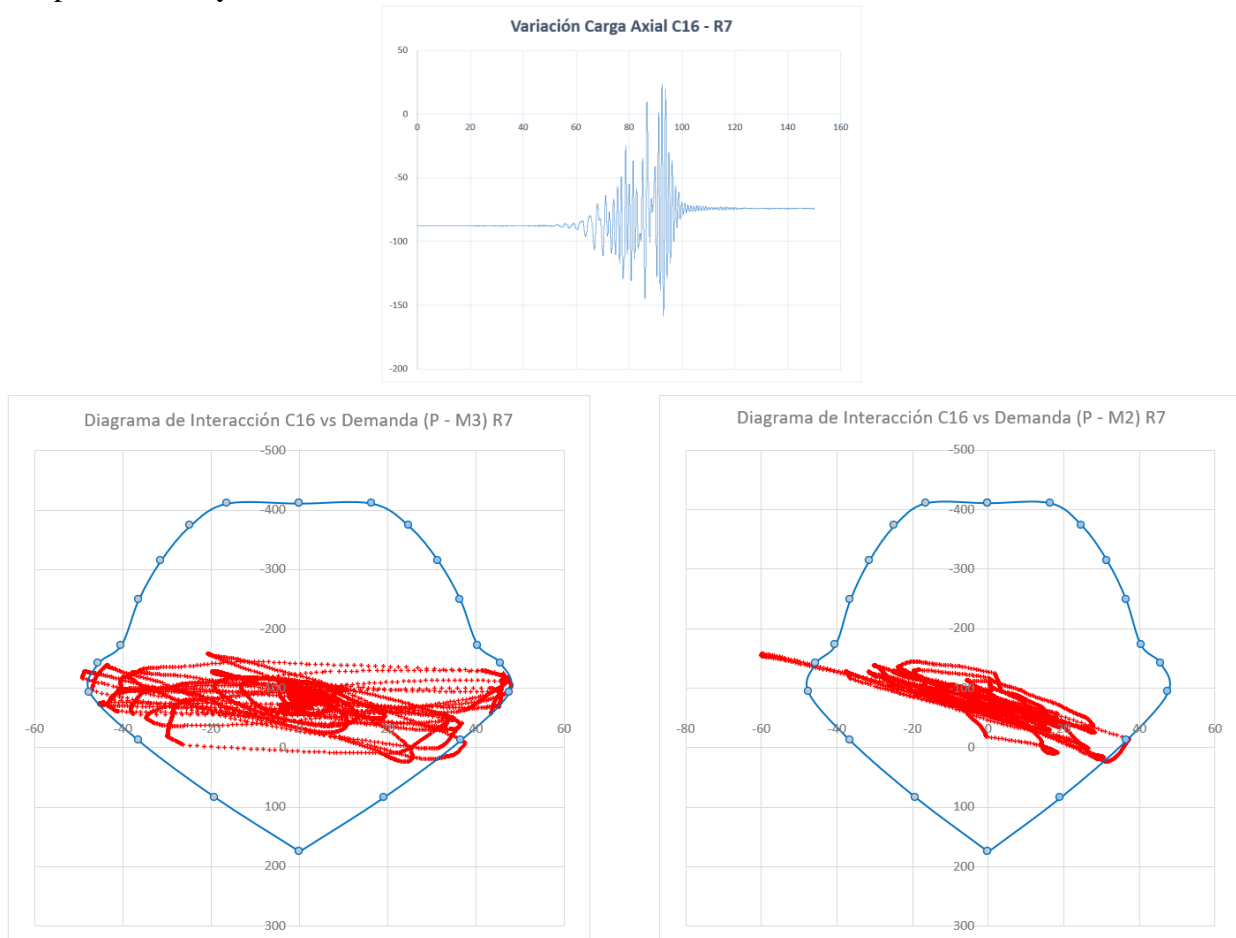


Figura 260. Variación Carga Axial C16 con registro sísmico R7 (arriba) – Diagrama de Interacción C16 vs. Solicitaciones del Análisis THNLA – R7 – (P-M2-M3) piso 2 – Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

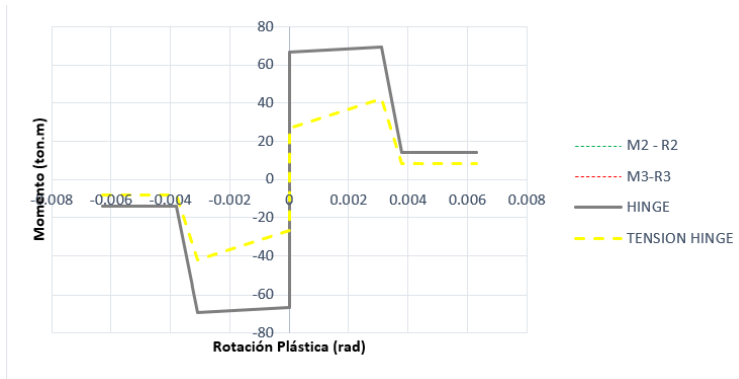


Figura 261. Estado Hinge (Rótula) IO-LS C19H3 Final Análisis THNLA – R7 – (M2-M3) Columna 19 piso 5 – Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

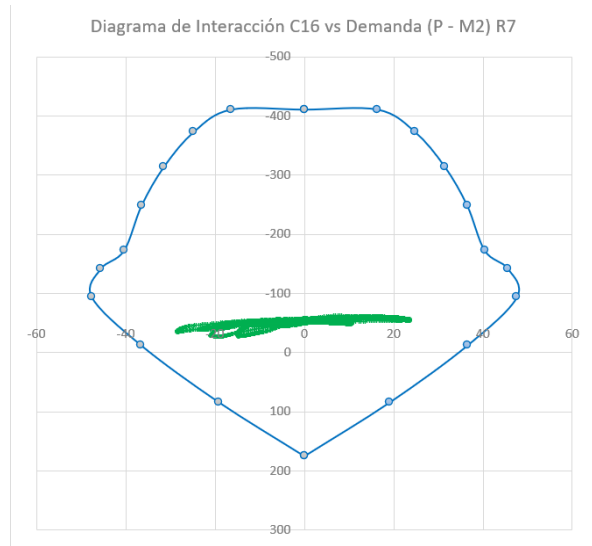
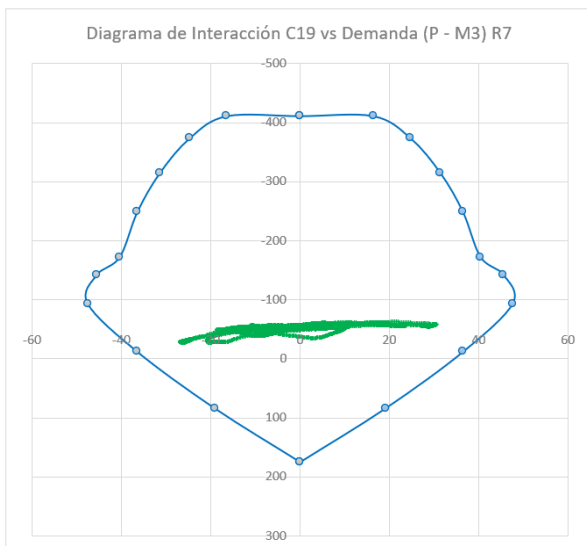
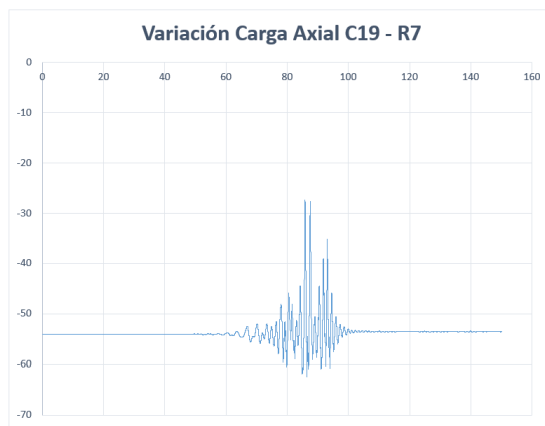


Figura 262. Variación Carga Axial C19 con registro sísmico R7 (arriba) – Diagrama de Interacción C19 vs. Solicitaciones del Análisis THNLA – R7 – (P-M2-M3) piso 5 – Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

Capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones

- El estudio numérico y matemático llevado a cabo en este proyecto, involucró el diseño y posterior verificación del desempeño sísmico de una edificación en concreto reforzado de 6 niveles, regular en planta y altura con base fija y con aislamiento en la base para dos microzonas sísmicas (Piedemonte C y Lacustre 200) de la ciudad de Bogotá D.C. Se buscó investigar cuán importante y significativo es en cuanto a protección y preservación de vidas y bienes el uso de dispositivos que atenúen la respuesta ante un eventual terremoto, se usó el análisis por fuerza horizontal equivalente, el análisis modal espectral, el análisis no lineal estático Push Over y análisis dinámico no lineal tiempo historia, para establecer parámetros de comparación entre los distintos tipos de dispositivos según su naturaleza y mecanismo de funcionamiento, fricción pendulares (FPS, DFP, TFP) y elastoméricos (LRB, HDR), estos a su vez comparados con la edificación con base empotrada.
- Se realizaron diferentes modelos matemáticos para la simulación de la respuesta de los tipos de aisladores ante siete registros sísmicos escalados al espectro de sismo máximo considerado esperado para cada microzona, los registros, aunque escalados a un mismo espectro para cada microzona, tenían sus propias características y diferían en duraciones, contenido de frecuencias e intensidad, lo que contribuye a una amplia gama de respuestas para el análisis.
- En Colombia no hay una normativa específica en cuanto al diseño de estructuras aisladas y se recomienda usar los requerimientos del código americano (Building Seismic Safety Council, 2003), en este estudio se realizó una metodología combinada de lo allí establecido, con algunos aspectos de lo expresado en la normativa peruana y chilena sobre aislación sísmica; se sabe que las condiciones a nivel país en cuanto a la amenaza sísmica y conformación a nivel de geomorfología y fallas son diferentes, así mismo, en la NSR-10, el enfoque es diferente en cuanto a los espectros de diseño. Habiendo dicho esto, con este proyecto no se pretende indicar que sea la forma correcta de realizar un diseño de un sistema de aislación, sólo se propone una metodología simplificada enfocada en el cálculo de las diferentes variables o parámetros de control característicos de cada tipo de dispositivo. Se trabajaron solamente propiedades nominales, por tener un enfoque netamente académico, se sabe que se deben incluir en un estudio nivel de edificación a construir, los factores de modificación de las propiedades λ que afectan rigidez, fuerza característica y fricción, que conllevan a un análisis más exacto del comportamiento de la estructura considerando modelos y respuestas adicionales al nominal, uno menos rígido y amortiguado para verificación de estabilidad y desplazamientos máximos, y otro más

rígido y amortiguado que da otro vistazo a aceleraciones, derivas y fuerzas sísmicas máximas.

- Los procesos que involucran el diseño de cada tipo de dispositivo son diferentes, teniendo en cuenta sólo su naturaleza, elastoméricos versus fricción, los elastoméricos involucran más cantidad de chequeos que los de fricción pendulares, dando un punto a favor en cuanto a rapidez y obtención a partir de un cálculo directo de los parámetros. Ya en cuanto a la forma de trabajo, dentro del tipo fricción pendular, el simple, involucra menores operaciones, seguido del doble y por último el triple, que debido a las distintas fases (5) en las que se puede trabajar aumenta la cantidad de cálculos, pero una vez se igualan ciertos parámetros, queda simplificado a cálculos parecidos a un sistema de aislación DFP. Sin embargo, se debe aclarar que los aisladores tipo fricción tienen menor rango de libertad para su distribución en planta cuando se busca alcanzar los parámetros objetivos, a diferencia del tipo elastomérico que pueden combinarse con deslizadores para ayudar a reducir efectos torsionales o alcanzar parámetros objetivos como la rigidez.
- Cada sistema de aislación funciona o cumple el objetivo de aumentar el periodo y el amortiguamiento de la edificación, correspondiéndose esto con la reducción en la demanda sísmica y desplazamientos, lo que redundaría en reducciones de distorsiones de entrepiso, las aceleraciones de entrepiso, los cortantes por piso, las fuerzas sísmicas en la superestructura y cortante en la base. Se notan que estos resultados en una microzona fueron más acentuados debido a la respuesta local condicionada y modificada por el tipo de suelo, una microzona con mayoría de suelo que se podría clasificar como rígido (Piedemonte C) generó un mejor comportamiento al hacer uso del sistema de aislación, por otro lado, en el suelo Lacustre 200, que se podría considerar un suelo predominantemente blando, las respuestas se verían amplificadas en periodos altos. En este último caso, al espectro tener un periodo T_c de 1.87 segundos y periodo largo de 4 segundos, fue un poco más complejo tratar de generar una configuración de los aisladores en planta para que el comportamiento local de los aisladores de esquina no presentase una degradación importante de rigidez, para algunos registros sísmicos, efecto que podría suponer la ocurrencia de resonancia del dispositivo. Para esta microzona, los aisladores tipo elastoméricos no pudieron ser llevados al mismo periodo objetivo de 4 segundos, no se podían cumplir algunas condiciones del material, al cual se llevó a los tipo péndulo de fricción, para comparar bajo las mismas condiciones, debido a que en un periodo de 3 segundos aún la demanda sísmica y la pseudoaceleración presentaba valores altos, casi que al nivel de la meseta para el espectro de sismo de diseño, los sistemas tipo péndulos de fricción se lograron configurar de tal manera que alcanzarán los 4 segundos y así un menor valor de pseudoaceleración.

- La escogencia del sistema de aislación tipo fricción de doble péndulo, como se comentó en la sección de tabulación de resultados, llevó una combinación de sencillez en los cálculos y accesibilidad comercial, más que del comportamiento de las respuestas obtenidas, aunque de todas maneras en casi todos estos aspectos estuvo siempre destacándose como uno de los mejores.
- Las respuestas globales de estabilidad al aplicarse el análisis no lineal tiempo historia en los modelos aislados se mostraron coherentes y adecuadas, las salidas del proceso como energía disipada, histéresis del sistema, amortiguamiento, estaban acordes y contenidos dentro de los planteados en el análisis estático realizado.
- En cuanto a la respuesta local de aisladores, se evidenció que su comportamiento ante un eventual sismo, queda condicionada, a la variación de la carga axial, presentándose ciclos histeréticos con comportamiento bilineal marcado, uniforme y congruente con la teoría existente, cuando se encuentra sometido a carga axial aproximadamente uniforme; mientras que cuando la carga axial fluctúa en rangos de valores moderados a altos, el diagrama pierde la bilinearidad. Se hace necesario entonces, estar vigilante a las acciones locales de los aisladores, aun cuando, se haya verificado la estabilidad del sistema ante la combinación de carga, $P_{mín}$, al aplicar el análisis tiempo historia, es imperante consultar sobre la existencia de tracciones en los aisladores sísmicos, ya que los dispositivos tipo elastoméricos, aun cuando tienen cierta capacidad a tracción, esta es muy pequeña, mientras que en los de tipo fricción se deben evitar su ocurrencia. En el caso que esto suceda se recomienda aumentar el peso muerto sobre el sistema de aislación. Para este estudio se encontraron que para algunos registros hubo niveles pequeños de tracciones en algunos dispositivos, mayormente los de esquina.
- En cuanto al diseño de la estructura aislada, una vez seleccionado el sistema DFP, y la edificación fija para ambas microzonas, las secciones y refuerzos, fueron parecidas, para estructuras con base fija columnas de 65 cm x 65 cm con refuerzo mínimo aproximadamente (Piedemonte C), 55 cm x 55 cm con refuerzo cercano al 2% (Lacustre 200), para columnas con sistema de aislación 50 cm x 50 cm de sección y refuerzos 1.27% (Piedemonte C) y 1.8% (Lacustre 200). Para vigas se usaron las mismas secciones y refuerzos según su ubicación para cada nivel, esto porque los datos que arrojaron los diseños fueron muy cercanos y las cuantías de acero requeridas eran menores o un poco más que la mínima, además sirve como punto de comparación más efectivo en la evaluación del desempeño sísmico al tener casi todas las condiciones iguales entre el sistema aislado y el empotrado en su base.
- A nivel de desempeño se enfatiza que los métodos usados para ambos tipos de modelos, base fija vs base aislada, son diferentes en cuanto a gasto computacional y metodología de

aplicación de la excitación sísmica y las características inherentes de cada análisis. Pero ambos generan un panorama global de comportamiento esperado, los resultados para los modelos con base fija, en microzona Piedemonte C alcanzan los niveles de desempeño para sismo máximo considerado y sismo de diseño especificados en la normativa, estar dentro de las franjas Ocupación Inmediata y Seguridad a la vida, con un 25% de nivel de daño en vigas y alrededor de 7% en columnas, se resalta que al llevar el análisis hasta la falla, se formaron todas las rótulas en >CP primero en vigas antes que en columnas, cumpliéndose el mecanismo de falla columna fuerte – viga débil (falla dúctil), por tanto, si se deja de lado que no se cumplió en un nivel la deriva de piso por 0.1%, puede considerarse el diseño adecuado y satisfactorio. Para microzona Lacustre 200, se presentan rótulas en CP en pasos muy tempranos del análisis Push Over, sin embargo, se mantienen en este nivel mientras se sigue avanzando en el análisis de la plastificación progresiva, al final del análisis se encuentran que el mecanismo viga débil – columna fuerte (falla dúctil) no se cumple para este diseño, los puntos de desempeño para los sismos de diseño y máximo esperado se encuentran más allá del límite de IO y muy cercano a CP, comprometiéndose la integridad de la edificación, este diseño no alcanza a cumplir los requisitos de la NSR 10 en cuanto a desempeño esperado, aun cuando de manera global los porcentajes de daño sean similares al Push Over del modelo en Piedemonte C. Los análisis por desempeño de los modelos matemáticos aislados en su base con dispositivos DFP, se realizaron por medio de un análisis dinámico no lineal tiempo historia THNLA, donde el sismo máximo esperado se aplicó en sus dos componentes EW y NS al mismo tiempo, los resultados fueron para el caso de elementos vigas en la microzona Lacustre 200, un comportamiento dentro de los límites del rango lineal sin generación de rótulas para ningún registro sísmico, esto aunque rescatable, se ve opacado por las fallas localizadas en columnas de rótulas en estado de >CP de al menos una en cada registro sísmico, aun cuando son escenarios con fallas no concurrentes o focalizadas sino con comportamiento aleatorio, algunas en la base, otras en pisos superiores, algunas en columnas de esquinas, otras en columnas interiores o de borde, se debe prestar atención a evitar el desarrollo de estas mismas. El porcentaje a nivel global de falla de estas rótulas >CP en columnas no supera el 0.4% y a nivel de elemento el 1.1%, sin embargo, nunca es deseable la falla abrupta de una columna en la edificación. Se puede inferir que algunas demandas sísmicas de los movimientos del terreno hacen que se alcancen valores más allá de lo que el diseño por el análisis modal espectral pudo prever, y el sistema de aislación no fue efectivo al 100% en cuanto a las condiciones del suelo y de algún modo se amplificó una demanda. Cabe resaltar la aparición de tracciones y la alta variación de la carga axial también contribuyen al deterioro de la capacidad de resistencia de la rótula, podría inferirse de esta manera, al revisar que las vigas están en el rango lineal y no contemplan la influencia de las solicitaciones axiales directamente. Los aisladores sísmicos como sistema para ambos casos, impidieron la reducción abrupta del desempeño en mayor grado en el tipo de suelo Lacustre 200 ante sismo, absorbió la energía de entrada del sismo y permite la recuperación inmediatamente después del evento.

- Los resultados para las derivas en los análisis por desempeño de los modelos aislados, para la microzona Lacustre 200, no fueron satisfactorios al sobrepasar el límite normativo, esto es contraproducente en el sentido que se espera que los elementos de la superestructura no sobrepasen el comportamiento lineal, sin embargo, al considerar las dos direcciones del sismo actuando al 100% de su intensidad al mismo tiempo se generan respuestas que distan un poco del comportamiento esperado.
- Como una recomendación se debe estudiar más el fenómeno localizado de la variación de la carga axial en aisladores y su comportamiento histerético, porque muchas veces se analiza el sistema de aislación y este presenta un comportamiento esperado, pero no hay que dejar de lado la individualización del componente. Así mismo, para las otras microzonas sísmicas que comportamiento tendrán los distintos sistemas de aislamiento. Investigar también como afecta la altura de la edificación en la eficiencia del sistema de aislamiento.
- Por último, debe el comité de la AIS encargado de la actualización de la normativa colombiana sismorresistente publicar el capítulo referente a la aislación sísmica y fomentar en el país la cultura de la resiliencia sísmica, no sólo en edificaciones esenciales, sino también en las ordinarias, así los colombianos puedan decidir el proteger sus bienes inmuebles, además de impedir muertes, reducir costos de reparación, o gastos de inactividad si es algún edificio en el que se prestan servicios, asociados a reparaciones o daños.

Bibliografía

American Society of Civil Engineers. (2017). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*. Reston, Virginia: AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS.

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA . (2017). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Bogotá D.C.

Auqui Parra, M. V. (2010). *ANÁLISIS DE AISLADORES SISMICOS ELASTOMÉRICOS CONSTRUIDOS EN EL ECUADOR*. Sangolquí: ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO.

Building Seismic Safety Council. (2003). *NEHRP RECOMMENDED PROVISIONS FOR SEISMIC REGULATIONS FOR NEW BUILDINGS AND OTHER STRUCTURES (FEMA 450)*. Washington, D.C.

Castilla Romero, J. A., & Montes Florez, L. C. (2011). *ANALISIS ESTRUCTURAL Y ECONOMICO DE EDIFICIOS DE 30 PISOS EN LA CIUDAD DE CARTAGENA, MEDIANTE ANALISIS ESTATICO Y EMPLEANDO AISLADORES SISMICOS*. Cartagena: Uiversidad de Cartagena.

Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID/FIC/UNI. (2022). *Centro de Observación de Ingeniería Sísmica (CEOIS)*. Obtenido de Centro de Observación de Ingeniería Sísmica (CEOIS): <http://www.cismid.uni.edu.pe/ceois/red/>

Constantinou, M. C., Kalpakidis, I., & Filiatrault, A. &. (2011). *LRFD-Based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators*. New York: MCEER.

Correa Avila, E. (2019). *APOYO PARA LA ELABORACIÓN Y ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO CORRESPONDIENTE A LA FUTURA NORMA DE AISLAMIENTO SÍSMICO EN COLOMBIA*. Bogotá D.C.: Universidad de la Salle.

Departamento de Ingeniería Civil - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas - Universidad de Chile & ONEMI . (2022). *Terremotos de Chile / Earthquakes of Chile*. Obtenido de Terremotos de Chile / Earthquakes of Chile: <http://terremotos.ing.uchile.cl/>

Fenz, D., & Constantinou, M. (2005). Behavior of the double concave Friction Pendulum. *Earthquake Engineering and Structural*.

FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIA . (2010). *ZONIFICACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE BOGOTÁ PARA EL DISEÑO SISMO RESISTENTE DE EDIFICACIONES* . BOGOTÁ D.C.: ALCALDIA MAYOR DE BOGOTÁ D.C.

Galindo Gómez, D. A. (2014). *Comparación del Comportamiento Dinámico del Edificio Park Way 41 con y sin Aisladores Pasivos en Bogotá Usando el Programa de Elementos Finitos- SAP 2000*. Bogotá D.C.: Universidad de La Salle.

GeoNet - Geological hazard information for New Zealand. (2022). *Strongmotion.geonet.org.nz*. Obtenido de Strong Motion Tool: <https://www.geonet.org.nz/>

Kelly, J. M. (1990). Base Isolation: Linear Theory and Design. *Earthquake Spectra*, 223-244.

Martelli A., C. P. (2014). Recent development and application of seismic isolation and energy dissipation and conditions for their correct use. *Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology*, 449–488.

Melo bojacá, G. O. (2013). *Aisladores sísmicos elastoméricos en centros de salud, caso Clínica Comfandi*. Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia.

MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH CENTER. (2020). *PERFORMANCE COMPARISON OF HIGH-DAMPING RUBBER ISOLATORS AND FRICTION PENDULUM ISOLATORS WITH DIFFERENT MODELLING APPROACHES*. Istanbul: METU/EERC.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento - Gobierno de Perú. (2019). *Decreto Supremo que aprueba la Norma Técnica E.031 “Aislamiento Sísmico” y la incorpora al Índice del Reglamento Nacional de Edificaciones*. Lima: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

Montoya Vallecilla , J. O. (2010). *Análisis sísmico de un edificio con aislamiento en la base*. Armenia: Universidad Politécnica de Madrid.

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. (2022). *K-NET (Kyoshin Network) - KiK-net (Kiban Kyoshin Network)*. Obtenido de Strong Motion Seismograph Networks :

https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/docs/overview_kyoshin_index_en.html

Pastora Estrada, A. G., & Ríos Novoa, M. (2016). *ANÁLISIS DEL EFECTO DE AISLADORES SÍSMICOS EN LA RESPUESTA DINÁMICA DE UN EDIFICIO APORTICADO DE 4*

NIVELES, SEGÚN LAS CONDICIONES DE SUELO DE LA ZONA NOROESTE DE LA CIUDAD DE MANAGUA, NICARAGUA. MANAGUA: Universidad Centro Americana.

PEER Ground Motion Database. (2022). *Pacific Earthquake Engineering Research Center University of California, Berkeley NGA West2*. Obtenido de Pacific Earthquake Engineering Research Center Web Site: <https://ngawest2.berkeley.edu/>

Piscal Arévalo, C. M., & López Almansa, F. (2018). Proposal for the future design code for seismic isolation of buildings in Colombia. *DYNA*, 306-315.

Piscal, C. M., & Almansa, F. L. (2016). Consecuencias de la posible aplicación a Colombia de las normas más actuales sobre aislamiento sísmico de. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 415-436.

Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería (RAII-UNAM). (2022). *Base de datos de registros acelerográficos de la RAII-UNAM*. Obtenido de Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería de la UNAM (RAII-UNAM): <https://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/>

Romero, J. A., & Florez, L. C. (2011). ANALISIS ESTRUCTURAL Y ECONOMICO DE EDIFICIOS DE 30 PISOS EN LA CIUDAD DE CARTAGENA, MEDIANTE ANALISIS ESTATICO Y EMPLEANDO AISLADORES SISMICOS.

Trujillo Benito, E. J. (2017). *DISEÑO INTEGRAL DE ESTRUCTURAS CON SISTEMA DE AISLACIÓN SÍSMICA APLICADO A UN EDIFICIO DE CONCRETO ARMADO*. Huancayo: UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ.

Villavicencio Cedeño, E. G. (2015). *ANÁLISIS SÍSMICO ESTRUCTURAL COMPARATIVO PARA EDIFICIOS CON AISLADORES DE BASE TIPO ELASTOMÉRICOS Y FRICCIONANTES, PARA LOS DIFERENTES TIPOS DE SUELOS DEL ECUADOR*. Quito: ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL.

Walters, M. (2015). Seismic Isolation – The Gold Standard of Seismic Protection. *Structure Magazine*, 11-14.

Apéndices

Apéndice 1. Respuesta local de sistemas de aislamiento según su disposición en planta (Variación de carga axial).

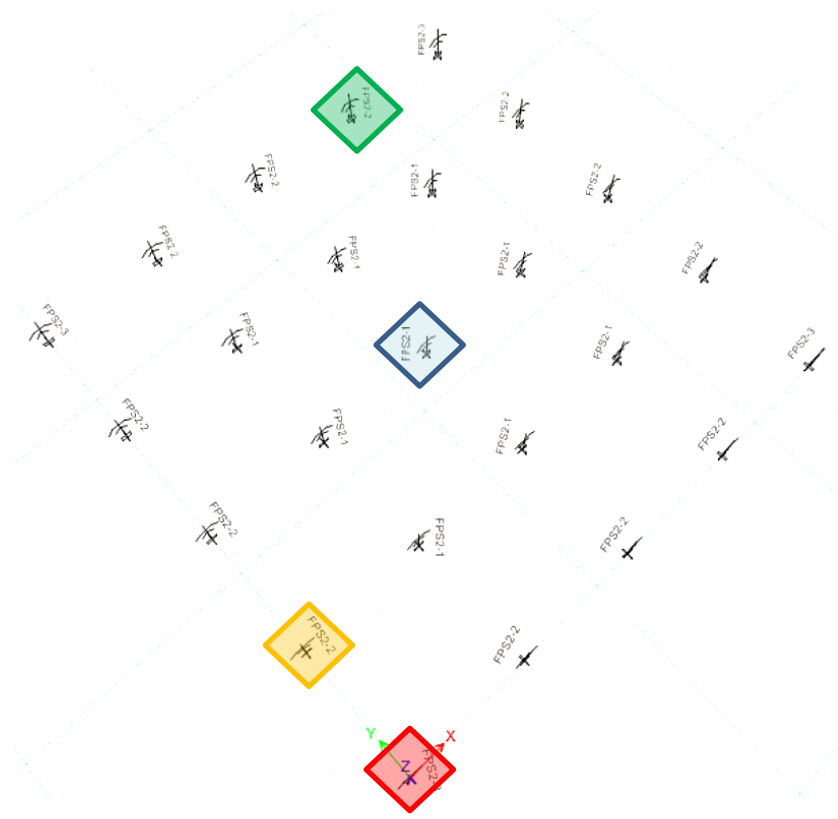
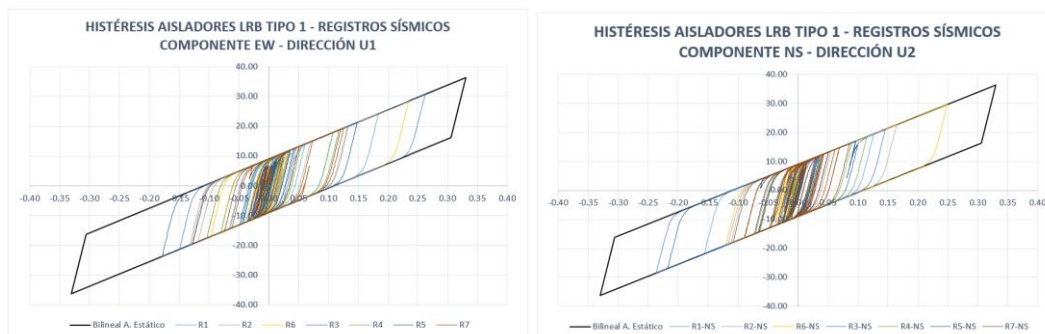


Figura 263. Aisladores seleccionados para mostrar efectos locales en la histéresis de los aisladores con la variabilidad de la carga axial - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.



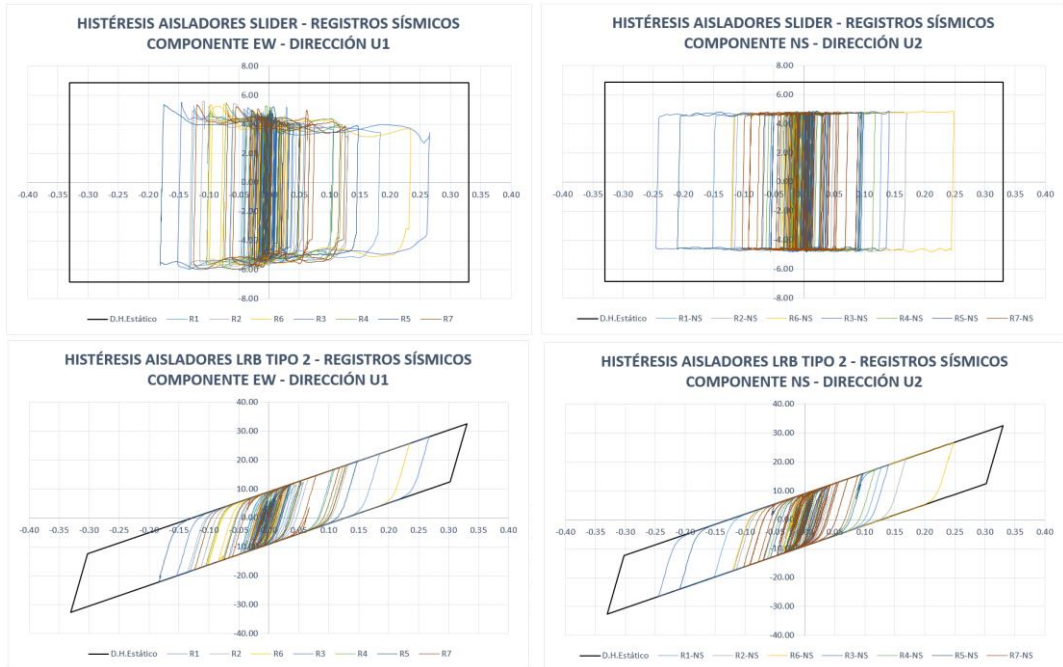
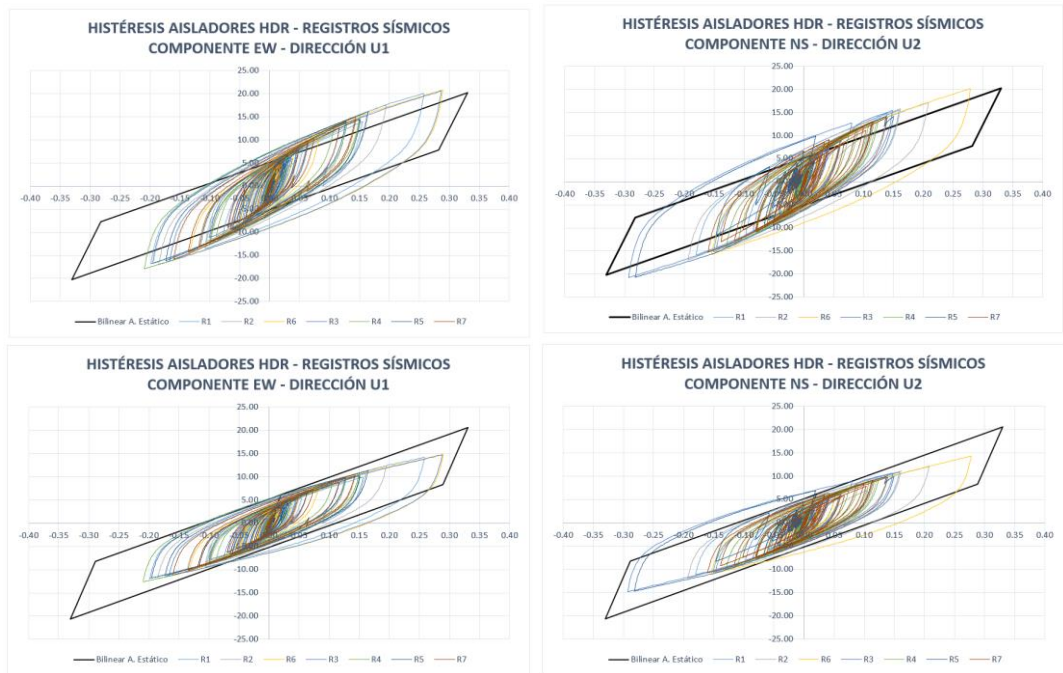


Figura 264. Respuestas locales de Aislador LRB y Deslizador de arriba hacia abajo, carga axial casi constante (Interior), con variación de carga axial moderada (Lateral), con variación de carga axial excesiva (Esquina)- Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.



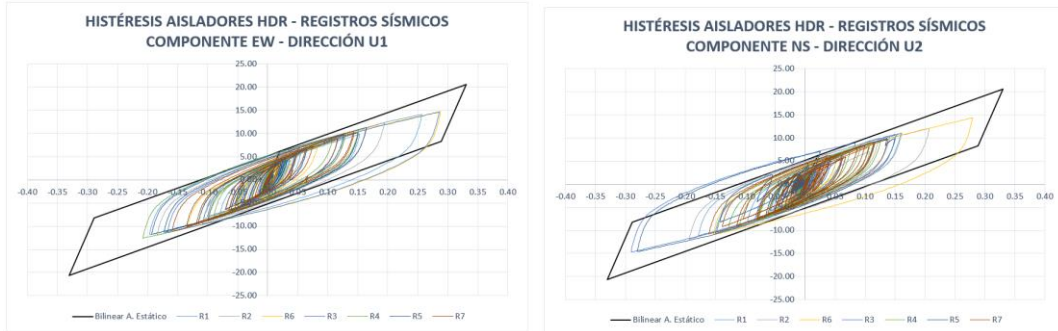


Figura 265. Respuestas locales de Aislador HDR de arriba hacia abajo, carga axial casi constante (Interior), con variación de carga axial moderada (Lateral), con variación de carga axial excesiva (Esquina)- Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

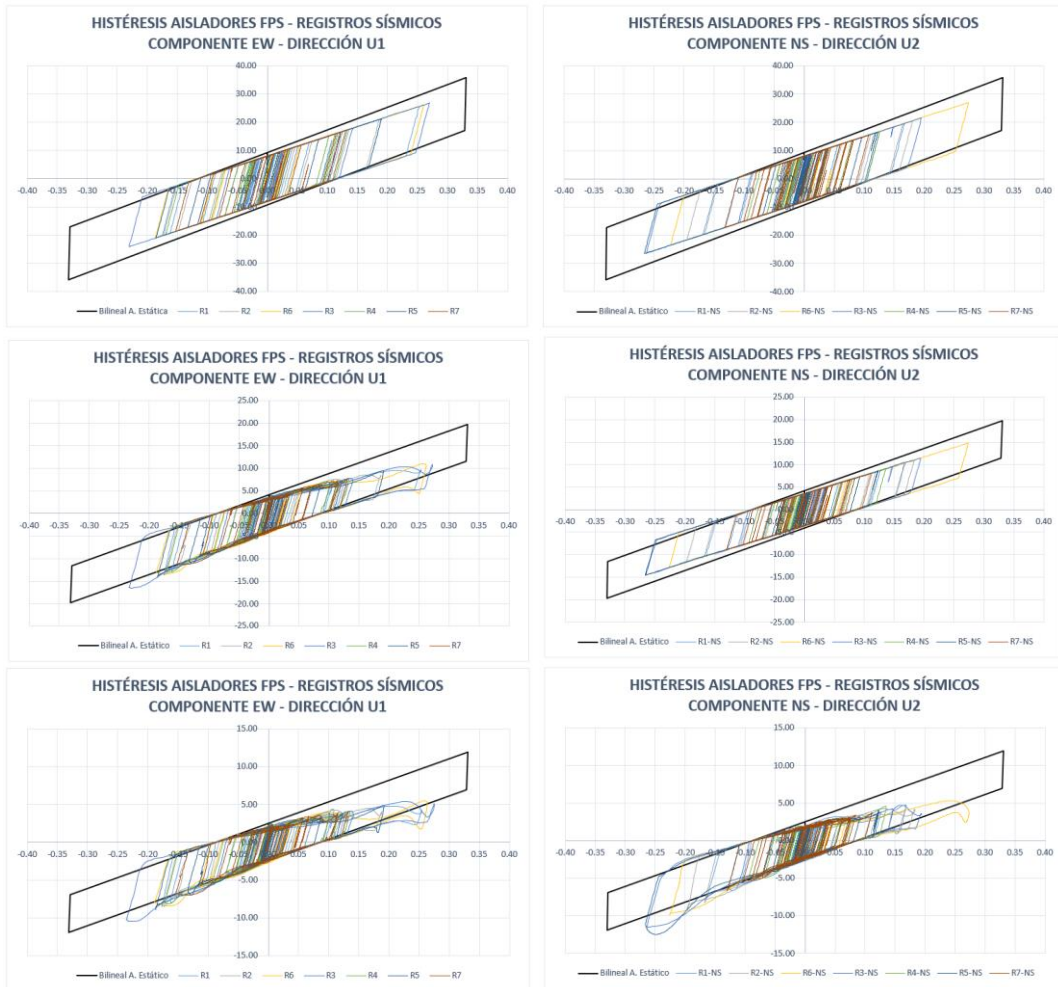


Figura 266. Respuestas locales de Aislador FPS de arriba hacia abajo, carga axial casi constante (Interior), con variación de carga axial moderada (Lateral), con variación de carga axial excesiva (Esquina)- Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

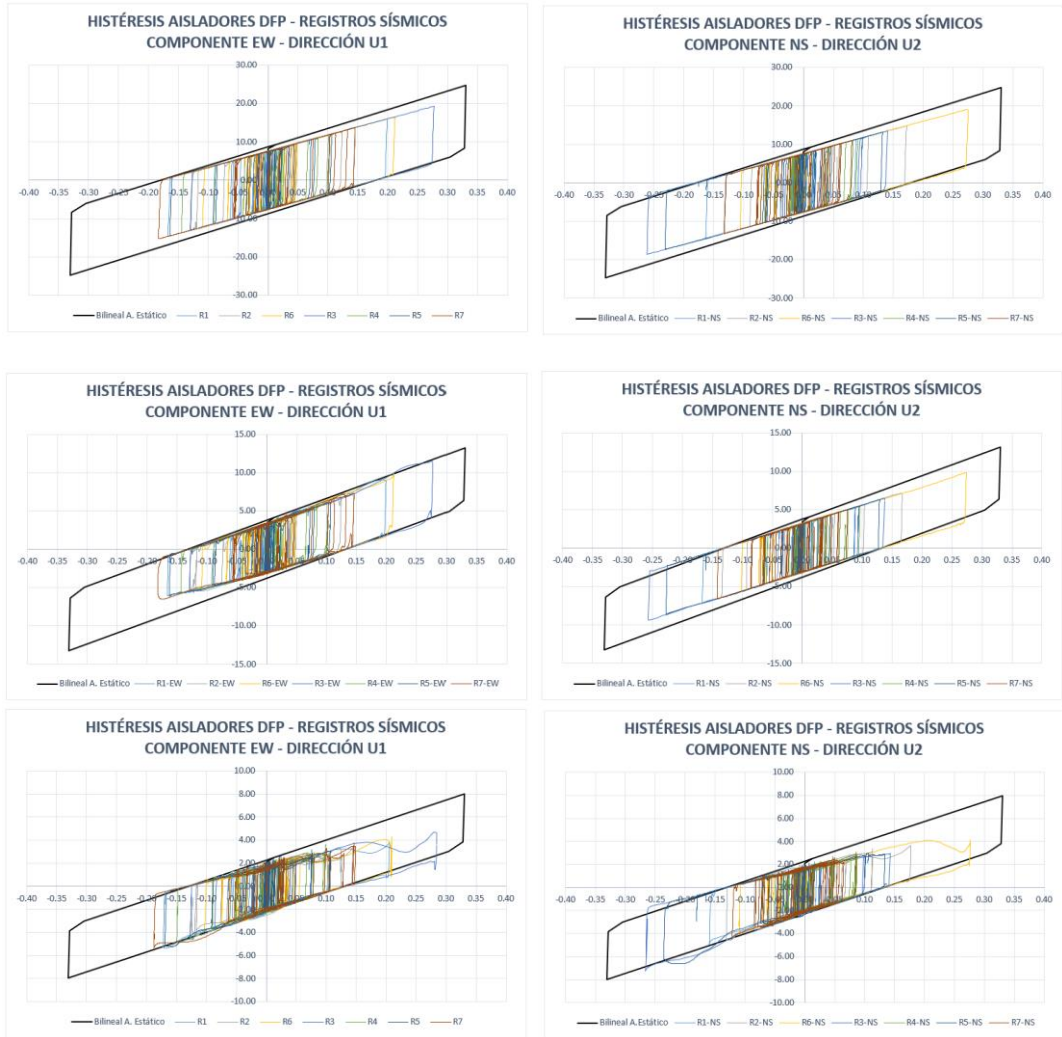
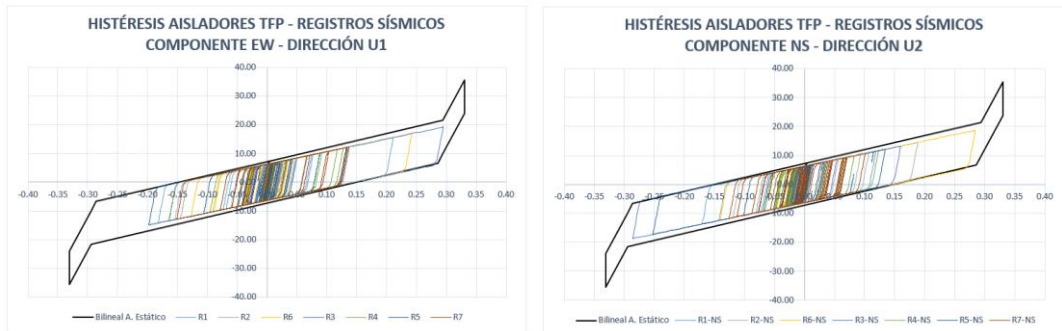


Figura 267. Respuestas locales de Aislador DFP de arriba hacia abajo, carga axial casi constante (Interior), con variación de carga axial moderada (Lateral), con variación de carga axial excesiva (Esquina)- Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.



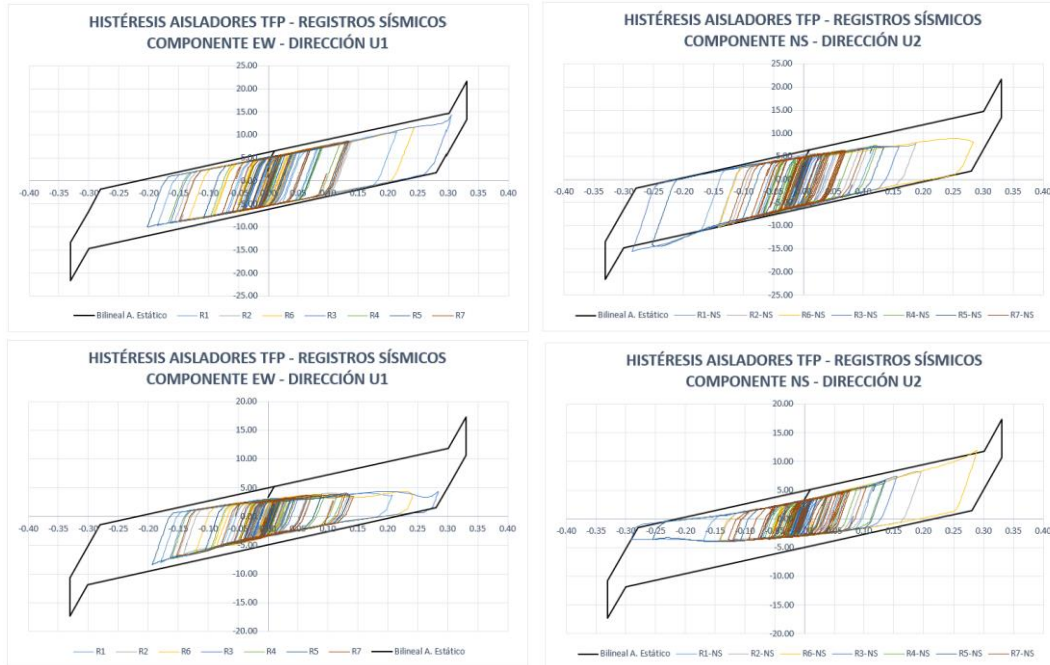


Figura 268. Respuestas locales de Aislador TFP de arriba hacia abajo, carga axial casi constante (Interior), con variación de carga axial moderada (Lateral), con variación de carga axial excesiva (Esquina) - Microzona Piedemonte C. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

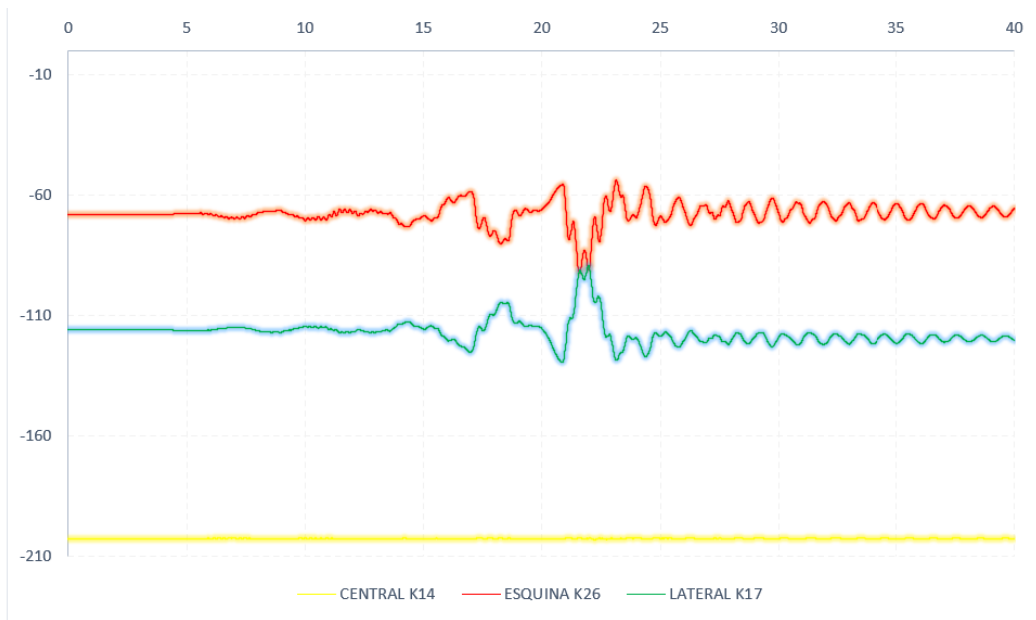


Figura 269. Variación de carga axial (Ejemplo FPS R6 Componente EW) - Microzona Lacustre 200. Fuente: Propia con análisis en ETABS.

Anexos

Anexo 1. Configuración en planta de aisladores (Ejemplo).

Configuración 2. Aislador HDR.

Tipo	Pprom.	Pmáx.	Cantidad	Keff	Eciclo	FR	Qd
1 (HDR-1)	224.3	396.7	9.0	61.2	6.3	7.5	5.1
2 (HDR-2)	121.7	259.2	16.0	62.3	6.4	7.7	5.1

Tabla 58. Parámetros finales para modelación del sistema de Aislación HDR. Fuente: Propia.

Row Labels	Pservicio	Pmáx	xi	Yi	Tipo de Aislador	Keff	EDC	FR	Qd	Pixi	Piyi	Keffxi	Keffyi
	tonf	tonf	m	M		tonf/m	tonf.m	tonf	tonf	tonf.m	tonf.m	tonf	tonf
1	82.7897	173.198	0	0	2	62.3	6.4	7.7	5.1	0.0	0.0	0.0	0.0
2	133.497	252.897	0	6	2	62.3	6.4	7.7	5.1	0.0	801.0	0.0	373.8
3	137.181	259.184	0	12	2	62.3	6.4	7.7	5.1	0.0	1646.2	0.0	747.6
4	133.497	252.897	0	18	2	62.3	6.4	7.7	5.1	0.0	2402.9	0.0	1121.5
5	82.7897	173.198	0	24	2	62.3	6.4	7.7	5.1	0.0	1987.0	0.0	1495.3
6	133.497	234.328	6	0	2	62.3	6.4	7.7	5.1	801.0	0.0	373.8	0.0
7	220.272	375.888	6	6	1	61.2	6.3	7.5	5.1	1321.6	1321.6	366.9	366.9
8	226.194	386.122	6	12	1	61.2	6.3	7.5	5.1	1357.2	2714.3	366.9	733.8
9	220.272	375.888	6	18	1	61.2	6.3	7.5	5.1	1321.6	3964.9	366.9	1100.7
10	133.497	234.328	6	24	2	62.3	6.4	7.7	5.1	801.0	3203.9	373.8	1495.3
11	137.181	240.571	12	0	2	62.3	6.4	7.7	5.1	1646.2	0.0	747.6	0.0
12	226.194	385.946	12	6	1	61.2	6.3	7.5	5.1	2714.3	1357.2	733.8	366.9
13	232.394	396.662	12	12	1	61.2	6.3	7.5	5.1	2788.7	2788.7	733.8	733.8
14	226.194	385.946	12	18	1	61.2	6.3	7.5	5.1	2714.3	4071.5	733.8	1100.7
15	137.181	240.571	12	24	2	62.3	6.4	7.7	5.1	1646.2	3292.4	747.6	1495.3
16	133.497	234.328	18	0	2	62.3	6.4	7.7	5.1	2402.9	0.0	1121.5	0.0
17	220.272	375.888	18	6	1	61.2	6.3	7.5	5.1	3964.9	1321.6	1100.7	366.9
18	226.194	386.122	18	12	1	61.2	6.3	7.5	5.1	4071.5	2714.3	1100.7	733.8
19	220.272	375.888	18	18	1	61.2	6.3	7.5	5.1	3964.9	3964.9	1100.7	1100.7
20	133.497	234.328	18	24	2	62.3	6.4	7.7	5.1	2402.9	3203.9	1121.5	1495.3
21	82.7897	173.198	24	0	2	62.3	6.4	7.7	5.1	1987.0	0.0	1495.3	0.0
22	133.497	252.897	24	6	2	62.3	6.4	7.7	5.1	3203.9	801.0	1495.3	373.8
23	137.181	259.184	24	12	2	62.3	6.4	7.7	5.1	3292.4	1646.2	1495.3	747.6
24	133.497	252.897	24	18	2	62.3	6.4	7.7	5.1	3203.9	2402.9	1495.3	1121.5
25	82.7897	173.198	24	24	2	62.3	6.4	7.7	5.1	1987.0	1987.0	1495.3	1495.3
Totales	3966.1					1547.2	159.2	191.1	128.4	47593.4	47593.4	18566.8	18566.8

Tabla 59. Distribución en planta del sistema de Aislación HDR. Fuente: Propia.

Parámetros Finales

K _b	1547.2	tonf/m
T _b	3.02	s
T _f	0.938	
T _b /T _f	3.2	
EDC	159.2	tonf*m
β _M	15%	
B _M	1.39	
F _R	191.1	tonf
%F _R	5.47%	≥2.5%W

Nuevos cálculos para el amortiguamiento calculado

S _a (g)	0.18	
D _M	29.2501	cm
D _{TM}	33.6376	cm
V _b	18.0% W	
V _{st}	15.9% W	
R _a	2	
V _s	278.0	tonf
V _s	8.0% W	
Q _{ds}	128.4	tonf
1.5Q _{ds}	192.53	
V _s	2.17 Q _{ds}	≥ 1.5Q _{ds}

Configuración 3. Aislador FPS 1^a. Generación.

Tipo	P _{prom.}	P _{máx.}	Cantidad	K _{eff}	Eciclo	F _R	Q _d
1 (FPS1-1)	224.25	396.7	9	108.27	12.29	13.24	9.30
2 (FPS1-2)	133.50	252.9	8	59.76	5.44	7.82	4.12
3(FPS1-3)	109.99	259.2	8	36.06	3.28	4.72	2.48

Tabla 60. Parámetros finales para modelación del sistema de Aislación FPS1. Fuente: Propia.

Row Labels	Pservicio	Pmáx	xi	yi	Tipo de Aislador	Keff	EDC	FR	Qd	Pixi	Piyi	Keffxi	Keffyi
	tonf	tonf	m	m		tonf/m	tonf.m	tonf	tonf	tonf.m	tonf.m	tonf	tonf
1	82.79	173.20	0	0	3	36.06	3.28	4.72	2.48	0.00	0.00	0.00	0.00
2	133.50	252.90	0	6	2	59.76	5.44	7.82	4.12	0.00	800.98	0.00	358.55
3	137.18	259.18	0	12	3	36.06	3.28	4.72	2.48	0.00	1646.2	0.00	432.77
4	133.50	252.90	0	18	2	59.76	5.44	7.82	4.12	0.00	2402.9	0.00	1075.7
5	82.79	173.20	0	24	3	36.06	3.28	4.72	2.48	0.00	1986.9	0.00	865.55
6	133.50	234.33	6	0	2	59.76	5.44	7.82	4.12	800.98	0.00	358.55	0.00
7	220.27	375.89	6	6	1	108.2	12.29	13.24	9.30	1321.6	1321.6	649.61	649.61
8	226.19	386.12	6	12	1	108.2	12.29	13.24	9.30	1357.1	2714.3	649.61	1299.2
9	220.27	375.89	6	18	1	108.2	12.29	13.24	9.30	1321.6	3964.9	649.61	1948.8
10	133.50	234.33	6	24	2	59.76	5.44	7.82	4.12	800.98	3203.9	358.55	1434.2
11	137.18	240.57	12	0	3	36.06	3.28	4.72	2.48	1646.1	0.00	432.77	0.00
12	226.19	385.95	12	6	1	108.2	12.29	13.24	9.30	2714.3	1357.1	1299.2	649.61
13	232.39	396.66	12	12	1	108.2	12.29	13.24	9.30	2788.7	2788.7	1299.2	1299.2
14	226.19	385.95	12	18	1	108.2	12.29	13.24	9.30	2714.3	4071.4	1299.2	1948.8
15	137.18	240.57	12	24	3	36.06	3.28	4.72	2.48	1646.1	3292.3	432.77	865.55
16	133.50	234.33	18	0	2	59.76	5.44	7.82	4.12	2402.9	0.00	1075.6	0.00
17	220.27	375.89	18	6	1	108.2	12.29	13.24	9.30	3964.	1321.6	1948.8	649.61
18	226.19	386.12	18	12	1	108.2	12.29	13.24	9.30	4071.4	2714.3	1948.8	1299.2
19	220.27	375.89	18	18	1	108.2	12.29	13.24	9.30	3964.9	3964.9	1948.8	1948.8
20	133.50	234.33	18	24	2	59.76	5.44	7.82	4.12	2402.9	3203.9	1075.6	1434.2
21	82.79	173.20	24	0	3	36.06	3.28	4.72	2.48	1986.9	0.00	865.55	0.00
22	133.50	252.90	24	6	2	59.76	5.44	7.82	4.12	3203.9	800.98	1434.2	358.55
23	137.18	259.18	24	12	3	36.06	3.28	4.72	2.48	3292.3	1646.1	865.55	432.77
24	133.50	252.90	24	18	2	59.76	5.44	7.82	4.12	3203.9	2402.9	1434.2	1075.6
25	82.79	173.20	24	24	3	36.06	3.28	4.72	2.48	1986.9	1986.9	865.55	865.55
Totales	3966.1					1741.0	180.4	219.4	136.5	47593.4	47593.4	20891.9	20891.9

Tabla 61. Distribución en planta del sistema de Aislación FPSI. Fuente: Propia.

Parámetros Finales

K_b 1,741 tonf/m

T_b 2.79 s

T_f 0.938 s

T_b/T_f 2.98

EDC 180.4 tonf*m

β_M 15.1%

B_M 1.39

FR	219.4	tonf
%FR	6.51%	$\geq 2.5\%W$

Nuevos cálculos para el amortiguamiento calculado

Sa (g)	0.219	
DM	30.42	cm
DTM	34.98	cm
Vb	21.90%	W
Vst	19.81%	W
Ra	2	
Vs	333.63	tonf
Vs	9.90%	W
Qds	128.4	tonf
1.5Qds	136.5	
Vs	2.45 Qds	$\geq 1.5Qds$

Anexo 2. Diagramas de Flujo Metodológicos Diseño de Aisladores.

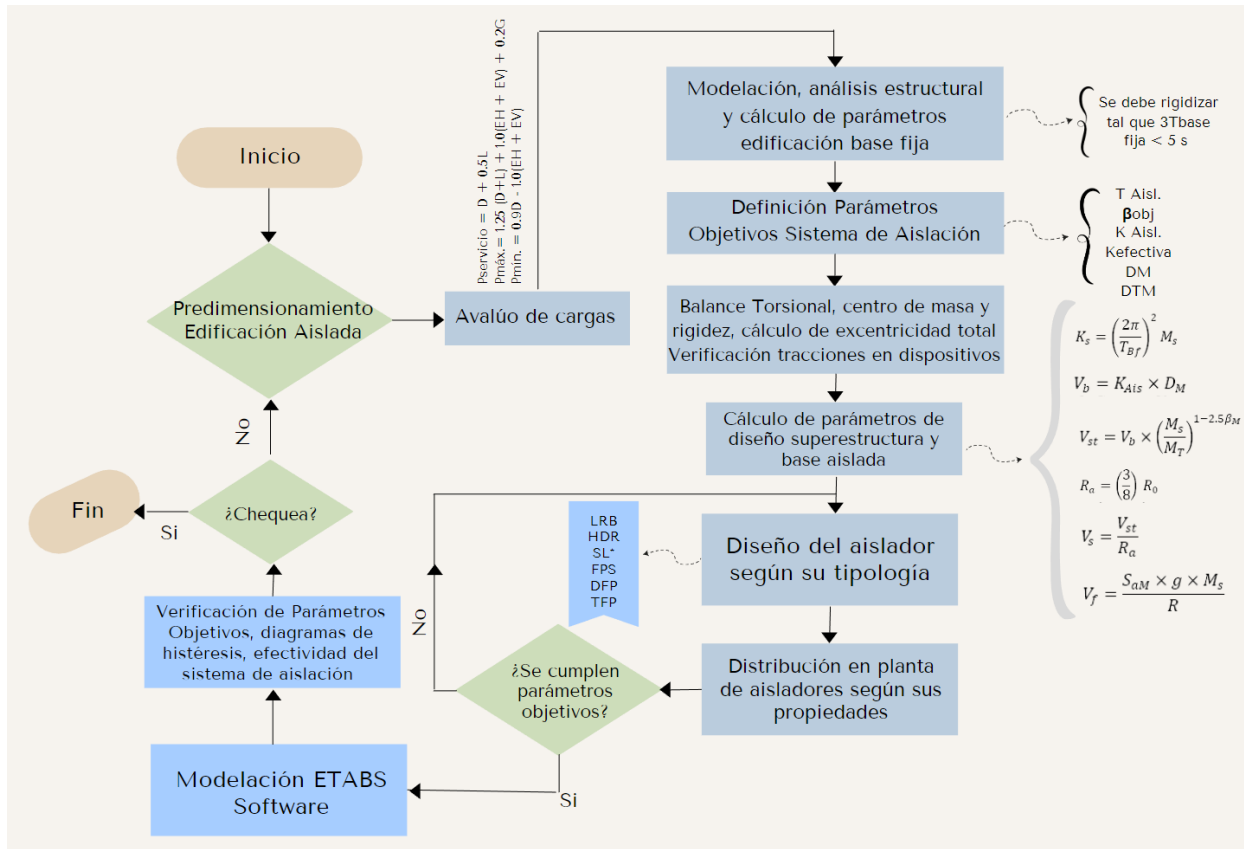


Figura 270. Metodología General Proceso de Diseño de Sistema de Aislación. Fuente: Propia.

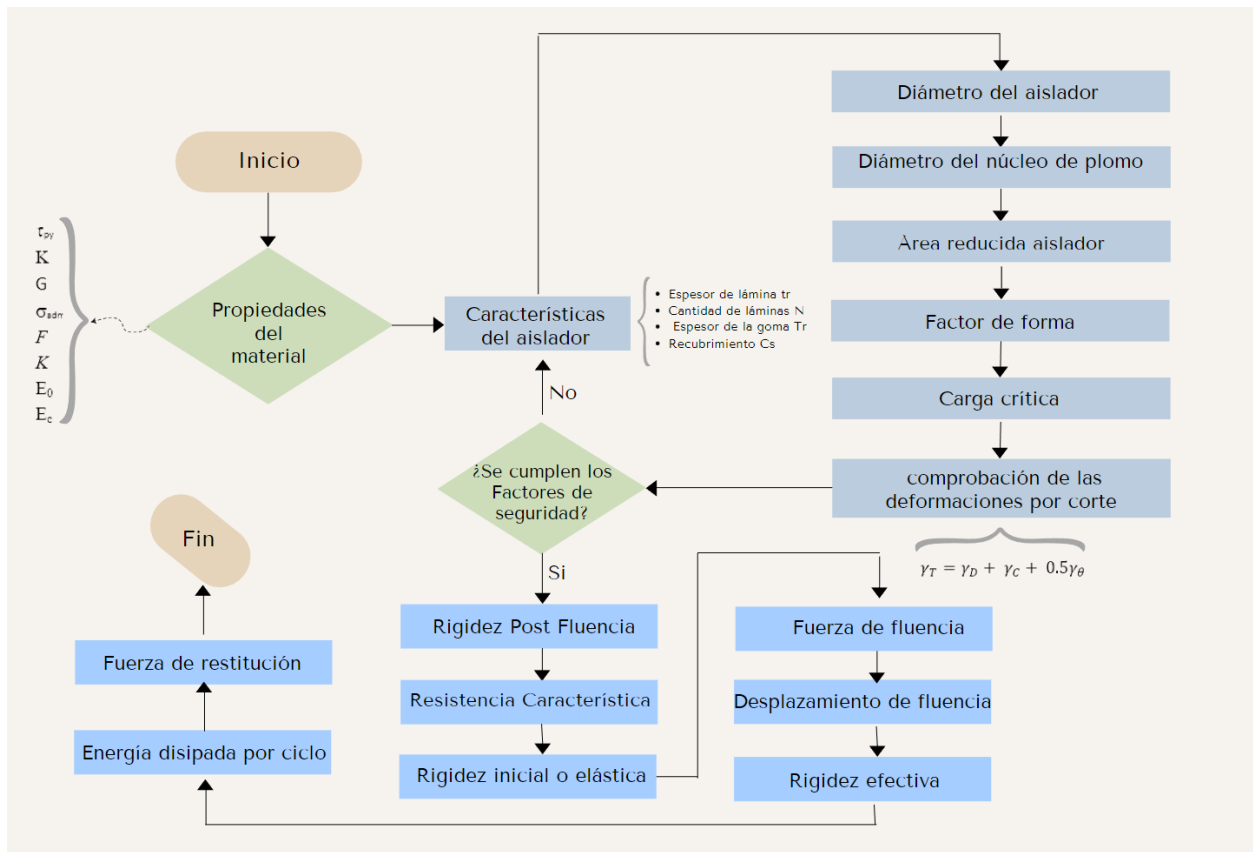


Figura 271. Metodología de Diseño de Aislador LRB. Fuente: Propia.

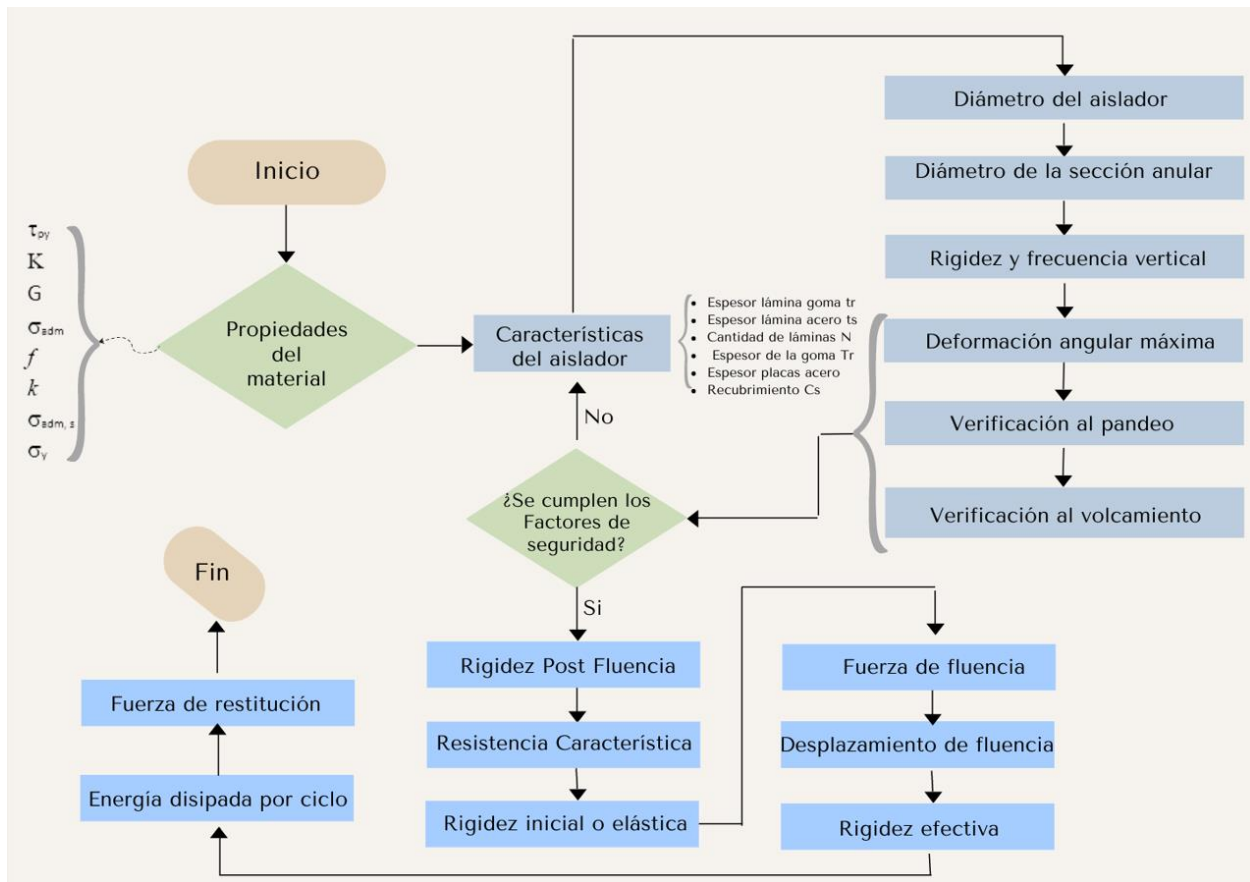


Figura 272. Metodología de Diseño de Aislador HDR. Fuente: Propia.

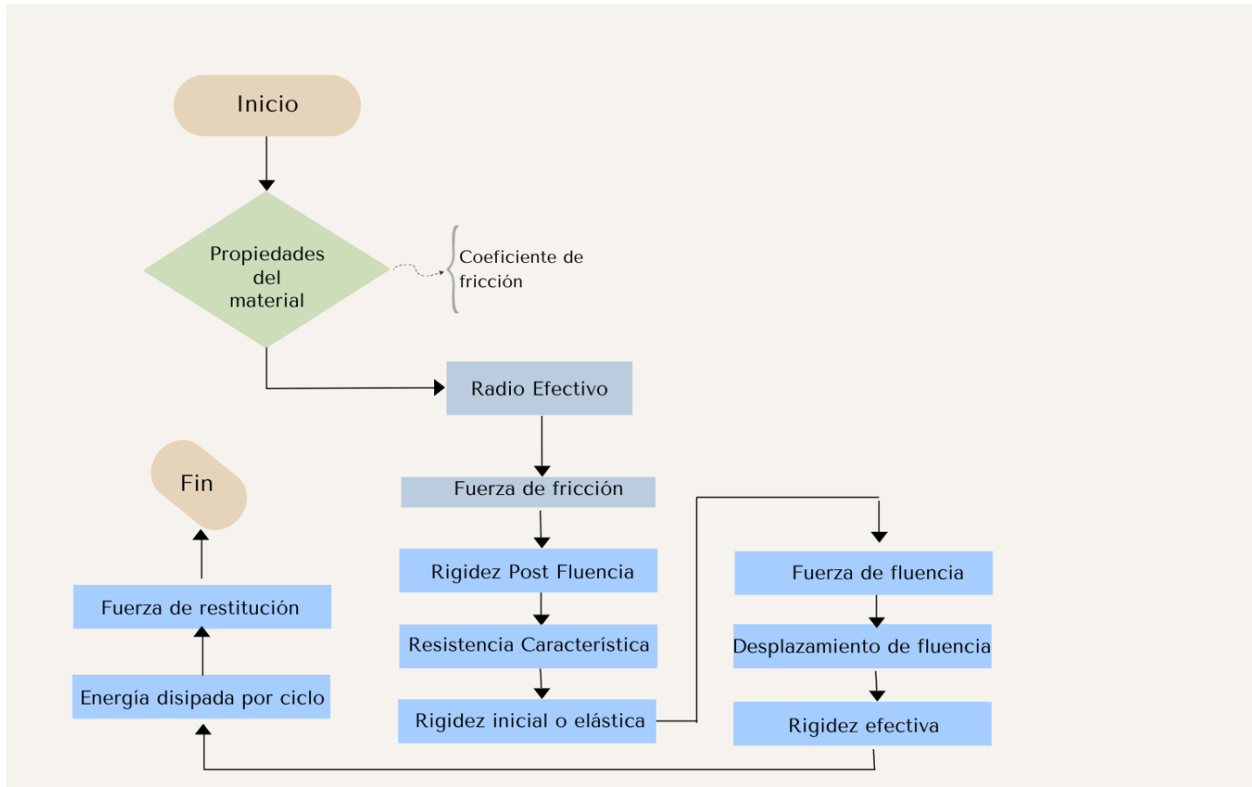


Figura 273. Metodología de Diseño de Aislador FPS. Fuente: Propia.

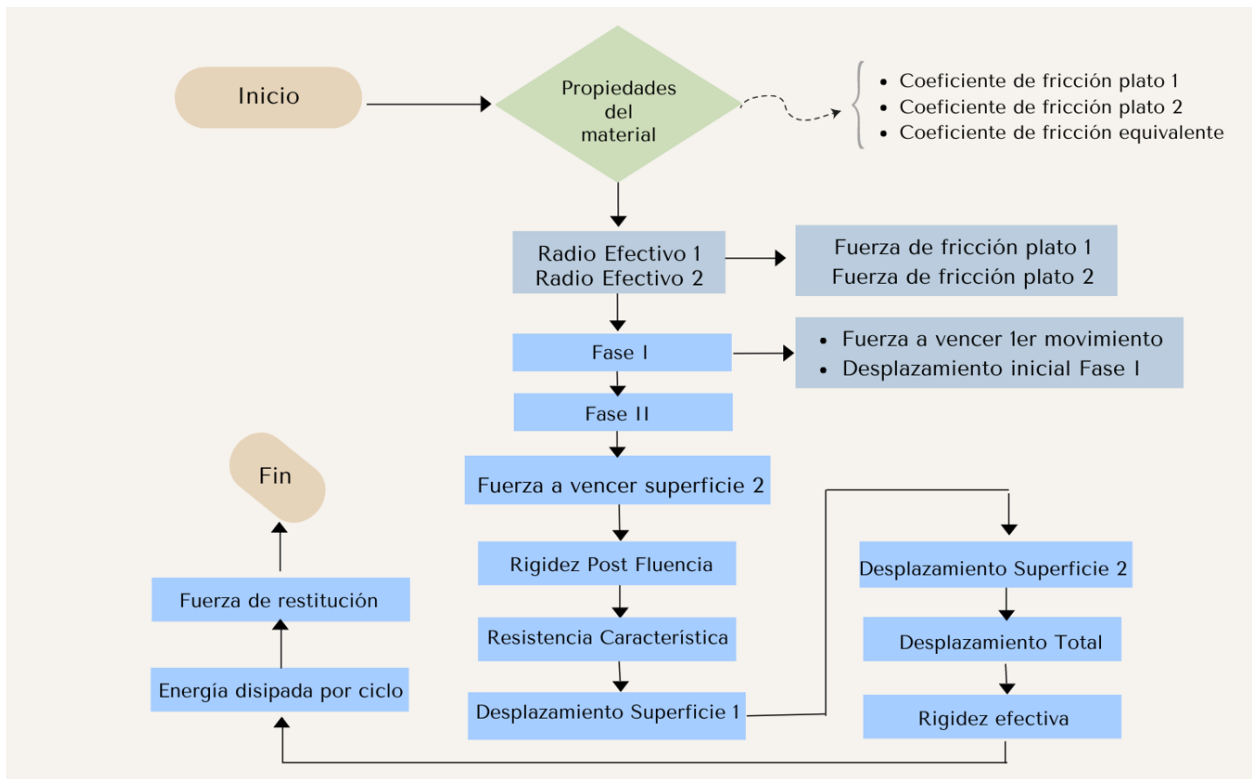


Figura 274. Metodología de Diseño de Aislador DFP. Fuente: Propia.

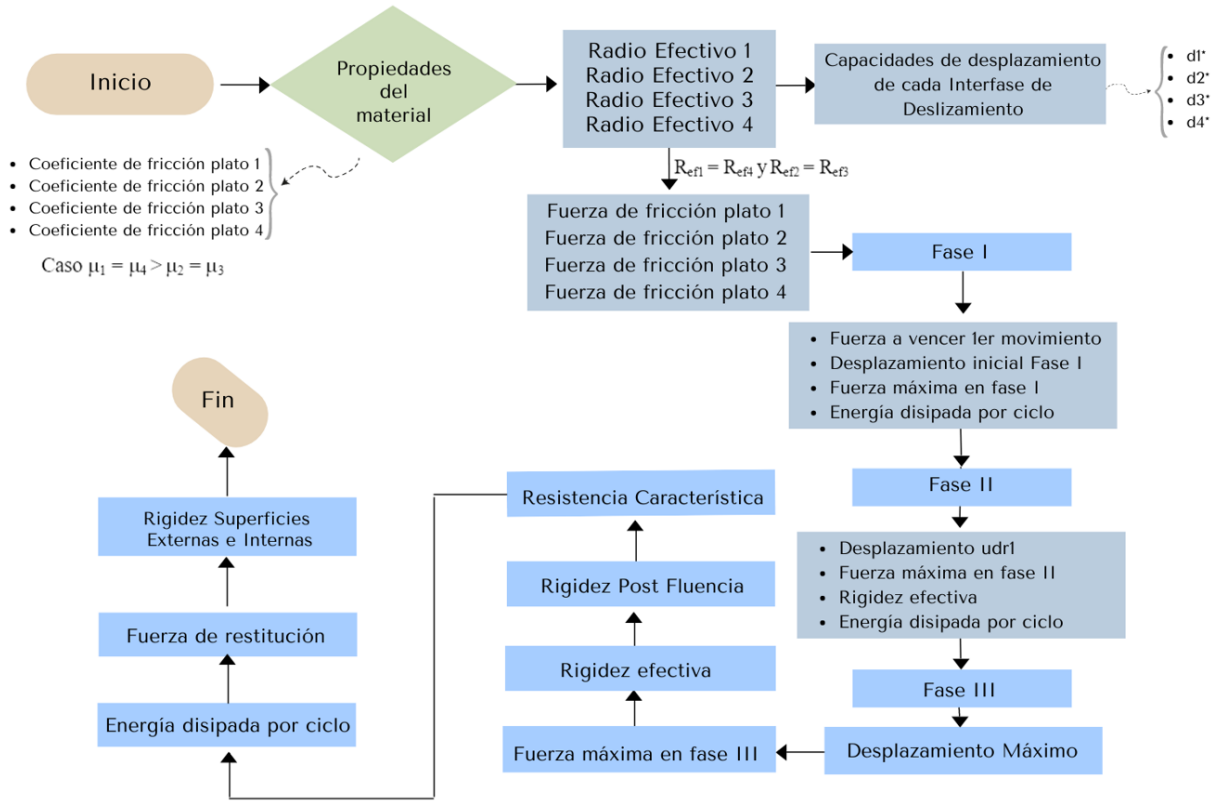


Figura 275. Metodología de Diseño de Aislador TFP. Fuente: Propia.