PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE UN EDIFICIO ALTO DE MUROS CON AISLACIÓN SÍSMICA PARA DIFERENTES CRITERIOS DE MODELAMIENTO Y MÉTODOS DE ANÁLISIS

LUIS EDGARDO MENDOZA CORTEZ

Informe de Actividad de Graduación para optar al Grado de Magíster en Ingeniería Estructural y Geotécnica

Profesor Supervisor:
JOSE LUIS ALMAZÁN

Santiago de Chile, Julio, 2014.

A mi familia y a mi futura esposa, por su constante apoyo y motivación.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Organización de los Estados Americanos OEA por el otorgamiento de la beca para mis estudio de postgrado, a la Pontificia Universidad Católica de Chile PUC, y al Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica por haber aceptado mi postulación, a los profesores del Magíster en Ingeniera Estructural y Geotécnica por haber compartido sus experiencias y conocimientos a lo largo del programa, al director del magíster Jorge Vásquez Pinillos por su atención, a la coordinadora del magíster Elena Cornejo Contardo por su colaboración y amabilidad y al profesor José Luis Almazán por su tiempo y buena disposición en la supervisión de este estudio.

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS iii

INDICE DE TABLAS viii

INDICE DE FIGURAS ix

RESUMEN xvi

ABSTRACT xvii

I. INTRODUCCION. 1

I.1 Objetivo del estudio. 1

I.2 Metodologia del estudio. 1

II. GEOMETRIA DEL MODELO 3

II.1 Descripcion del módelo. 3

II.2 Propiedades de los materiales del sistema estructural. 3

II.3 Cargas de gravedad. 5

II.4 Condiciones de sitio. 5

III. ANALISIS DEL MODELO BASE FIJA. 6

III.1 Demanda sísmica. 6

III.2 Definición del modelo matemático. 7

III.3 Suposiciones en el modelo matemático. 9

III.4 Método de análisis del modelo matemático. 10

III.5 Resultados del modelo base fija. 10

III.5.1 Modos de vibración de la estructura. 10

III.5.2 Drift y desplazamiento máximos por pisos. 13

III.5.3 Distribución de corte por piso y fuerza en la base. 14

IV. ANALISIS DEL MODELO CON BASE AISLADA. 15

IV.1 Demanda sísmica..... 15

IV.1.1 Espectro de diseño. 15

IV.1.2 Registro aceleración compatible con espectro de diseño. 16

IV.2 Modelo matemático del sistema con base aislada. 18

IV.3 Suposiciones del modelo matemático del sistema con base aislada..... 19

IV.4 Definición y análisis del sistema con aislador lineal. 20

IV.4.1 Definición propiedades del aislador lineal. 20

IV.4.2 Método de análisis del sistema aislado. 21

IV.4.3 Resultados del análisis del sistema aislado con aislador lineal. 22

IV.5 Definición del sistema aislado con FPS. 27

IV.5.1 Definición propiedades del aislador FPS. 27

IV.6 Definición del sistema aislado con LRB. 31

IV.6.1 Definición propiedades del aislador LRB. 31

IV.7 Análisis del Sistema de base aislada con FPS. 34

IV.7.1 Análisis de sensibilidad del método FNA para diferente número de modos, aislador FPS. 35

IV.7.2 Análisis de sensibilidad en el modelo matemático para diferente factor de amortiguamiento en la superestructura, aislador FPS. 41

IV.7. 3 Análisis de Sensibilidad para diferentes métodos de análisis no lineal, para el sistema con aisladores FPS. 46

IV.7.4 Análisis de sensibilidad en el método de análisis ID

para diferentes combinaciones del amortiguamiento tipo Rayleigh. 51
IV.7.5 Análisis de sensibilidad en el modelo matemático para diferente tipo de diafragma en el entrepiso, sistema aislado FPS. 55
IV.7.6 Respuesta de los cuatro modelos aislados con FPS. 60

IV.8 Análisis del Sistema de base aislada con LRB. 66

IV.8.1 Análisis de sensibilidad del método FNA para diferente número de modos, aislador LRB. 67
IV.8.2 Análisis de sensibilidad en el modelo matemático para diferente factor de amortiguamiento en la superestructura, aislador LRB. 73
IV.8.3 Análisis de sensibilidad para diferentes métodos de análisis no lineal, para el sistema con aisladores LRB. 78
IV.8.4 Respuesta de los cuatro modelos aislados con LRB. 83

IV.9 Comparación de respuestas de los sistemas FPS y LRB. 90

IV.9.1 Fuerza axial en los aisladores. 90
IV.9.2 Curvas fuerza – deformación de los aisladores 5 y 22. 91
IV.9.3 Drift y desplazamientos en la superestructura. 92
IV.9.4 Tiempo historia de los desplazamiento y cortantes en la base. 93
IV.9.5 Comparación de las respuestas máximas. 94
IV.9.6 Distribución de cortantes por piso. 95

IV.10 Diseño final de los aisladores. 97

IV.10.1 Geometría final del aislador FPS. 97
IV.10.2 Geometría final del aislador LRB. 98

V. RESULTADO DEL ESTUDIO. 101

V.1 Resumen de los resultados de los análisis de sensibilidad. 101

V.2 Conclusiones del Estudio. 104

BIBLIOGRAFIA 107

A N E X O S 108

Anexo A: Cálculo Demanda Sísmica. 109

Anexo B: Marco teórico de los métodos de análisis 112

Anexo C: Modos de vibración de los modelos base fija. 119

Anexo D: Resutados del análisis del sistema aislado 122

INDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla II-1: Valores de la sobre carga muerta y carga viva en las losas……...5

Tabla III-1: Detalle de los modos y factores de participación modal del modelo 2 de base fija…….....11

Tabla III-2: Detalle de los modos de vibración para los cuatro modelos base fija……..11

Tabla III-3: Fuerzas en la base de los modelos de base Fija……... 14

Tabla IV-1: Modos y factores de participación modal para el modelo 2 base aislada..... 23

Tabla IV-2: Modos de vibración para los cuatro modelos de base aislada……. 23

Tabla IV-3: Fuerzas en la base, Modelos con aislación basal tipo lineal…… 26

Tabla IV-4: Factores de participación modal y % de la carga gravitacional participante, análisis FNA diferente número de modos, aislador FPS…… 36

Tabla IV-5: Combinaciones amortiguamiento Rayleigh, análisis ID, aislador FPS……... 52

Tabla IV-6: Factores de participación modal y % de la carga gravitacional participante, análisis FNA diferente número de modos, aislador LRB…….. 68

Tabla IV-7: Propiedades mecánicas del aislador FPS…… 98

Tabla IV- 8: Propiedades mecánicas del aislador LRB……... 100

Tabla V–1: Resumen de resultados de los análisis al sistema con aisladores FPS……. 101

Tabla V–2: Resumen de resultados de los análisis al sistema con aisladores LRB…… 103

Tabla V–3: Resumen de las respuestas del sistema aislado para distintos aisladores FPS y LRB…… 104

INDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura II-1: Geometría en planta del edificio en análisis……4

Figura II-2: Vista en altura del edificio en análisis……4

Figura III-1: Espectro de diseño, modelo base fija……6

Figura III-2: Detalle 3D y planta del modelo 1…….. 7

Figura III-3: Detalle 3D y planta del modelo 2…….. 8

Figura III-4: Detalle 3D y planta del modelo 3…….. 8

Figura III-5: Detalle 3D y planta del modelo 4…….. 9

Figura III-6: Primeros tres modos de vibración, modelo 2 base fija……. 12

Figura III-7: Drift máximo de entrepiso, modelos base fija…….. 13

Figura III-8: Desplazamiento máximo de piso, modelos base fija……. 13

Figura III -9: Distribución de cortante por piso modelos base fija…… 14

Figura IV-1: Espectro de diseño para el modelo con base aislada……. 15

Figura IV- 2: Detalle de espectros aceleración sin escalar y escalado del registro *Campus Antumapu Santiago* con respecto al espectro objetivo…… 16

Figura IV-3: Detalle de los componentes de aceleración escalada y sin escalar del registro *Campus Antumapu Santiago*…… 17

Figura IV- 4: Detalle de los espectros escalados de aceleración, velocidad y desplazamiento del registro *Campus Antumapu Santiago*…… 17

Figura IV-5: Detalle de los componentes del sistema de base aislada…….. 18

Figura IV-6: Distribución en planta de la ubicación del aislador……... 19

Figura IV-7: Detalle de la distribución de la carga de gravedad por apoyo para un análisis estático……. 21

Figura IV-8: Principales modos de vibración del modelo 2 base aislada……. 24

Figura IV-9, Diagramas histéreticos del aislador lineal en la dirección X y Y…… 25

Figura IV-10, Drift máximo del sistema con base aislada……. 26

Figura IV-11: Esquema de un aislador FPS ……. 27

Figura IV-12: Modelo histeretico del aislador FPS…….. 28

Figura IV-13: Simplificación matemática del FPS……28

Figura IV-14: Esquema de un aislador LRB……. 31

Figura IV-15: Modelo histeretico del aislador LRB……. 31

Figura IV-16: Curva histerética linealización del sistema LRB……..... 33

Figura IV-17: Fuerza axial máxima y mínima en los aisladores FPS, para un análisis FNA con diferente número de modos…….. 36

Figura IV-18: Curvas fuerza - deformación de los aisladores 5 y 22 FPS, análisis FNA para diferente número de modos. ……. 37

Figura IV-19: Drift y desplazamiento en la superestructura, análisis FNA para diferentes número de modos, aislador FPS. ……. 38

Figura IV- 20: Tiempo Historia del desplazamiento y cortante en la base en la dirección X y Y, análisis FNA para diferentes número de modos, aislador FPS. …….. 39

Figura IV- 21: Comparación de la respuesta máxima en el sistema con FPS, análisis FNA para diferentes números de modos. …… 40

Figura IV- 22: Fuerza axial máxima y mínima en los aisladores FPS, análisis FNA para distintos factores de amortiguamiento en la superestructura…….41

Figura IV- 23: Curvas fuerza - deformación de los aisladores 5 y 22 FPS, análisis FNA para distintos factores de amortiguamiento en la superestructura……...42

Figura IV- 24: Drift y desplazamiento en la superestructura, análisis FNA para distintos factores de amortiguamiento en la superestructura, aislador FPS…….43

Figura IV- 25: Tiempo historia del desplazamiento y cortantes en la base dirección X y Y, análisis FNA para distintos factores de amortiguamiento en la superestructura, aislador FPS…… 44

Figura IV- 26: Comparación de la respuesta máxima en el sistema con FPS, análisis FNA para distintos factores de amortiguamiento en la superestructura…….. 45

Figura IV- 27: Fuerza axial máxima y mínima en los aisladores FPS, para diferente métodos de análisis ID y FNA…….. 46

Figura IV- 28: Curvas fuerza - deformación de los Aisladores 5 y 22 FPS, para diferentes métodos de análisis ID y FNA……. 47

Figura IV- 29: Drift y desplazamiento en la superestructura, para diferentes métodos de análisis ID y FNA, aisladores FPS……48

Figura IV- 30: Tiempo historia del desplazamiento y cortante en la base dirección X y Y, para diferentes métodos de análisis ID y FNA, aisladores FPS…….....49

Figura IV- 31: Comparación de la respuesta máxima en el sistema con FPS, para diferentes métodos de análisis ID y FNA……..50

Figura IV- 32: Detalle de las curvas para las distintas combinaciones del amortiguamiento tipo Rayleigh, análisis ID, aislador FPS…….. 51

Figura IV- 33: Fuerza axial máxima y mínima en los aisladores FPS, para diferentes combinaciones de amortiguamiento inherente en la superestructura análisis ID…… 52

Figura IV- 34: Curvas fuerza – deformación en la dirección X de los aisladores 5 y 22 FPS, para diferentes combinaciones de amortiguamiento inherente en la superestructura análisis ID……53

Figura IV- 35: Curvas fuerza – deformación en la dirección Y de los aisladores 5 y 22 FPS, para diferente combinaciones de amortiguamiento inherente en la superestructura análisis ID……54

Figura IV- 36: Fuerza axial máxima y mínima en los aisladores FPS, para diferente tipo de diafragmas, análisis FNA……. 55

Figura IV- 37: Curvas fuerza - deformación de los Aisladores 5 y 22 FPS, para diferente tipo de diafragmas, análisis FNA……... 56

Figura IV- 38: Drift y desplazamiento en la superestructura, para diferente tipo de diafragmas, análisis FNA, aisladores FPS……57

Figura IV- 39: Tiempo historia del desplazamiento y cortante en la base dirección X y Y, análisis FNA para distintos tipos de diafragmas, aislador FPS…….58

Figura IV- 40: Comparación de la respuesta máxima en el sistema con FPS, análisis FNA para distintos tipos de diafragmas…… 59

Figura IV- 41: Fuerza axial máxima y mínima en los aisladores FPS para los 4 modelos, método de análisis FNA…… 60

Figura IV- 42: Curvas fuerza - deformación de los aisladores 5 y 22 FPS para los 4 modelos, análisis FNA…….. 61

Figura IV- 43: Drift y desplazamiento en la superestructura para los 4 modelos aislados con FPS, análisis FNA…….. 62

Figura IV- 44: Tiempo historia del desplazamiento y cortante en la base dirección X y Y, para los 4 modelos aislados con FPS, análisis FNA…….. 63

Figura IV- 45: Comparación de la respuesta máxima en los cuatro modelos con aisladores FPS, análisis FNA…… 64

Figura IV- 46: Cortante por piso para los 4 modelos FPS, método de análisis FNA…. 65

Figura IV- 47: Distribución de cortantes por piso para el modelo 2 con aisladores FPS, comparación del cortante total con respecto a la suma de cortante por muro, análisis FNA……66

Figura IV- 48: Fuerza axial máxima y mínima en los aisladores LRB, para un análisis FNA con diferentes número de modos…… 68

Figura IV- 49: Curvas fuerza - deformación de los Aisladores 5 y 22 LRB, análisis FNA para diferente número de modos. …… 69

Figura IV- 50: Drift y desplazamiento en la superestructura, análisis FNA para diferentes número de modos, aislador LRB…….. 70

Figura IV- 51: Tiempo Historia del desplazamiento y cortante en la base en la dirección X y Y, análisis FNA para diferentes número de modos, aislador LRB…….. 71

Figura IV- 52: Comparación de la respuesta máxima en el sistema con LRB, análisis FNA para diferente número de modos. …… 72

Figura IV- 53: Fuerza axial máxima y mínima en los aisladores LRB, análisis FNA para distintos factores de amortiguamiento en la superestructura……. 73

Figura IV- 54: Curvas fuerza - deformación de los aisladores 5 y 22 LRB, análisis FNA para distintos factores de amortiguamiento en la superestructura…….. 74

Figura IV- 55: Drift y desplazamiento en la superestructura, análisis FNA para distintos factores de amortiguamiento en la superestructura, aislador LRB……... 75

Figura IV- 56: Tiempo historia del desplazamiento y cortante en la base dirección X y Y, análisis FNA para distintos factores de amortiguamiento en la superestructura, aislador LRB……... 76

Figura IV- 57: Comparación de la respuesta máxima en el sistema con LRB, análisis FNA para distintos factores de amortiguamiento en la superestructura…… 77

Figura IV-58: Fuerza axial máxima y mínima en los aisladores FPS, para diferente métodos de análisis ID y FNA……. 78

Figura IV- 59: Curvas fuerza - deformación de los aisladores 5 y 22 LRB, para diferentes métodos de análisis ID y FNA……. 79

Figura IV- 60: Drift y desplazamiento en la superestructura, para diferentes métodos de análisis ID y FNA, aisladores LRB…….. 80

Figura IV- 62: Tiempo historia del desplazamiento y cortante en la base dirección X y Y, para diferentes métodos de análisis ID y FNA, aisladores LRB……... 81

Figura IV- 63: Comparación de la respuesta máxima en el sistema con LRB, para diferentes métodos de análisis ID y FNA……. 82

Figura IV- 64: Fuerza axial máxima y mínima en los aisladores LRB para los 4 modelos, método de análisis FNA……83

Figura IV- 65: Curvas fuerza - deformación de los aisladores 5 y 22 LRB para los 4 modelos, método de análisis FNA…… 84

Figura IV- 66: Drift y desplazamiento en la superestructura para los 4 modelos aislados LRB, método de análisis FNA……. 85

Figura IV- 67: Tiempo historia del desplazamiento y cortante en la base dirección X y Y, para los 4 modelos aislados con LRB, análisis FNA…….. 86

Figura IV- 68: Comparación de la respuesta máxima en el sistema con LRB, para los 4 modelos, método de análisis FNA……. 87

Figura IV- 69: Cortante por piso para los 4 modelos LRB, método de análisis FNA… 88

Figura IV- 70: Distribución de cortantes por piso para el modelo 2 con aisladores LRB, comparación del cortante total con respecto a la suma de cortante por muro, análisis FNA……89

Figura IV- 71: Fuerza axial máxima y mínima en los aisladores FPS y LRB, modelo 2, método de análisis FNA…… 90

Figura IV- 72: Curvas fuerza - deformación de los aisladores 5 y 22 modelo 2 con aisladores FPS y LRB, análisis FNA…… 91

Figura IV- 73: Drift y desplazamiento en la superestructura para el modelo 22 con los sistemas FPS y LRB, análisis FNA……. 92

Figura IV- 74: Tiempo historia del desplazamiento y cortante en la base dirección X y Y, para el modelo 2 con los sistemas FPS y LRB, análisis FNA…….. 93

Figura IV- 75: Comparación de la respuesta máxima para el modelo 2 con los sistemas FPS y LRB, análisis FNA……. 94

Figura IV- 76: Cortante por piso para el modelo 2 con los sistemas FPS y LRB, análisis FNA …….. 95

Figura IV- 77: Distribución de cortantes por piso para el modelo 2 con los sistemas FPS y LRB análisis FNA, comparación del cortante total con respecto a la suma de cortante por muro…….96

Figura IV- 78 Geometría final del aislador FPS…… 97

Figura IV- 79: Fuerza axial máxima y mínima en los aisladores LRB, para el modelo 2 con base aislada para T = 3 seg, T = 5 seg y T = 5 seg modificado……99

Figura IV- 80: Curvas fuerza deformación del aislador 5 LRB, para el modelo 2 con base aislada para T = 3 seg, T = 5 seg y T = 5 seg modificado……99

Figura IV- 81 Geometría final del aislador LRB…….. 100

RESUMEN

El presente trabajo analiza la respuesta sísmica de un edificio de base aislada de 17 niveles compuesto por muros de hormigón armado. La primer parte del documento describe la respuesta sísmica del edificio a base fija, cuyo objetivo fue determinar el espesor de muro que cumpliera con los drift de piso estipulados por la norma chilena de diseño sísmico de edificios NCh 433-1996, pero con la demanda sísmica definida por la norma chilena análisis y diseño de edificios con aislación sísmica NCh 2745, el espectro de diseño se calculó para una zona sísmica 3 y un suelo tipo III. Definida la geometría, al edificio se le incorporó el sistema de aislación basal, se consideró analizar la respuesta para dos tipos de sistema de aislación, el primer sistema formado por aisladores de péndulo friccional conocido por sus siglas en inglés FPS y el segundo sistema formado por aislador elastómeros con núcleo de plomo conocido por sus siglas en inglés LRB. Y con el objetivo de comprender el desempeño sísmico del edificio aislado, ambos sistemas se sometieron a una serie de estudio de sensibilidad para diferentes parámetros en el modelo matemático y en el método de análisis, estos estudios consistían en comparar la respuesta sísmica de los aisladores y la superestructura para: diferentes número de vectores Ritz del análisis modal no lineal, diferentes factores de amortiguamiento inherente de la superestructura, la respuesta para el análisis dinámico modal no lineal y el análisis dinámico no lineal por integración directa , diferentes tipos de diafragma del entrepiso y finalmente para distintos métodos de modelamiento de la superestructura. Los resultados del análisis mostraron que las respuestas del sistema con aisladores FPS son muy sensibles al cambio de los parámetros mientras que las respuestas del sistema con aisladores LRB varían muy poco con el cambio de los parámetros, además el sistema con aisladores LRB presentaba respuestas sobre los aisladores mucho menores que los sistemas con aisladores FPS.

ABSTRACT

This paper analyses the seismic response of a 17 story building with seismic isolation composed of bearing wall systems. The first part of this paper describes the seismic performance of structure with fixed base, whose objective was to determine the reinforced concrete wall thickness that achieve the floor drift stapled by the seismic design of structures Chilean standard NCh 433-1996, but with the seismic demand defined by the Chilean standard of analysis and design of seismically isolated buildings, the site target spectrum was calculated for a seismic zone 3 and type III soil. Once defined the structure geometry, it incorporated the base isolated structure, it was considered to analyze the response for two types of insulation systems, the first one with frictional pendulum system (FPS), and the second system with lead rubber bearing (LRB). and with the object of understand the seismic response of structure with seismic isolation, both system was analyzed with a several numbers of sensitive studies for different parameters on the mathematic model and the analysis method, these studies compare the seismic response of the isolated system for: different numbers of Ritz vectors of the fast nonlinear analysis, different types of story diaphragm, different types of method of analysis: fast nonlinear analysis and the nonlinear dynamic analysis by the direct integration and finally for different superstructure modeling methods. The analysis results showed that the seismic response of the system FPS are too sensitive to the parameters changing, while the seismic response of the system LRB presents small variations with the changes of the parameters, besides the system LRB showed minimal responses on the results of the FPS system.

I. INTRODUCCION.

En la actualidad se ha vuelto más frecuente la construcción de edificios aislados en la base, estos sistemas se han vuelto una alternativa confiable en la reducción de los daños estructurales frente a fuerzas sísmicas, sin embargo los sistemas aislados no pueden ser analizados ni diseñados por la ingeniería sismoresistente convencional, cuyas teorías se basan en el balance de la resistencia y capacidad de deformación de la estructura en el rango lineal, los sistemas aislados son modelos de naturaleza no lineal por lo que su análisis debe ser dinámico no lineal, el cual debe capturar y modelar el comportamiento histeretico no lineal de los aisladores, además el análisis debe de verificar el verdadero comportamiento estructura aislada con el fin de obtener diseños más eficientes y seguros. Este estudio nace con el fin de entender el comportamiento de una estructura aislada, esta tesis consistirá en hacer un análisis dinámico no lineal a un sistema con aislación basal para distintos criterios en el modelo matemático y diferentes métodos de solución. Se conocerá la respuesta para diferentes tipos de aisladores, distinto número de modos vibración, diferentes factores de amortiguamiento inherente de la superestructura, distintos modelos del diafragma de entrepiso, diferentes métodos de modelamiento del sistema estructural y diferentes método de solución de la ecuación de movimiento.

I.1 Objetivo del Estudio.

El objetivo principal de este trabajo es ver el comportamiento sísmico de un edificio de muros alto con aislación basal, el comportamiento sísmico será evaluado para diferentes criterios en el modelo matemático y métodos de solución del sistema no lineal.

I.2 Metodología del Estudio.

Primero se hará un análisis sísmico del edificio considerando su base fija, esto se hará con el fin de determinar la geometría de los muros cuyo desempeño sísmico cumpla con Norma Chilena de diseño sísmico de edificios NCh 433-1996 modificada 2009, DS 61

sin embargo la demanda sísmica será tomada por la norma Chilena análisis y diseño de edificación con aislación sísmica NCh 2745-2003.

Definida la geometría de los muros, al edificio se le incorporará el sistema de aislación basal, se definirán tres tipos de sistemas de aislación, el primer será un sistema de aislación basal de comportamiento lineal, el segundo un sistema de aislación con aisladores de péndulo de fricción definido en sus siglas en inglés FPS (*Frictional Pendulum System*) y el tercero un sistema de aislación con aisladores de goma con centro de plomo definido por sus siglas en inglés LRB (*Lead Rubber Bearing*), el objetivo del análisis del primer sistema será determinar las propiedades lineales de los aisladores para un periodo de desempeño objetivo, este resultados servirán de base para calcular los aisladores FPS y LRB.

Definido los aisladores FPS y LRB, se hará el análisis dinámico no lineal del sistema aislado con una demanda sísmica basada en la norma NCh 2745-2003. El análisis consistirá en hacer una serie de estudios de sensibilidad en los modelos aislados, esto con el fin de observar la respuesta sistema para distintos criterios en el modelo matemático y métodos de solución. El modelo matemático para ambos aisladores será analizado para: diferentes número de modos 25, 75, 150, 300, 600 modos, diferentes factores de amortiguamiento inherente de la superestructura $\xi = 0\%$, 2%, 5%, diferente método de solución del sistema: análisis dinámico modal no lineal FNA, método análisis dinámico no lineal por integración directa ID, diferentes métodos de modelamiento de la superestructura, 3 modelos donde los muros están representados por elementos finitos FEM y un modelo donde el muro esta representado por FRAME con canchos rígidos y solo para el modelo aislado con FPS se hará análisis de sensibilidad de la respuesta para distintos tipos de diafragma del entrepiso: diafragma flexible y rígido, diferentes combinaciones del amortiguamiento tipo Rayleigh en la superestructura.

Finalmente, se presentarán los resultados de los estudios de sensibilidad y a partir de estos se definirán las conclusiones.

II. GEOMETRIA DEL MODELO

II.1 Descripción del Modelo.

El modelo de análisis tiene una geometría típica de un edifico de apartamentos compuesto por un buen número de muros de hormigón reforzado en ambas direcciones, la geometría del edificio en planta se define regular con longitud de lados de 30 m x 16.2 m generando una relación 1:8, con un área total en planta de 486 m^2, el edificio posee una altura total de 59.5 m, repartido en 17 niveles con una altura por piso de 3.5 m, la geometría del modelo en análisis se detalla en la Figura II-1 y Figura II-2.

II.2 Propiedades de los materiales del sistema estructural.

Las propiedades de los materiales que componen los muros del sistema es:

a) Hormigón: Resistencia a la compresión 28 días de 0.3 $tonf/cm^2$ y un peso específico de 2.4 $tonf/m^3$.
b) Acero de Refuerzo: Se empleará acero A630-420H que posee una resistencia a la fluencia de 4.2 $tonf/cm^2$ y resistencia última de 6.3 $tonf/cm^2$ y un peso específico de 7.8 $tonf/m^3$.

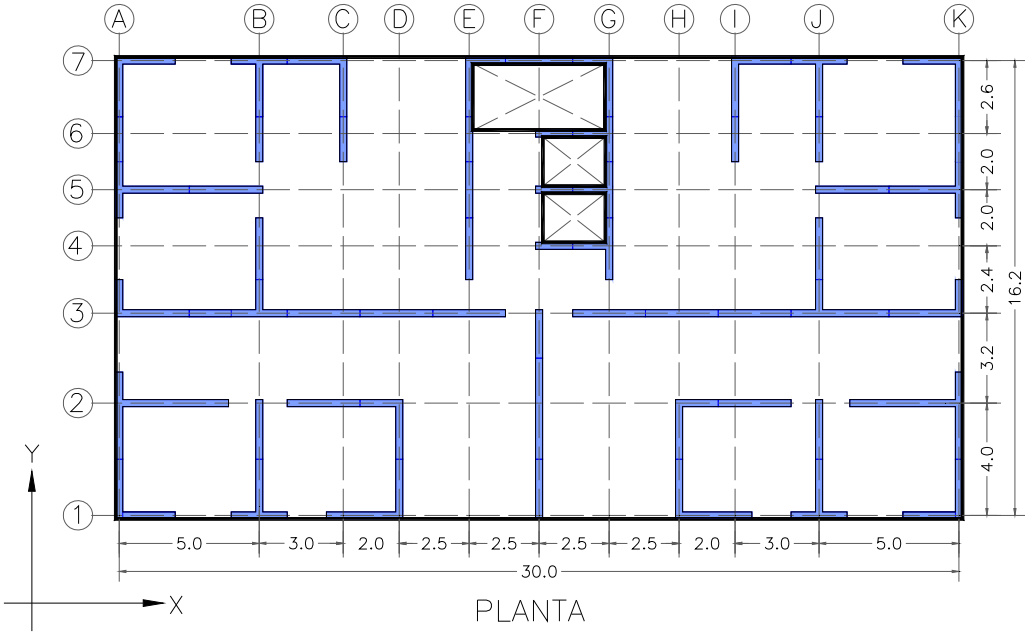


Figura II-1: Geometría en planta del edificio en análisis.

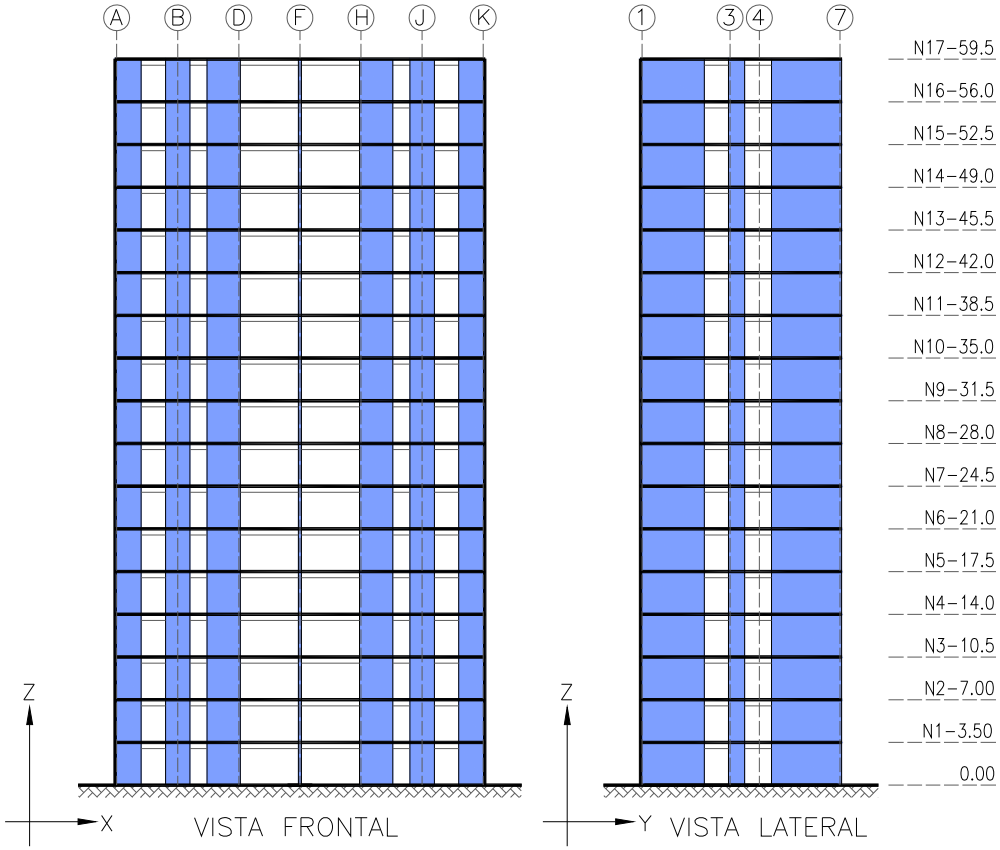


Figura II-2: Vista en altura del edificio en análisis.

II.3 Cargas de Gravedad.

Se definen tres tipos de carga de gravedad: la primera como el peso propio de elementos estructurares del sistema Dead, la segunda el peso de los elementos no estructurales definidos como una sobrecarga muerta SD y tercero el peso de la carga viva sobre las losas Live, los valores de carga de gravedad sobre las losas se detallan en la tabla II-1.

Tabla II-1: Valores de la sobre carga muerta y carga viva en las losas.

Nivel	**Sobrecarga muerta SD [tonf/m^2]**	**Cargas viva Live [tonf/m^2]**
1-17	0.15	0.25

II.4 Condiciones de Sitio.

El objetivo de nuestro análisis es observar la respuesta sísmica del edificio, por lo que consideramos que éste mostrará su comportamiento más claro cuando la demanda sísmica sea mayor, por lo que se considerará que el edificio se ubica en una Zona Sísmica 3 y tipo de Suelo III clasificación de acuerdo a ala NCh 2745-2003.

III. ANALISIS DEL MODELO BASE FIJA.

Esta sección se describe los criterios empleados para el desarrollo y el análisis del modelo matemático en base fija, el objetivo de este análisis será obtener las dimensiones de los muros que cumplan con los criterios de Drift de piso para una demanda sísmica específica.

III.1 Demanda Sísmica.

La demanda sísmica del modelo será definida a partir del espectro de diseño descrito por la Norma NCh 2745-2003, sin embargo el valor de reducción de la demanda sísmica R será tomada de la Norma NCh 433 -1996 modificada en 2009, se opta por este criterio de análisis con la finalidad de comparar bajo una misma demanda sísmica el sistema de base fija con el sistema aislado. De acuerdo a las condiciones de sitio tenemos zona sísmica 3, suelo tipo III y un factor de reducción R = 7, valor correspondiente a sistemas de muro de hormigón armado. El espectro de diseño se detalla en la Figura III-1. Los valores de cálculo se detallan en Anexo A-2

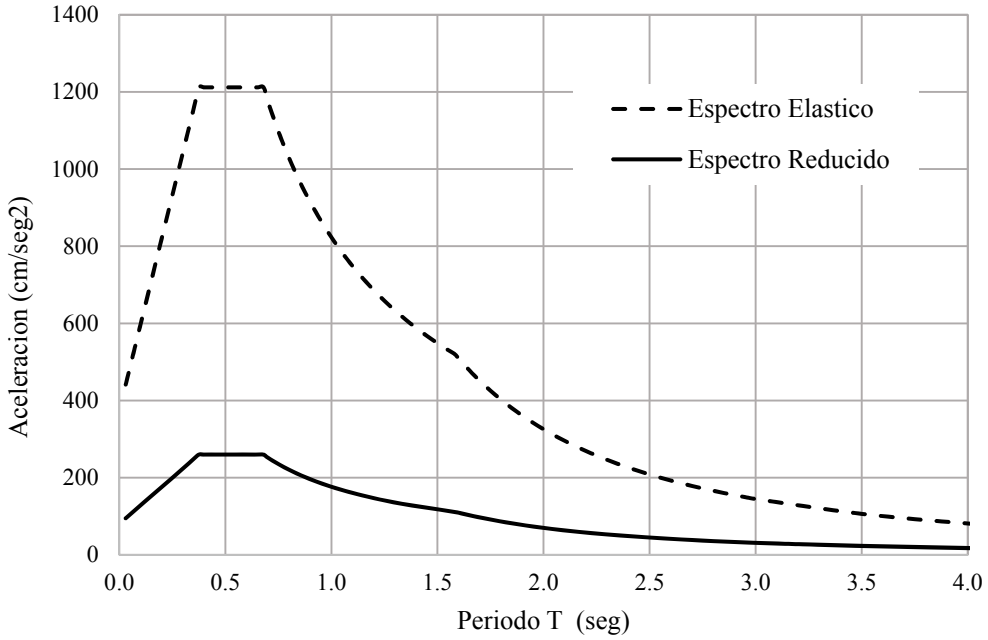


Figura III-1: Espectro de diseño, Modelo base fija.

III.2 Definición del Modelo Matemático.

El modelo matemático del sistema se desarrolló y analizó usando el programa SAP2000, para este análisis se han creado cuatro modelos del edificio, esto se hace con el fin de observar el comportamiento del sistema para diferentes formas de modelamiento determinadas en base a las prácticas profesionales más empleadas, a continuación se describen los modelos de análisis.

a) **Modelo 1**: Modelo matemático basado en elementos finitos, los muros y las losas se han modelado con elemento tipo Shell discretizados en elementos cuadrados de 0.50 x 0.50 m. La Figura III-2 detalla una vista 3D y planta del modelo 1.

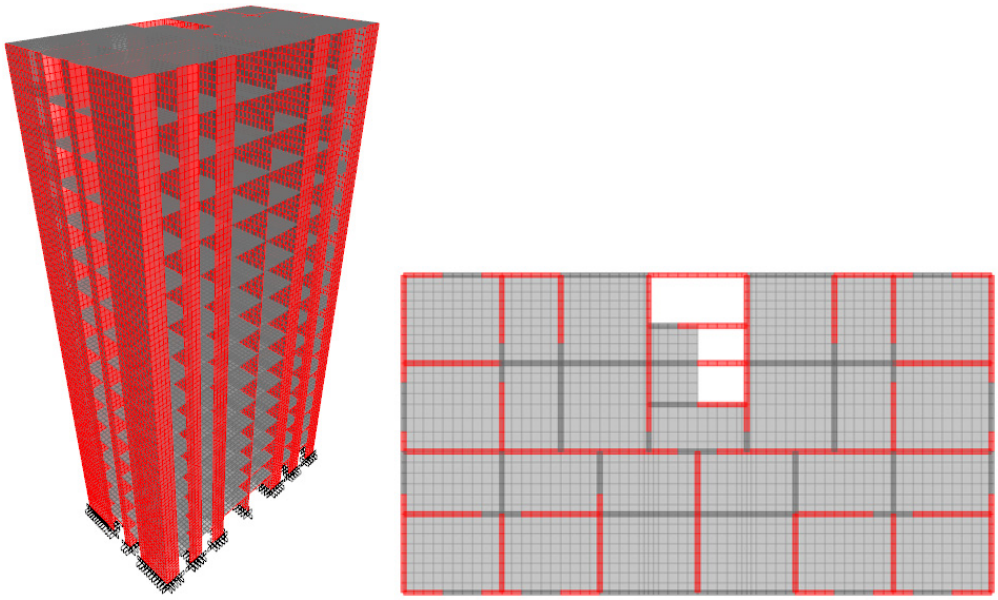


Figura III-2: Detalle 3D y planta del Modelo 1.

b) **Modelo 2**: Modelo matemático basado en elementos finitos, los muros y las losas se han modelado con elemento tipo Shell discretizado en elementos cuadrados 1.0 x 1.0 m. La Figura III-3 detalla una vista 3D y planta del modelo 2.

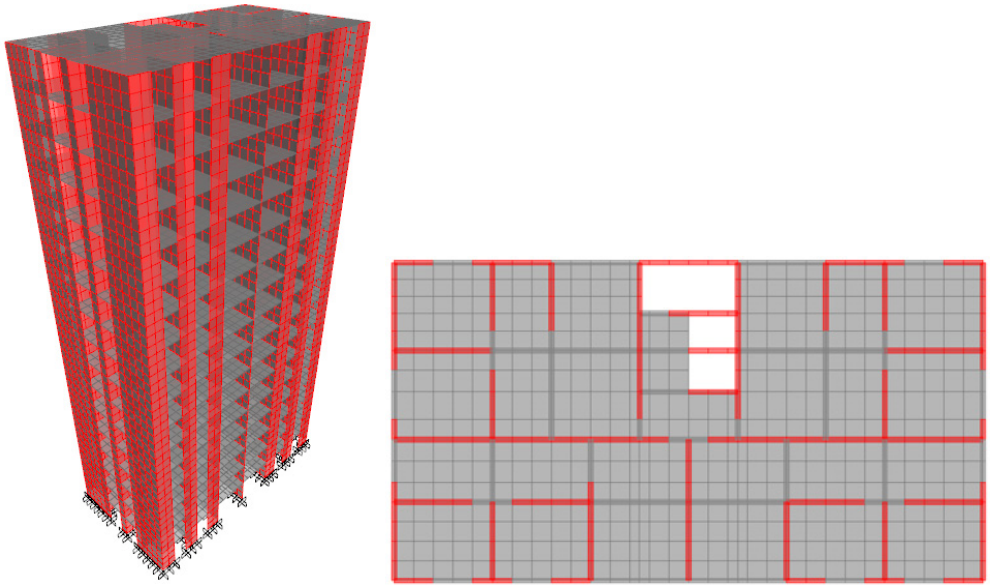


Figura III-3: Detalle 3D y planta del Modelo 2.

c) **Modelo 3**: Modelo matemático basado en elementos finitos, los muros y las losas se han modelado con elemento tipo Shell, los muros no han sido discretizados, la losa está discretizada en los puntos donde hay unión entre elementos. La Figura III-4 detalla una vista 3D y planta del modelo 3.

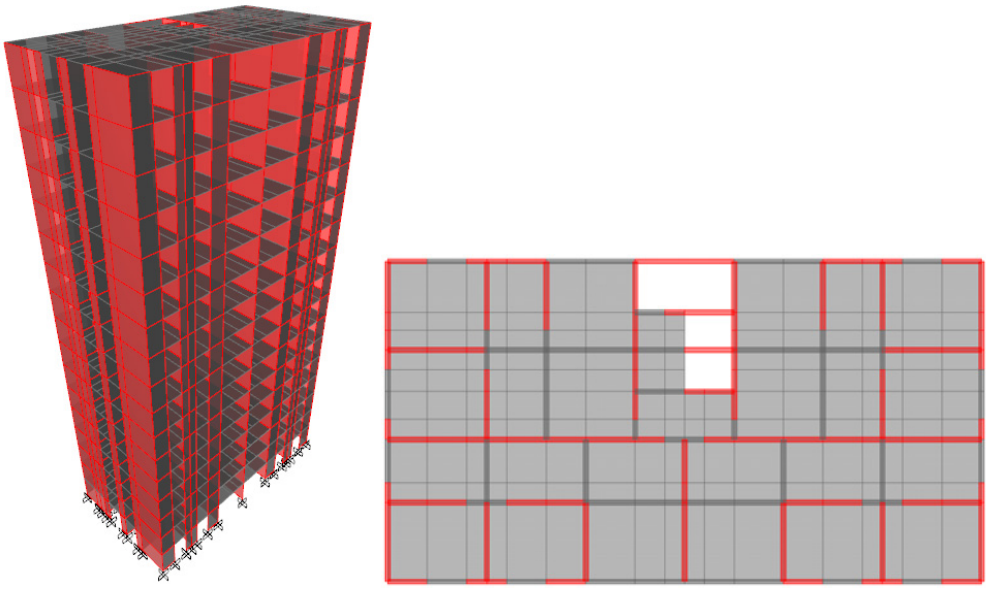


Figura III-4: Detalle 3D y planta del Modelo 3.

d) **Modelo 4**: Modelo matemático se basa en que los muros se modelaran con elementos tipo frame con cachos rígidos, las losas se ha modelado con elementos tipo Shell discretizada en los puntos donde existe unión entre elementos La Figura III-5 detalla una vista 3D y planta del modelo 4.

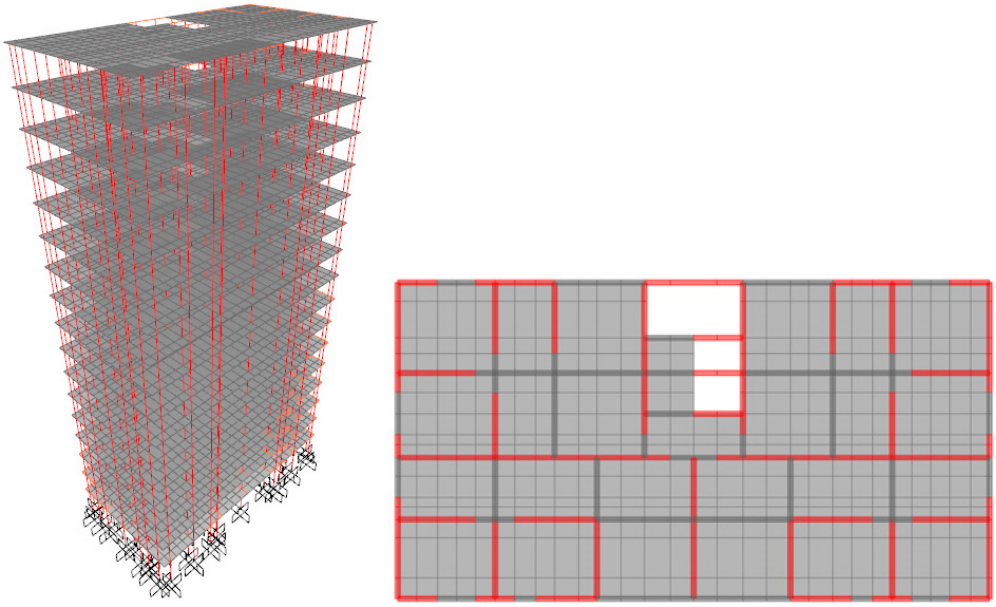


Figura III-5: Detalle 3D y planta del Modelo 4.

III.3 Suposiciones en el Modelo Matemático.

El modelo matemático con base fija será analizado bajo los siguientes supuestos:

a) Se definirá como masa sísmica el 100% de la carga muerta, el 100% de la sobrecarga muerta y el 50 % de la carga viva.
b) Se considera en el sistema que los entrepisos sean modelados como diafragma flexible, la flexibilidad estará dada por las propiedades mecánicas de los elementos Shell que conforman la losa.
c) El factor de amortiguamiento inherente del sistema será del 2%.

d) Comportamiento elástico del modelo, se considera que todos los elementos que conforman el modelo tendrán un comportamiento elástico, el modelo no considera comportamiento no-lineal geométrico.
e) El edificio se considera totalmente empotrado en su base, no se considera interacción suelo estructura.

III.4 Método de Análisis del Modelo Matemático.

La respuesta sísmica del modelo será estimada partir de un análisis modal espectral con una estimación de la respuesta por SRSS, el objetivo del análisis será obtener una geometría que cumpla con los drift máximo de 0.0025 cm/cm límite estipulado en la NCh 2745 condición que deberá cumplirse para la demanda sísmica, debido a que la geometría global del modelo ya está definida, el análisis se resume en encontrar el espesor del muro que cumpla con el requisito de la deriva de piso. El marco teórico de este análisis se detalla en Anexo B-1.

III.5 Resultados del Modelo Base fija.

Luego de una serie de análisis iterativos se determinó que el espesor de 25 cm en los muros hacia cumplir con el requisito del drift máximo de 0.0025 cm/cm, la respuesta para los cuatro modelos con esta configuración se describen a continuación.

III.5.1 Modos de Vibración Estructura.

Los cuatro modelos presentaron igual forma de modos de vibrar, siendo los modos 1 y 3 longitudinales en la dirección Y y X con periodos 0.952 seg y 0.678 seg respectivamente, la forma del modo 2 es torcional con un periodo de 0.801 seg. La tabla III-1 detalla los modos de vibración y factores de particpacion modal del modelo 2, la figura III-6 detalla los tres principales modos del modelo 2, la tabla III-2 detalla los modos para los cuatro modelos y el detalle de los modos y factores de participación para los cuatro modelos se detallan en Anexo C.

Tabla III-1: Detalle de los modos y factores de participación modal del modelo 2 base fija.

Modo	**Periodo Sec**	Factor Particip. **UX**	Factor Particip. **UY**	Factor Particip. **UZ**	Suma F. Particp **UX**	Suma F. Particp **UY**	Suma F. Particp **UZ**
1	**0.952**	0.000	**0.679**	0.000	0.000	0.679	0.000
2	**0.801**	0.002	0.000	0.000	0.002	0.679	0.000
3	**0.678**	**0.704**	0.000	0.000	0.706	0.679	0.000
4	0.242	0.000	0.168	0.000	0.706	0.848	0.000
5	0.224	0.001	0.000	0.000	0.707	0.848	0.000
6	0.194	0.154	0.000	0.000	0.862	0.848	0.000
7	**0.114**	0.000	0.002	**0.796**	0.862	0.849	0.796
8	0.111	0.000	0.055	0.023	0.862	0.905	0.819
9	0.108	0.001	0.000	0.000	0.862	0.905	0.819
10	0.101	0.005	0.000	0.000	0.868	0.905	0.819
11	0.095	0.044	0.000	0.000	0.912	0.905	0.819
12	0.091	0.000	0.002	0.000	0.912	0.907	0.819
13	0.090	0.002	0.000	0.000	0.914	0.907	0.819
14	0.073	0.000	0.001	0.000	0.914	0.907	0.819
15	0.068	0.000	0.029	0.000	0.914	0.936	0.820
16	0.067	0.002	0.001	0.000	0.916	0.936	0.820
17	0.064	0.012	0.000	0.000	0.928	0.936	0.820
18	0.063	0.000	0.000	0.002	0.928	0.937	0.822
19	0.060	0.011	0.000	0.000	0.939	0.937	0.822
20	0.058	0.000	0.000	0.000	0.939	0.937	0.822

Tabla III-2: Detalle de los Modos de vibración para los cuatro modelos base fija.

Modo	**Modelo 1** Periodo [sec]	**Modelo 2** Periodo [sec]	**Modelo 3** Periodo [sec]	**Modelo 4** Periodo [sec]
1	0.968	0.952	0.913	1.048
2	0.825	0.801	0.749	0.860
3	0.688	0.678	0.644	0.743
4	0.246	0.242	0.233	0.292
5	0.228	0.224	0.213	0.253
6	0.196	0.194	0.185	0.224
7	0.115	0.114	0.114	0.143
8	0.112	0.111	0.107	0.129
9	0.109	0.108	0.104	0.116
10	0.102	0.101	0.099	0.115

Modo	**Modelo 1** Periodo [sec]	**Modelo 2** Periodo [sec]	**Modelo 3** Periodo [sec]	**Modelo 4** Periodo [sec]
11	0.096	0.095	0.091	0.102
12	0.092	0.091	0.089	0.095
13	0.091	0.090	0.087	0.093
14	0.074	0.073	0.071	0.089
15	0.069	0.068	0.066	0.083
16	0.068	0.067	0.065	0.077
17	0.065	0.064	0.061	0.076
18	0.064	0.063	0.057	0.067
19	0.062	0.060	0.055	0.065
20	0.060	0.058	0.054	0.061

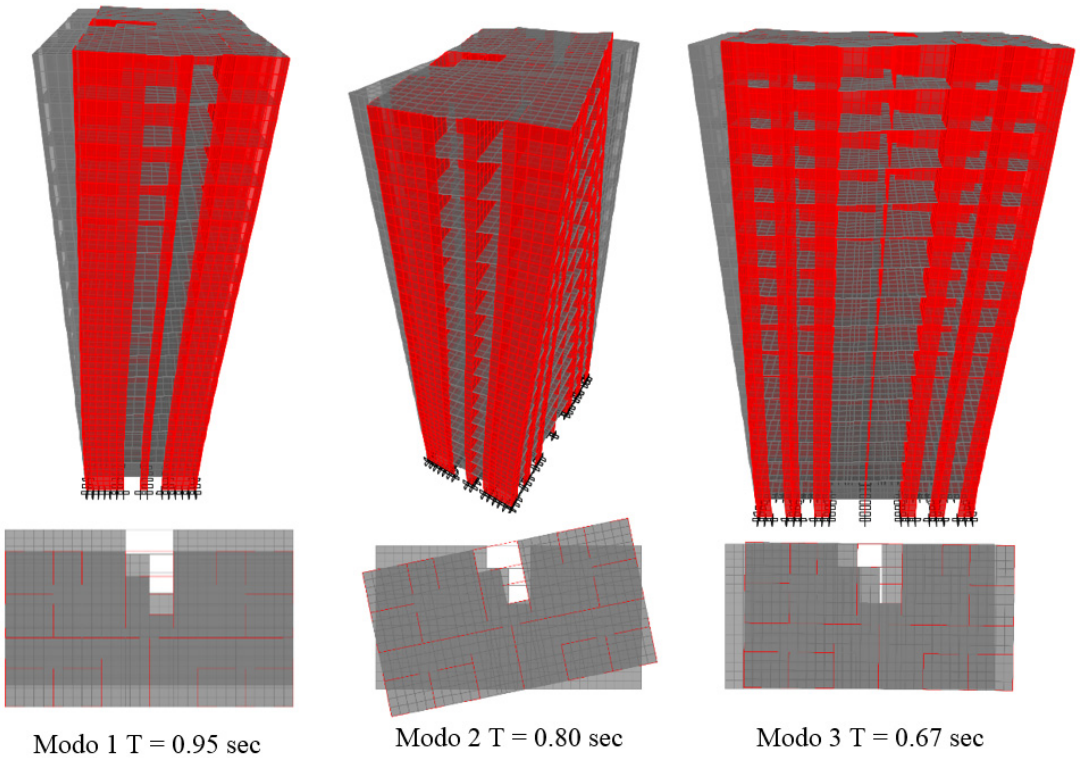


Figura III-6: Primeros tres modos de vibración, Modelo 2 base fija.

III.5.2 Drift y Desplazamiento máximos por pisos.

Observamos que los cuatro modelos analizados presentan una respuesta similar de desplazamiento y drift de piso, el modelo 4 es el que presenta mayores respuestas, los modelos 1 y 2 presenta respuestas similares, esto se detalla en las figuras III-7 y III-8.

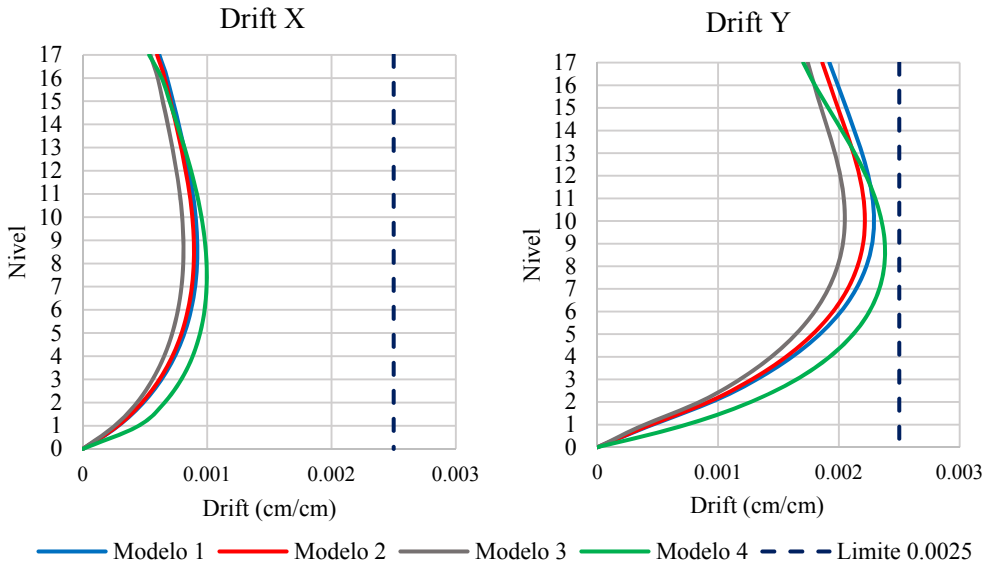


Figura III-7: Drift máximo de entrepiso, modelos base fija.

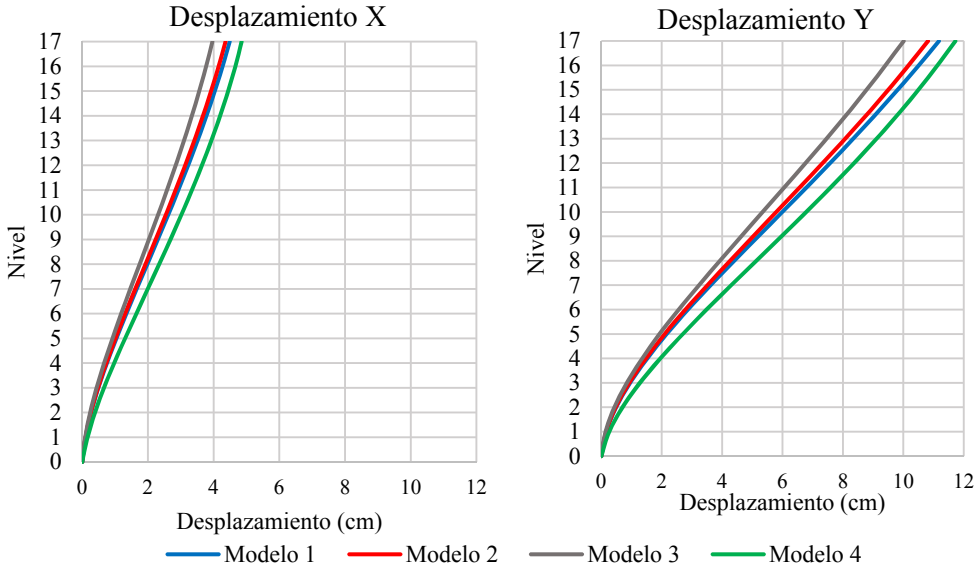


Figura III-8: Desplazamiento máximo de piso, modelos base fija.

III.5.3 Distribución de Corte por piso y fuerza en la base.

Observamos que la distribución de corte por piso de los cuatro modelos es muy similar, presentando un mayor valor el corte en la dirección Y con 2800 tonf. este comportamiento se repite en las respuestas máximas base, La figura III - 9 detalla la distribución de corte en la altura para la dirección X, Y, la tabla III - 3 detalla máximas fuerzas en la base.

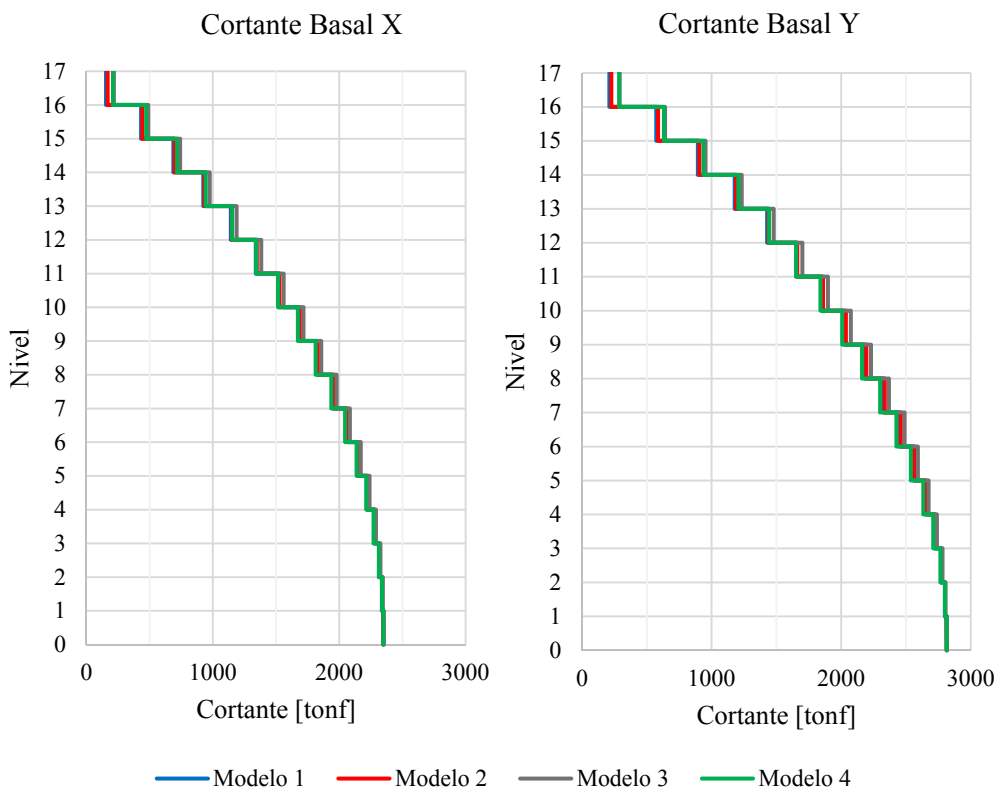


Figura III - 9: Distribución de Cortante por piso modelos base fija.

Tabla III - 3: Fuerzas en la base, Modelos Base Fija.

Reacciones	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Cortante Basal Dirección X [tonf]	2349	2349	2353	2349
Cortante Basal Dirección X [tonf]	2816	2815	2815	2816
Momento Volteo Dirección X [tonf-m]	115865	116057	116752	113191
Momento Volteo Dirección Y [tonf-m]	98215	98283	98727	96292
Peso total de la estructura [tonf]	12736	12736	12741	12658

IV. ANALISIS DEL MODELO CON BASE AISLADA.

En este capítulo, se describe el proceso de análisis del modelo con base aislada, el objetivo será ver el comportamiento sísmico del edificio para diferentes criterios para el modelo matemático y métodos de análisis.

IV.1 Demanda Sísmica.

La demanda sísmica para esta sección será definida por la Norma NCh 2745-2003, debido a que el comportamiento del modelo a base aislada es de naturaleza no lineal, se considera que el tipo de análisis más idóneo es un análisis dinámico tiempo historia no lineal, por lo que la demanda sísmica acorde será un registro de aceleraciones compatible con el espectro de diseño.

IV.1.1 Espectro de Diseño.

El espectro de diseño para el sistema aislado será definido de acuerdo a la NCh 2745-2003, calculado para una Zona sísmica 3, Suelo tipo III, factor de amplificación Z =5/4 y un R=1. El espectro de diseño se detalla en la Figura IV-1 y los valores de cálculo se muestran en Anexo A-3

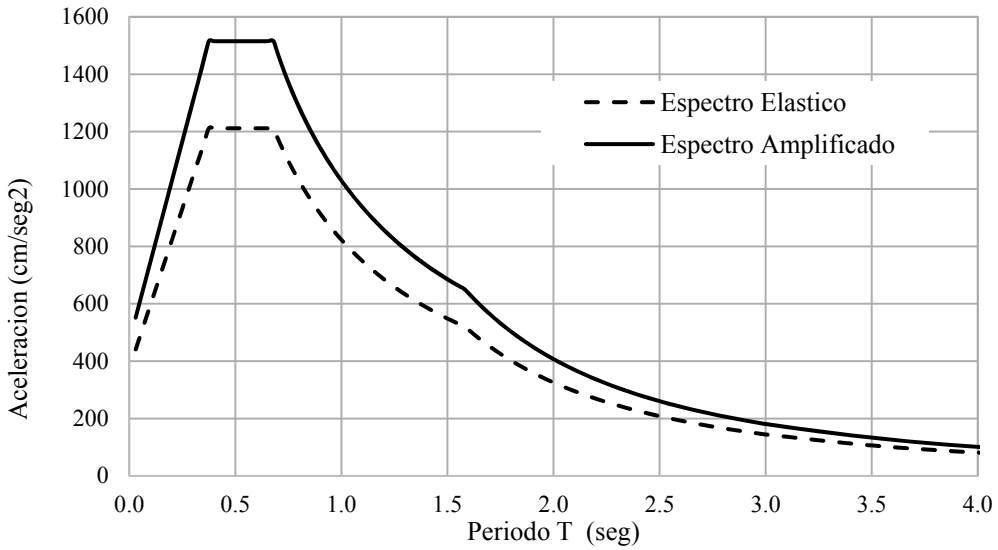


Figura IV-1: Espectro de diseño para el modelo con base aislada.

IV.1.2 Registro Aceleración compatible con espectro de diseño.

El registro de aceleración ha sido tomado de un catálogo de aceleraciones procesadas del terremoto del 27 de Febrero 2010, encontrado en el documento "Procesamiento de los registros del 27F publicados por el Servicio Sismológico Nacional, J.L. Almazán", el registro de aceleraciones escogido es el del *Campus Antumapu Santiago*, de este se han tomado las dos componentes verticales. La compatibilidad ha sido calculada a través de un análisis en el dominio en la frecuencia de Fourier. Los espectros de aceleración de las componentes verticales sin escalar y escalados con respecto al espectro de diseño se detallan en la figura IV-2, Los registros de aceleración de las componentes verticales sin escalar y escalados se detallan en la figura IV-3, Finalmente, los espectros de aceleración, velocidad y desplazamiento de las componentes escaladas se detallan en la figura IV-4.

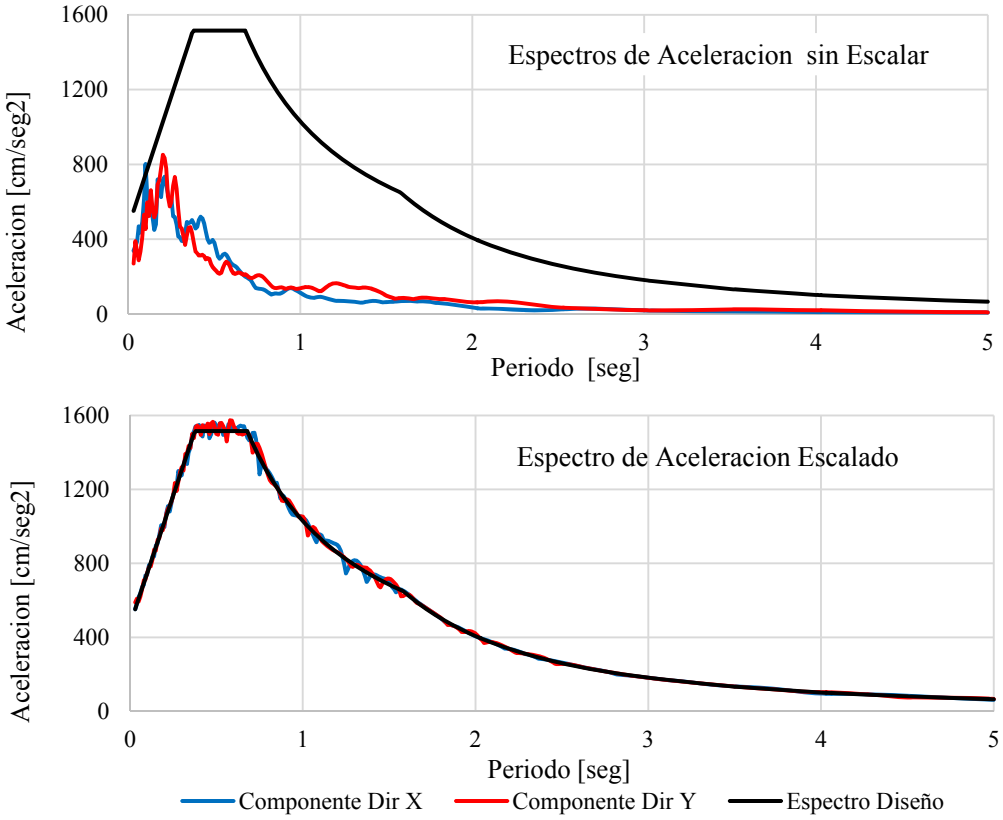


Figura IV- 2: Detalle de espectros aceleración sin escalar y escalado del registro *Campus Antumapu Santiago* con respecto al espectro objetivo.

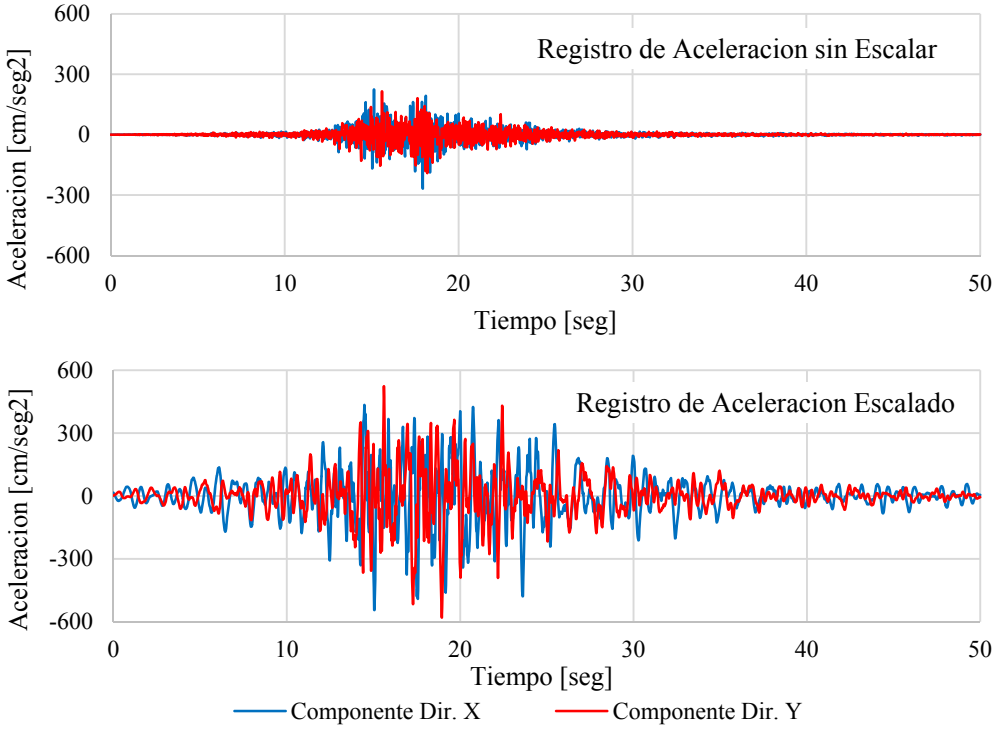


Figura IV-3: Detalle de los componentes de aceleración escalada y sin escalar del registro *Campus Antumapu Santiago*.

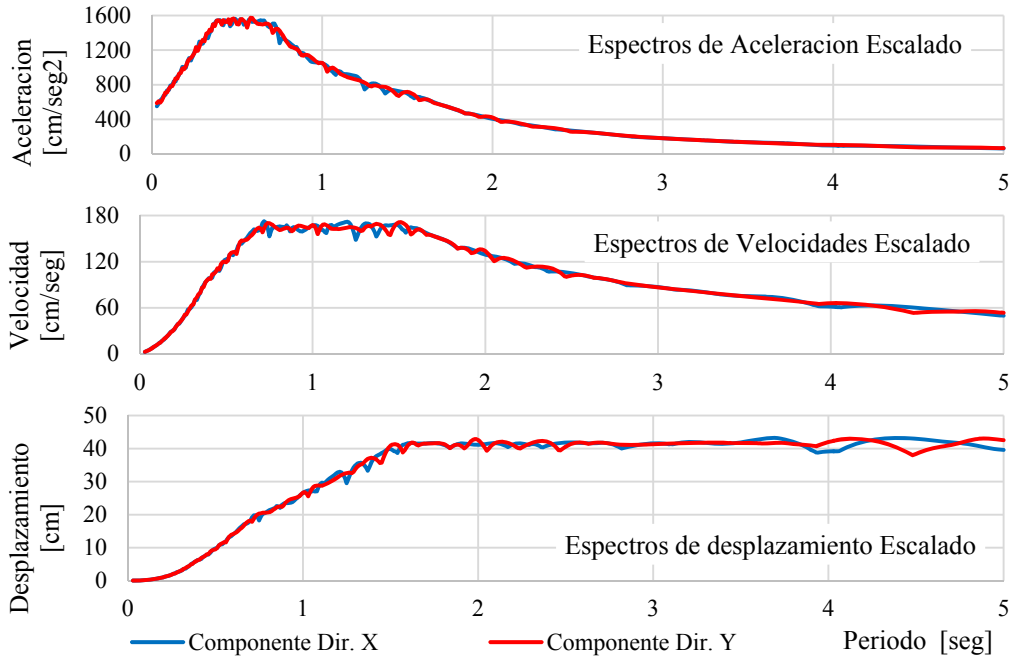


Figura IV- 4: Detalle de los espectros escalados de aceleración, velocidad y desplazamiento del registro *Campus Antumapu Santiago*

IV.2 Modelo matemático del sistema con base aislada.

El modelo matemático del sistema con base aislada está representado por dos secciones, la primera sección llamada *superestructura*, la representación matemática de esta sección es similar al modelo matemático del sistema de base fija, con la diferencia de un piso adicional en el nivel 0.00 m, que tiene la función de transmitir los efectos sísmicos de la base aislada a la superestructura, al igual que el análisis de base fija, el modelo matemático de la superestructura será representado por cuatro modelos cuyas características son descritas en la sección III.2. La segunda sección el *sistema de aislación basal*, el modelo matemático del sistema de aislación está compuesto por los elementos que representan las relaciones constitutivas fuerza-deformación de los aisladores. Definiremos tres tipos de sistema de aislación, el primer sistema compuesto por aisladores de comportamiento lineal, el segundo sistema de aislación compuesto por aisladores de Péndulo Friccional **FPS** *Frictional Pendulum System* y el tercer sistema de aislación compuesto por aisladores de goma con núcleo de plomo **LRB** L*ead Rubber Bearing.* La representación gráfica del modelo de base aislada se detalla en la figura IV-5

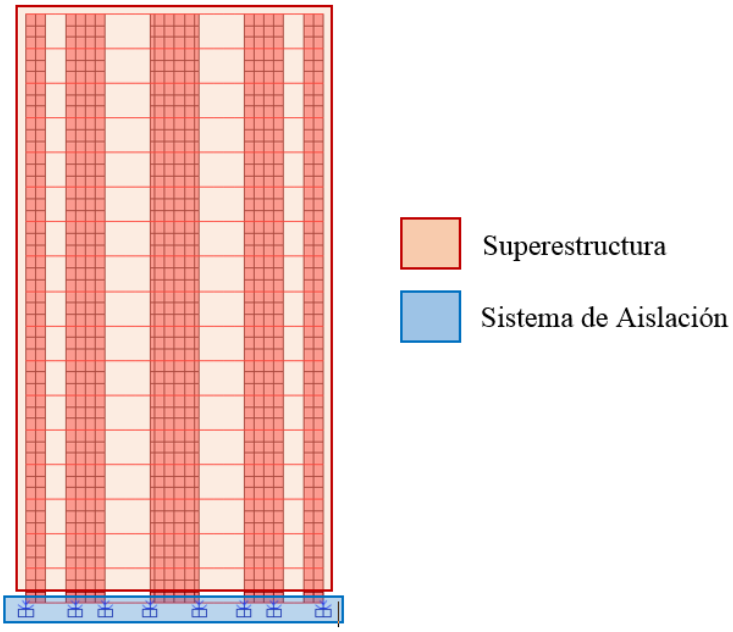


Figura IV-5: Detalle de los componentes del sistema de base aislada.

La geometría del modelo matemático del sistema de aislación será definida por el número de aisladores y su distribución en planta, estos aspectos se determinan a partir de un análisis iterativo de carga gravitacional, cuyo objetivo es determinar el número y ubicación de los de apoyos que hagan que la carga gravitacional sea distribuida de forma uniforme, estos apoyos posteriormente serán los puntos donde se ubicaran los aisladores; el resultado de este análisis determinó que la carga gravitacional se reparte de forma uniforme con 38 apoyos, obteniendo una carga aproximada por apoyo de *345 tonf*. La distribución de estos apoyos se detalla en la figura IV-6, con respecto a la altura del aislador se definirá para el inicio del análisis de 30 cm, valor que posteriormente será revisado.

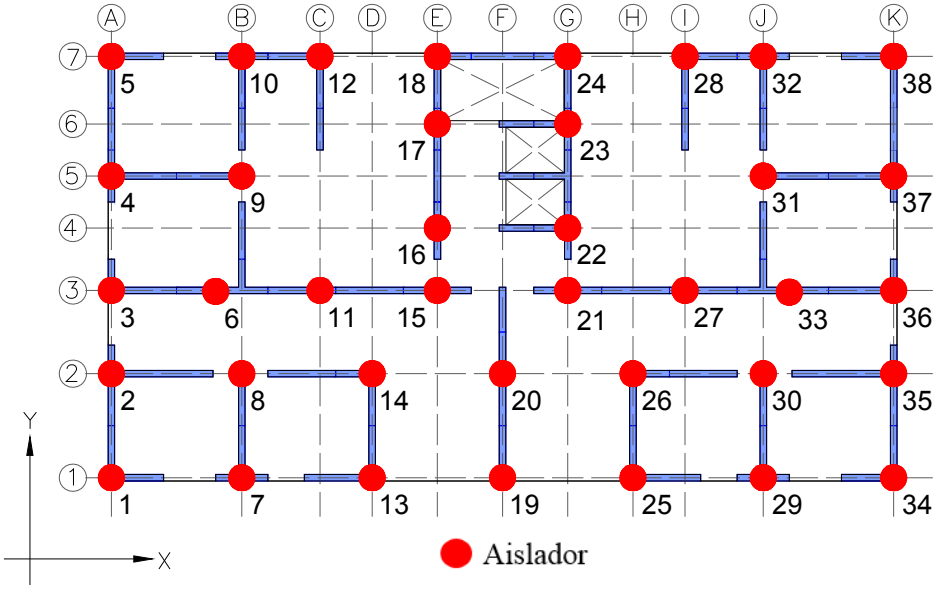


Figura IV-6: Distribución en planta de la ubicación del aislador.

IV.3 Suposiciones del Modelo Matemático del Sistema con base aislada.

De forma general se definen las siguientes suposiciones en:

a) Se diseñará un sistema de base aislada para un periodo fundamental de *3* segundos.

b) Se definirá como masa sísmica el *100%* de la carga muerta, el *100%* de la sobrecarga muerta y el *50 %* de la carga viva.

c) Se considera que la superestructura tendrá un comportamiento elástico, además no se considera efectos de no-linealidad geométrica.
d) El sistema de aislación estará empotrado a la base, no se considera interacción suelo estructura.
e) Las suposiciones del diafragma flexible y consideraciones del amortiguamiento inherente en la superestructura serán detalladas para cada caso de análisis.

IV.4 Definición y análisis del sistema con aislador lineal.

El objetivo de este análisis será obtener las propiedades lineales del sistema de aislación, conocer la rigidez efectiva del sistema K_{eff} para un periodo de 3 segundos calcular el amortiguamiento efectivo del sistema C_{eff} para un factor de amortiguamiento de 17%, finalmente determinar el desplazamiento lateral máximo D del sistema de aislación. Estas propiedades lineales posteriormente serán empleadas para determinar las propiedades de los aisladores FPS y LRB.

IV.4.1 Definición propiedades del aislador lineal.

a) Peso de gravedad participante en el sistema de aislación.

El peso de gravedad participante en el sistema de aislación será definido de acuerdo a la configuración de apoyos de la figura IV-6, haciendo un análisis estático para la combinación de carga conforme a la sección IV.3.b se obtiene que los aisladores reciben una carga total de *13101 tonf,* y una carga promedio por aislador de *345 tonf,* La distribución de los pesos por apoyo para los cuatro modelos se detalla en la figura IV-7, además la distribución de los pesos se detalla en el anexo D.1.

b) Rigidez efectiva del sistema.

La rigidez efectiva K_{eff} del sistema de aislación se determina de acuerdo a la expresión 5.1, para un peso de $W = 13101\ tonf$ equivalente a una masa $m = 13.37\ tonf - seg^2/cm$, y para un periodo $T = 3\ seg$ equivalente a una frecuencia

circular $\omega = 2.09\, rad/seg$, se obtiene una rigidez efectiva total de $K_{eff} = 60.81\, tonf/cm$, por lo que la rigidez efectiva por aislador es $K_{eff_aisl} = 1.60\, tonf/cm$.

$$K_{eff} = \omega^2\, m \qquad (5.1)$$

c) Amortiguamiento efectivo del sistema.

El amortiguamiento efectivo C_{eff} del sistema de aislación se determina de acuerdo a la expresión 5.2, para un factor de amortiguamiento $\xi = 17\%$, masa *m = 13.37 tonf-seg²/cm* y una frecuencia circular $\omega = 2.09\, rad/seg$ se obtiene un amortiguamiento efectivo de $C_{eff} = 9.79\, tonf\ seg/cm$ por lo que el amortiguamiento efectivo por aislador es $C_{eff_aisl} = 0.257\, tonf\ seg/cm$.

$$C_{eff} = 2\, \xi\, \omega\, m \qquad (5.2)$$

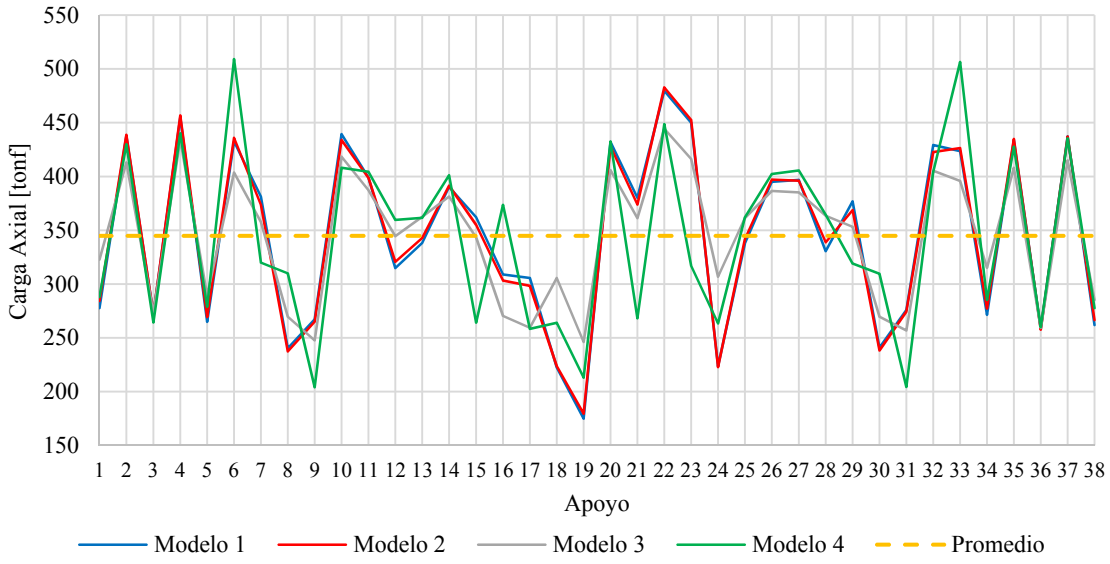


Figura IV-7: Detalle de la distribución de la carga de gravedad por apoyo para un análisis estático.

IV.4.2 Método de análisis del sistema aislado.

La respuesta sísmica del modelo matemático con base aislada, será determinada a través de un análisis tiempo historia dinámico no lineal, se emplearán dos métodos de análisis: el primero, análisis dinámico modal no lineal conocido como Fast Nonlinear

Analysis FNA, el método consiste en hacer una solución eficiente de la ecuación de movimiento para un número limitado de elementos no lineales, la solución se hace aprovechando la idea de hacer una reducción de los grados de libertad usando vectores Ritz. El segundo, método es el análisis tiempo historia no lineal por integración directa, el cual consiste en solucionar la ecuación de movimiento de forma directa mediante un método numérico; el método numérico empleado para este estudio será el de Newmark aceleración constante con iteraciones Newton Rahson. El marco teórico de del método FNA se detalla en Anexo B-2, y el marco teórico del método integración directa se detalla en el Anexo B-3.

.

IV.4.3 Resultados del análisis del sistema aislado con aislador lineal.

Los resultados de los modelos con base aislada con aisladores de comportamiento lineal para un método de análisis FNA se detallan a continuación:

IV.4.3.1 Modos de vibración del sistema aislado lineal.

La respuesta modal de los cuatro modelos de base aislada se determinó por vectores Ritz truncando para 20 modos, el análisis determinó que los dos primeros modos son longitudinales en las direcciones “Y” y “X” con periodos que rondan los 3 segundos, el tercer modo torcional con un perido de 2.7 segundos, el análisis modal detaló que el modo 10 es principal modo vertical con un periodo de 0.12 segundo, la tabla IV-1 detalla los modos de vibración del modelo 2 con sus repectivos factores de participación modal, la tabla IV-2 detalla los modos de vibración de los cuatro modelos, la figura IV-8 detalla los tres principales modos de vibración del modelo 2 con base aislada. El detalle de los modos de vibración de los cuatro modelos con sus respectivos factores de participación modal se detalla en el Anexo D.2.

Tabla IV-1: Modos y factores de participación modal para el modelo 2 base aislada.

Modo	**Periodo Sec**	Factor Particip. **UX**	Factor Particip. **UY**	Factor Particip. **UZ**	Suma F. Particp **UX**	Suma F. Particp **UY**	Suma F. Particp **UZ**
1	**3.006**	0.000	**0.997**	0.000	0.000	0.997	0.000
2	**2.944**	**0.999**	0.000	0.000	0.999	0.997	0.000
3	2.774	0.000	0.000	0.000	0.999	0.997	0.000
4	0.581	0.000	0.003	0.000	0.999	1.000	0.000
5	0.468	0.000	0.000	0.000	0.999	1.000	0.000
6	0.408	0.001	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000
7	0.184	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000
8	0.174	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000
9	0.146	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000
10	**0.124**	0.000	0.000	**0.852**	1.000	1.000	0.853
11	0.101	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.853
12	0.096	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.853
13	0.088	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.853
14	0.065	0.000	0.000	0.002	1.000	1.000	0.855
15	0.053	0.000	0.000	0.031	1.000	1.000	0.886
16	0.049	0.000	0.000	0.005	1.000	1.000	0.892
17	0.042	0.000	0.000	0.052	1.000	1.000	0.944
18	0.031	0.000	0.000	0.007	1.000	1.000	0.950
19	0.024	0.000	0.000	0.035	1.000	1.000	0.986
20	0.017	0.000	0.000	0.003	1.000	1.000	0.989

Tabla IV-2: Modos de vibración para los cuatro modelos de base aislada

Modo	**Modelo 1** Periodo [sec]	**Modelo 2** Periodo [sec]	**Modelo 3** Periodo [sec]	**Modelo 4** Periodo [sec]
1	3.016	3.006	2.987	3.025
2	2.948	2.944	2.936	2.961
3	2.781	2.774	2.772	2.784
4	0.596	0.581	0.549	0.617
5	0.486	0.468	0.435	0.491
6	0.418	0.408	0.387	0.462
7	0.188	0.184	0.175	0.220
8	0.178	0.174	0.165	0.192
9	0.149	0.146	0.139	0.175
10	0.126	0.124	0.120	0.126
11	0.105	0.101	0.100	0.123

Modo	**Modelo 1** Periodo [sec]	**Modelo 2** Periodo [sec]	**Modelo 3** Periodo [sec]	**Modelo 4** Periodo [sec]
12	0.101	0.096	0.093	0.109
13	0.093	0.088	0.088	0.098
14	0.071	0.065	0.065	0.075
15	0.061	0.053	0.055	0.064
16	0.052	0.049	0.051	0.056
17	0.042	0.042	0.040	0.048
18	0.037	0.031	0.037	0.036
19	0.023	0.024	0.020	0.027
20	0.019	0.017	0.019	0.019

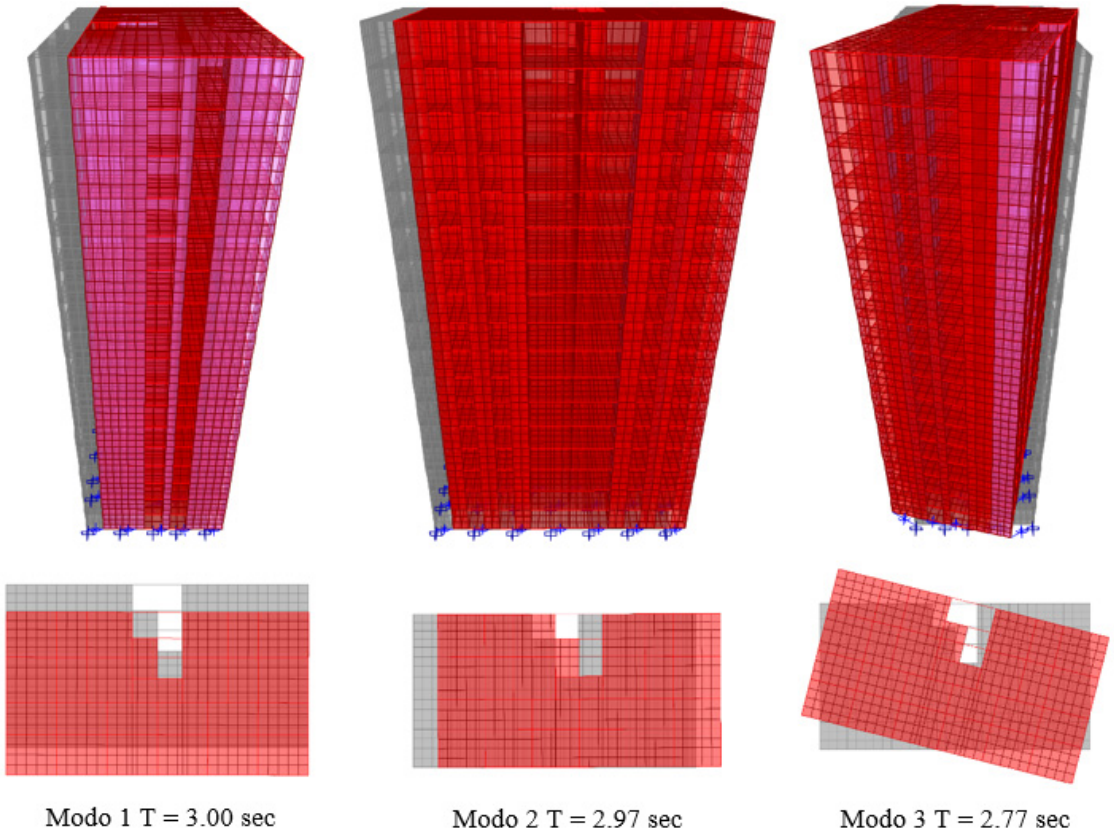


Figura IV-8: Principales modos de vibración del modelo 2 base aislada.

IV.4.3.2 Relación constitutiva Fuerza – Deformación del aislador lineal.

El comportamiento histeretico del aislador en las dirección X y Y se detallan en la Figura IV-9, de estos diagramas observamos que el desplazamiento máximo en la dirección X es de 32 cm y en la dirección Y es de 28 cm, además el cortante máximo en la dirección X es de 58 tonf y en la dirección Y es de 54 tonf.

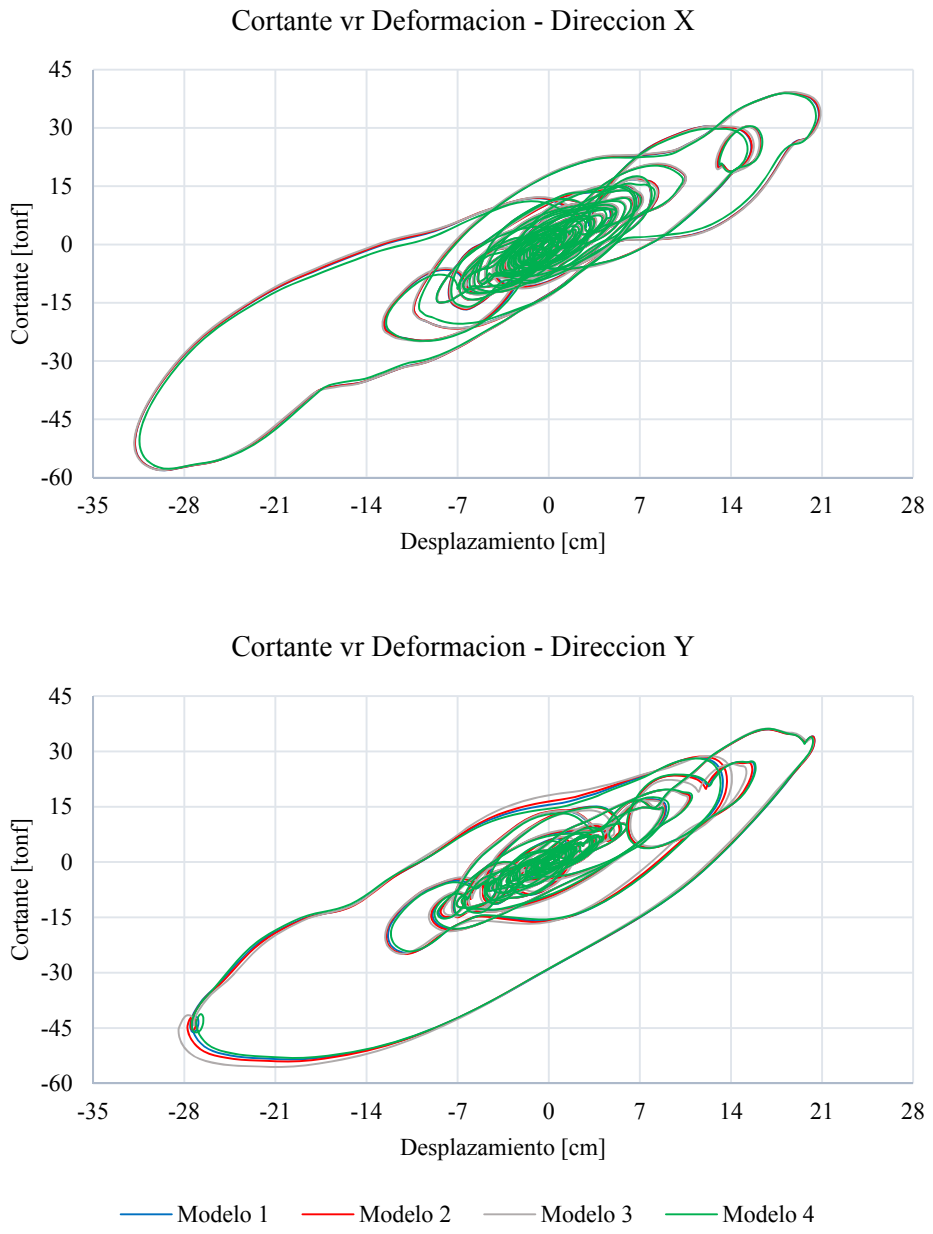


Figura IV-9, Diagramas histereticos del aislador lineal en la dirección X y Y.

IV.4.3.3 Drift Máximos en la superestructura con aisladores lineales.

Esta revisión se hace con el fin de verificar que las deformaciones de entrepiso de la superestructura se encuentren dentro del límite de la Norma NCh 2745-2003, drift menores a 0.0025 cm/cm condición evaluada para la demanda sísmica definida en la sección IV.1 los drift máximos se detallan en la figura IV-10

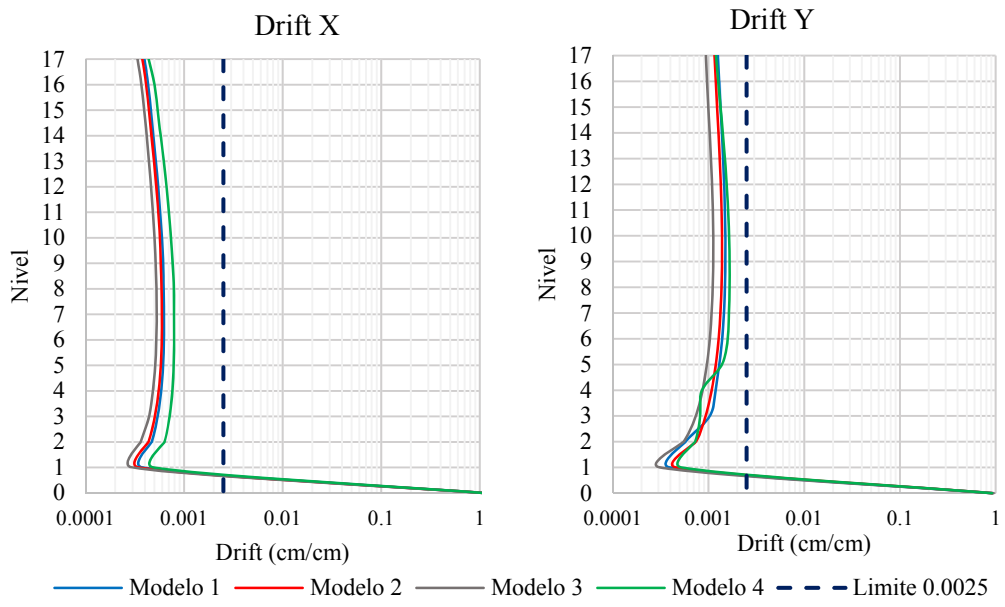


Figura IV-10, Drift máximo del sistema con base aislada.

IV.4.3.4 Fuerzas en la Base del sistema aislado lineal.

Las fuerzas en la base del sisteama aislado con aislador lineal se detalla en la tabla IV-3.

Tabla IV-3: Fuerzas en la base, Modelos con aislación basal tipo lineal.

Reacciones	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Cortante Basal Dirección X [tonf]	1944	1946	1950	1931
Cortante Basal Dirección X [tonf]	1683	1695	1739	1678
Momento Volteo Dirección X [tonf-m]	-68235	-67502	-64053	-68605
Momento Volteo Dirección Y [tonf-m]	64080	64397	64050	64714
Peso total de la estructura [tonf]	13118	13118	13123	13045

IV.5 Definición del sistema aislado con FPS.

Los aisladores FPS consisten en un deslizador articulado sobre una superficie de acero inoxidable esférica de radio R, los deslizadores están revestidos por un material de alta capacidad de soporte basado en politetrafluoroetilino (teflón) que tienen un bajo coeficiente de fricción μ. La Figura IV-11 detalla de forma esquemática un FPS.

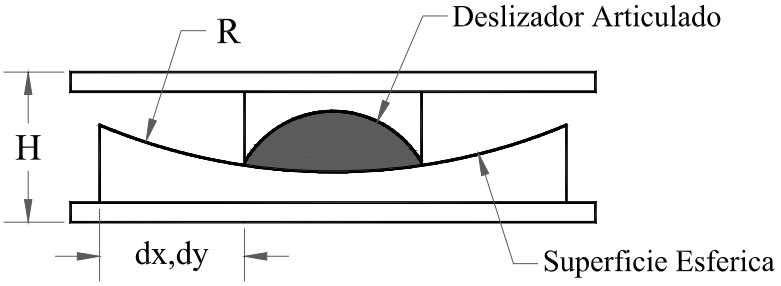


Figura IV-11: Esquema de un aislador FPS

IV.5.1 Definición propiedades del aislador FPS.

El desempeño sísmico de los aisladores FPS está dado por su geometría y cargas de gravedad actuante. El comportamiento histeretico de un FPS puede ser descrito en dos estados, el primer estado de comportamiento elástico donde su resistencia está dada por la fuerza de fricción μW siendo μ el cofieciente de firccion y W el peso actuante en el aislador, este estado posee una rigidez elástica Ke, cuando la fuerza lateral supera el límite μW se pasa al segundo estado de comportamiento no lineal, el FPS se comporta como un péndulo de rigidez Kp, el modelo histeretico del FPS se detalla en la figura Figura IV-12. El modelo matemático del comportamiento histeretico del FPS puede ser resumido en la Figura IV-13, en ella se describe que la capacidad del FPS está dado por las rigidez Ke y Kp, y su fuerza restitutiva depende del radio del péndulo.

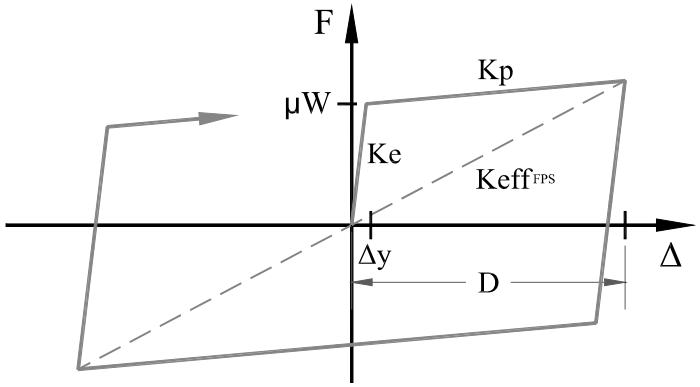


Figura IV-12: Modelo histeretico del Aislador FPS

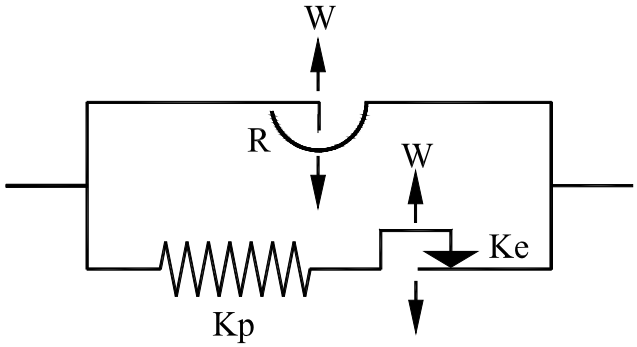


Figura IV-13: Simplificación Matemática del FPS

El radio del péndulo R del FPS se define a partir del periodo objetivo T tal como se expresa en la expresión 5.3, para nuestro análisis se fijó que el periodo de vibración lateral del sistema es de T = 3 segundos, al calcular se obtiene que el radio del péndulo es de R = 223 cm valor que será redondeado a R = 225 cm.

$$R = g\frac{T^2}{4\pi^2} \qquad (5.3)$$

La rigidez elástica Ke y rigidez plástica Kp del FPS se calculan de acuerdo a las expresiones 5.4 y 5.5 respectivamente, los valores de las rigideces dependen de los desplazamientos y las cargas de gravedad actuante en el sistema, para nuestro análisis, el desplazamiento máximo D del aislador lo calculamos con la expresión 5.6 donde los desplazamiento en la dirección X y Y se obtienen de los diagramas histéricos del aislador de tipo lineal sección IV.4.3 que corresponden a $dx = dy$ =31.7 cm,

obteniendo un desplazamiento máximo $D = 44.8\ cm$, los valores del desplazamiento de fluencia Δy y el coficiente de fricción μ son datos que se obtiene de los catálogos del fabricante FPS, para nuestro análisis se ha definido que el desplazamiento de fluencia sea $\Delta y = 0.05\ cm$ y el coeficiente de fricción entre el teflón y el acero inoxidable de $\mu = 0.05$, finalmente se considera que la carga de gravedad actuante en un aislador será el valor de $W = 480\ tonf$, con estas consideraciones se obtiene una rigidez elástica por aislador de $Ke = 480\ tonf/cm$ y una rigidez plástica por aislador de $Kp = 2.13\ tonf/cm$

$$K_e = \frac{\mu W}{\Delta y} \qquad (5.4)$$

$$K_p = \frac{W}{R} \qquad (5.5)$$

$$D = max\sqrt{d_x^2 + d_y^2} \qquad (5.6)$$

La fuerza resistente del aislador F_{FPS} asociada al desplazamiento máximo D del FPS se define en la expresión 5.7, y su rigidez secante K_{effFPS} por la expresión 5.8. Para nuestro análisis, la fuerza restitutiva de un aislador es $F_{FPS} = 120\ tonf$ y su rigidez secante de $K_{eff_{FPS}} = 2.7\ tonf/cm$

$$F_{FPS} = \mu W + \frac{W}{R} D \qquad (5.8)$$

$$K_{effFPS} = \frac{\mu W + \frac{W}{R} D}{D} \qquad (5.8)$$

El factor de amortiguamiento ξ_{FPS} de un aislador se obtiene con la expresión 5.9, se puede observar que este se encuentra en función del Radio del Péndulo R y el desplazamiento máximo D, para nuestro caso se obtiene que el factor de amortiguamiento por aislador es de $\xi_{FPS} = 17\ \%$

$$\xi_{FPS} = 2\mu R/\pi D \qquad (5.9)$$

La rigidez vertical Kv_{FPS} del aislador FPS se determina de acuerdo a la expresión 5.10, esta expresión detalla que la rigidez vertical está en función de la altura del aislador H, el módulo de elasticidad del acero E, el área del péndulo A_{FPS} y un

coeficiente α que depende del material del péndulo, para nuestro caso se determina que $H = 0.3\ m$, $E = 2.10\ tonf/m^2$, el coeficiente α para péndulos de acero revestidos de teflón es 0.5 y el área del péndulo se calcula en base a la expresión 5.11, esta depende de la capacidad del teflón a cargas axiales σ_{adm} para nuestro caso esta es $\sigma_{adm} = 0.5\ tonf/cm^2$ por lo que obtenemos $A_{FPS} = 1590\ cm^2$ y una rigidez vertical de $Kv_{FPS} = 55665\ tonf/cm$

$$Kv_{FPS} = \alpha EA/H \qquad (5.10)$$

$$A_{FPS} = W/\sigma_{adm} \qquad (5.11)$$

La frecuencia vertical fv del aislador FPS se determina de acuerdo a la expresión 5.12, sustituyendo los valores obtenemos $fv_{FPS} = 53\ Hz$, este valor se compara con el rango de frecuencias verticales del análisis modal del aislador lineal, podemos observar que estas se encuentran en un rango de 8 Hz a 51.7 Hz, por lo que la frecuencia vertical del FPS no se acoplará a las frecuencias verticales del sistema.

$$fv = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{Kv}{m}} \qquad (5.12)$$

Para poder modelar el comportamiento no lineal del FPS en el SAP2000, será necesario definir tres parámetros adicionales: primero, el coeficiente de fricción para velocidad rápida μ_{fast} este será $\mu_{fast} = \mu_{max}$, segundo, el coeficiente de fricción para velocidad lenta μ_{slow}, este será $\mu_{slow} \approx 0.75\ \mu_{fast} = 0.4$ y tercero, el parámetro r conocido como la inversa de la velocidad, para nuestro caso tomaremos $r = 0.20\ seg/cm$, estos parámetros pueden ser obtenidos de ensayos de carga sobre los FPS reales o por catálogos suministrados por el fabricante.

IV.6 Definición del sistema aislado con LRB.

Los aisladores LRB son elementos de múltiples capas de goma y acero, donde las láminas de acero proveen la rigidez vertical del sistema y las capas de goma la rigidez lateral. El amortiguamiento es provisto por la goma y la fluencia por deformación del núcleo de plomo. La figura IV-14 detalla de forma esquemática un LRB.

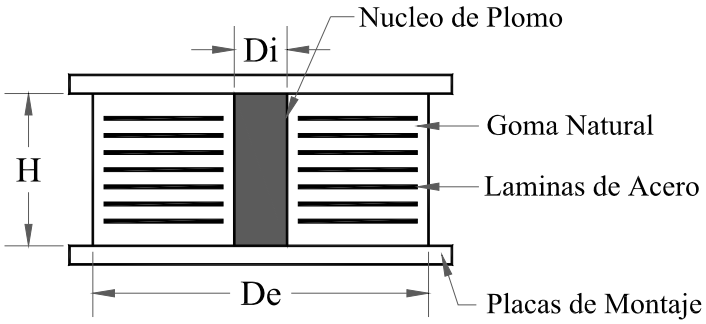


Figura IV-14: Esquema de un aislador LRB

IV.6.1 Definición propiedades del aislador LRB.

Con el fin de diseño y análisis, los aisladores LRB son representados por una curva histerética bilineal, esta curva resulta de la acción en paralelo del elastómero y el núcleo de plomo, para el cual se asume que la goma dará una respuesta elástica y del núcleo de plomo que se modela como una respuesta no lineal elastoplástica. La curva histerética del LRB se detalla en la figura IV-15.

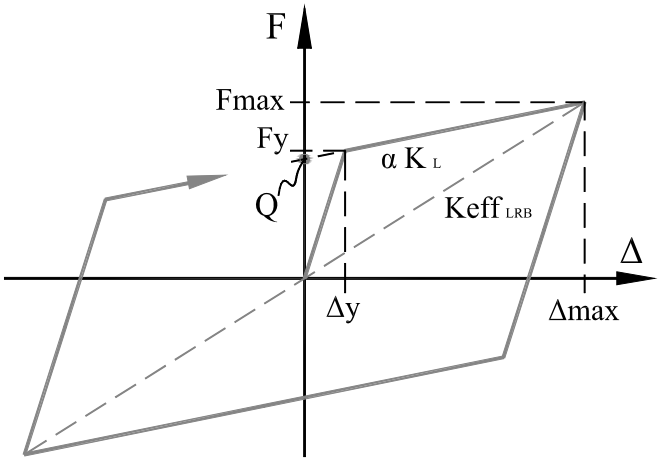


Figura IV-15: Modelo Histerético del Aislador LRB

Los parámetros de la curva histerética del LRB se obtienen a partir de la linealización de la respuesta de las relaciones fuerza – deformación de los aisladores lineales; de la sección IV.4 definimos que la fuerza máxima sobre un aislador de Fmax=58.1 tonf y el desplazamiento máximo de $\Delta_{max} = 31.7\ cm$.

La linealización sigue un proceso iterativo en el que se busca que las energías disipadas por el sistema aislador lineal y el sistema con LRB sean equivalentes, esta evaluación se hace a partir del cálculo del factor de amortiguamiento efectivo del sistema con LRB ξ_{effLRB} , esta relación se detalla en la expresión 5.13, donde la ED es la energía disipada del sistema con LRB esta se define en la expresión 5.14, y ES es la energía disipada del sistema con aislador lineal definida por la expresión 5.15.

$$\xi_{effLRB} = \frac{ED}{4\pi ES} \qquad (5.13)$$

$$ED = 4\,Q(\Delta_{max} - \Delta_y) \qquad (5.14)$$

$$ES = \frac{1}{2}\,\Delta_{max}\,F_{max} \qquad (5.15)$$

Para determinar ED energía disipada por el sistema LRB se deberá definir la fuerza Q este valor se determina en la expresión 5.16, que está en función de la fuerza de fluencia Fy, valor de la rigidez inicial K_L definida por la expresión 5.17 y el coeficiente de post fluencia α que de datos de fabricantes se define que $\alpha = 0.05$.

$$Q = Fy - \Delta_y\,\alpha\,K_L \qquad (5.16)$$

$$K_L = \frac{F_{max}}{\Delta_y + (\Delta_{max})\alpha} \qquad (5.17)$$

El proceso iterativo determinó que se obtiene un factor de amortiguamiento efectivo del aislador LRB de $\xi_{effLRB} = 17\%$ para una fuerza de fluencia $Fy = 16.39\ tonf$, el desplazamiento de fluencia de $Dy = 0.62\ cm$, rigidez inicial $K_L = 26.52\ tonf/cm$ y una rigidez efectiva del sistema LRB $K_{eff\,LRB} = 1.81\ tonf/cm$. La curva histerética linealizada del sistema LRB se detalla en la figura IV-16, en la figura también se detalla la relación histerética del aislador lineal en las dirección X y Y.

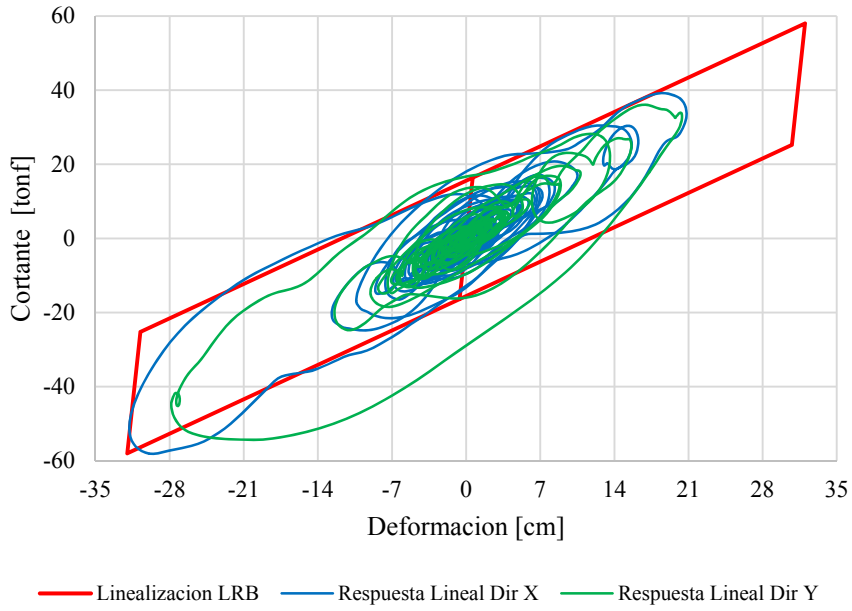


Figura IV-16: Curva histerética linealización del sistema LRB.

Para nuestro análisis de SAP2000, será necesario definir una rigidez vertical del LRB, pero este parámetro no puede ser estimado hasta tener las respuestas finales del sistema aislado con LRB, pero esta puede ser estimada de acuerdo a los resultados del sistema con aislador lineal, el rango de frecuencias verticales del sistema lineal es 8 Hz a 51 Hz, para nuestro análisis se definirá que la frecuencia vertical del LRB se encuentre fuera de este rango para evitar resonancia de los modos, por lo que definiremos que $fv_{LRB} = 7\ Hz$, empleado la expresión 5.12 obtenemos que la rigidez vertical del sistema LRB debe de ser $Kv_{LRB} = 946\ tonf/cm$.

Para validar el valor de la rigidez vertical, hacemos una estimación aproximada de éste con la expresión 5.18, El área del aislador LRB A_{LRB} la estimamos en función del esfuerzo admisible de compresión de la goma con la expresión 5.19, para una carga de $W = 480\ tonf$ y un esfuerzo admisible de la goma$\sigma_{admLRB} = 0.12\ tonf/cm^2$ obtenemos que el área del aislador debe ser de $A_{LRB} = 4850\ cm^2$, el diámetro exterior del aislador D_e lo calculamos con la expresión 5.20, definimos de manera arbitraria que el diámetro interior deber ser de $Di = 15\ cm$, del cual obtenemos que el diámetro

exterior del aislador deberá ser $De = 80\ cm$. El módulo de elasticidad del aislador E_c lo determinamos con la expresión 5.21 el módulo de corte G se determina con graficas proporcionadas por el fabricante que relacionan el módulo de corte G con la distorsión lateral γ, sin embargo para este momento de análisis el módulo de corteo G no puede ser estimado de forma exacta, por lo que tomamos un valor aproximado de $G = 5.55\ kg/cm^2$, el factor de forma S de un aislador LRB se define con la expresión 5.22, en función de los diámetros del aislador y el espesor de la goma t, del cual tomamos como aproximación $t = 1cm$, con lo que obtenemos $E_c = 5800\ kg/cm^2$, además tomamos que la altura del aislador LRB sea de $H = 30\ cm$,

Con estas propiedades estimamos que el área de aislador A_{LRB}, el diámetro exterior De y el modulo de elasticidad E_c son valores válidos para un aislador LRB.

$$Kv_{LRB} = E_c A_{LRB}/H \qquad (5.18)$$

$$W/A_{LRB} \leq \sigma_{admLRB} \qquad (5.20)$$

$$A_{LRB} = \frac{\pi}{4}(De^2 - Di^2) \qquad (5.20)$$

$$E_c = 4\ G\ S^2 \qquad (5.21)$$

$$S = (De - Di)/4t \qquad (5.22)$$

IV.7 Análisis del Sistema de base aislada con FPS.

Debido a que existente incertidumbre en los resultados debido a los criterios tomados para modelar y analizar el sistema aislado, se hará una serie de análisis de sensibilidad al modelo aislado que se detallan:

a. Análisis de sensibilidad en el método de análisis FNA para diferentes números vectores Ritz, 25, 75, 150, 300 y 600 vectores.

b. Análisis de sensibilidad al modelo matemático para diferentes factores de amortiguamiento inherente en la superestructura, factores: $\xi = 0\%$, $\xi = 2\%$, $\xi = 5\%$, para el análisis FNA.
c. Análisis de sensibilidad para diferentes métodos de análisis no lineales, FNA e Integración Directa.
d. Análisis de sensibilidad al modelo matemático para diferentes combinaciones del amortiguamiento tipo Rayleigh para el análisis Integración Directa.
e. Análisis de sensibilidad al modelo matemático para diferentes tipos de diafragma del entrepiso para el análisis FNA.

Finalmente se hará una comparación de las respuestas del sistema aislado con FPS para los 4 modelos, análisis que serán ejecutados tomando en cuenta los resultados de los análisis de sensibilidad.

IV.7.1 Análisis de sensibilidad del método FNA para diferente número de modos, aislador FPS.

El análisis de sensibilidad del método FNA para diferentes modos será hecho al modelo matemático 2 con aislador FPS, el análisis se hará para: 25, 75, 150, 300 y 600 modos, se supondrá en el modelo diafragma flexible y amortiguamiento inherente en la superestructura de cero, las respuestas del análisis se detalla a continuación:

IV.7.1.1 Factores de participación modal.

La Tabla IV- 4 detalla los porcentajes de los factores de participación modal en las direcciones X, Y y Z, así como el porcentaje de participación de la carga gravitacional, para el sistema con FPS, análisis FNA para diferentes número de modos. La tabla detalla que los factores de participación modal son mayores del 99% para cualquier número de modos, sin embargo este es casi un 100% para los modos superiores, con respecto a la carga gravitacional esta alcanza el 100% solo con modos superiores.

Tabla IV- 4: Factores de participación modal y % de la carga gravitacional participante, análisis FNA para diferente número de modos, aislador FPS.

Modos	% Participacion Modal			% Carga Gravitacional		
	Γx	Γy	Γz	Dead	Live	SD
25	99.9999	100.0000	99.3874	98.7520	88.0769	88.0769
75	100.0000	100.0000	99.8137	99.7629	98.7493	98.7493
150	100.0000	100.0000	99.9575	99.9517	99.9768	99.9768
300	100.0000	100.0000	99.9889	99.9853	99.9999	99.9999
600	100.0000	100.0000	99.9901	99.9869	100.0000	100.0000

IV.7.1.2 Fuerza Axial en los aisladores FPS.

La figura IV-17 detalla los valores máximos y mínimos de la fuerza axial en los aisladores FPS, análisis FNA para diferentes números de modos. De la figura se observa que los sistemas con menor número de modos presentan mayores de fuerza, siendo la fuerza axial máxima de 1256 tonf para el sistema de 25 modos y 1072 tonf para el sistema de 600 modos.

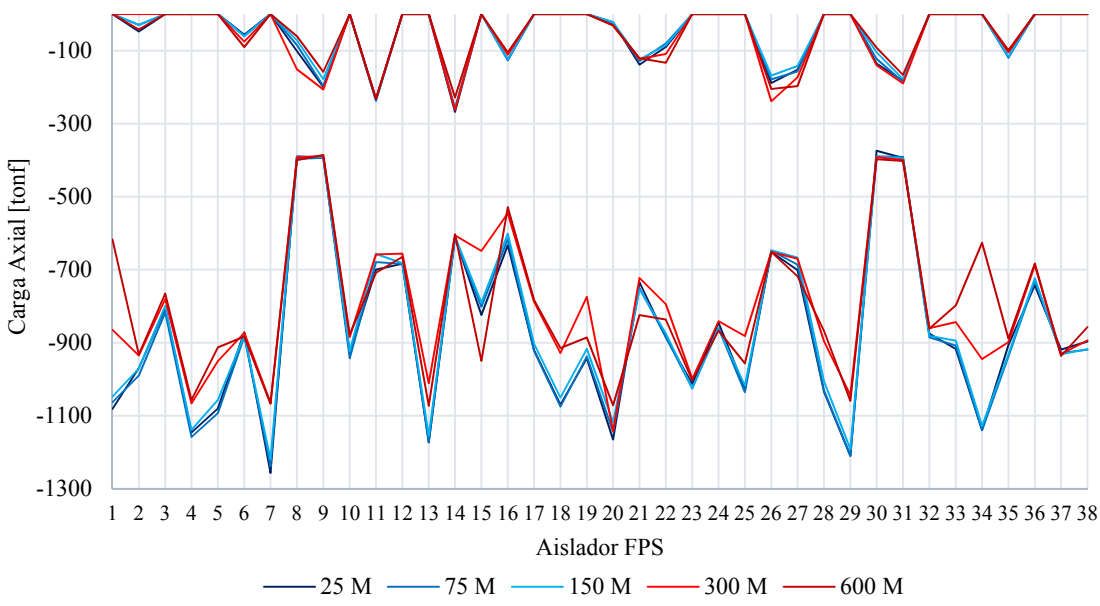


Figura IV-17: Fuerza axial máxima y mínima en los aisladores FPS, para un análisis FNA con diferente número de modos.

IV.7.1.3 Curva Fuerza – Deformación para los aisladores 5 y 22 FPS.

La figura IV-18 detalla las curvas fuerza – deformación de los aisladores 5 y 22 FPS análisis FNA para diferentes números de modos. De la figura se observa que los modelos presentan un mismo desplazamiento, con un desplazamiento máximo de 31 cm, sin embargo los modelos con menores modos presentan mayores fuerzas cortantes, 160 tonf para el modelo con 25 modos y 133 tonf para el modelo con 600 modos.

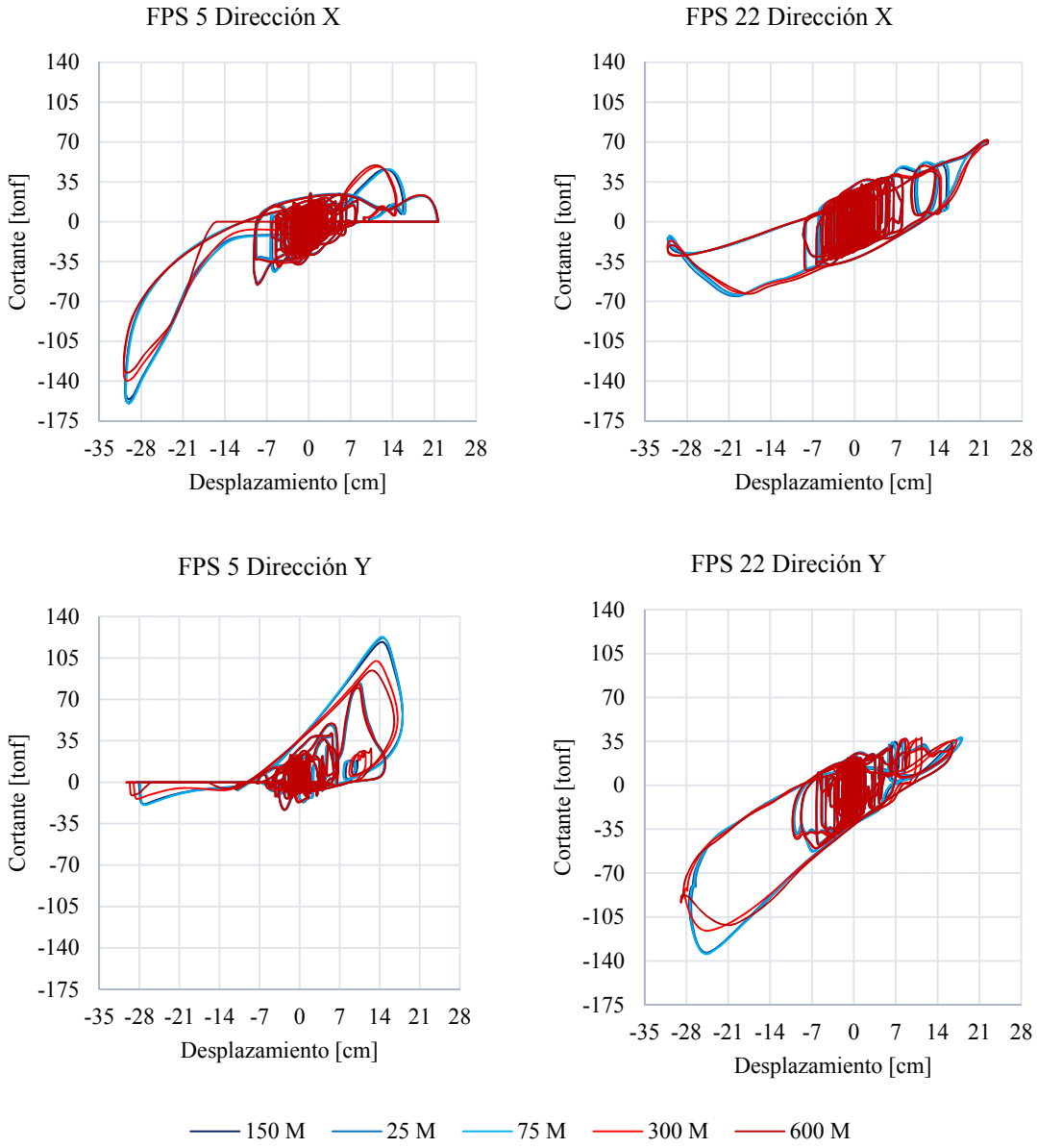


Figura IV-18: Curvas Fuerza - Deformación de los Aisladores 5 y 22 FPS, análisis FNA para diferente número de modos.

IV.7.1.4 Drift y Desplazamiento en la Superestructura.

La figura IV-19 detalla las Drift y Desplazamiento de la superestructura para el sistema aislado FPS, análisis FNA con diferente número de modos. De la figura observamos que las respuestas de Drift y Desplazamientos son iguales para todos los modelos, el desplazamiento máximo en el techo es de 35 cm en el sentido X y 39 cm en el sentido Y.

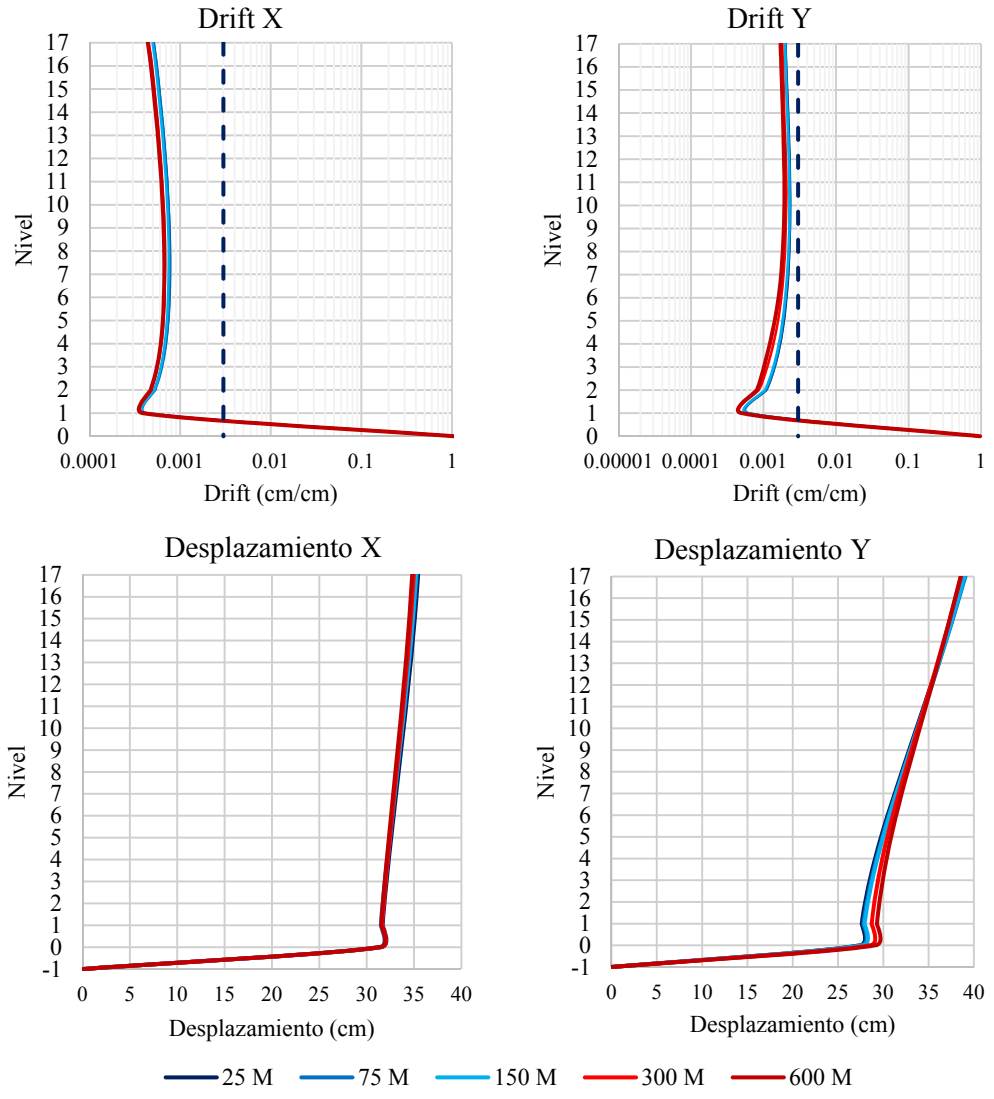


Figura IV-19: Drift y Desplazamiento en la superestructura, Análisis FNA para diferentes número de modos, aislador FPS.

IV.7.1.5 Tiempo Historia desplazamiento y cortante en la base.

La figura IV-20 detalla el tiempo historia del desplazamiento y cortantes en la base para las direcciones X y Y, para aisladores FPS, análisis FNA con diferentes modos. De la figura observamos que no hay diferencia en los desplazamientos, sin embargo en los cortantes los menores modos presentan valores mayores.

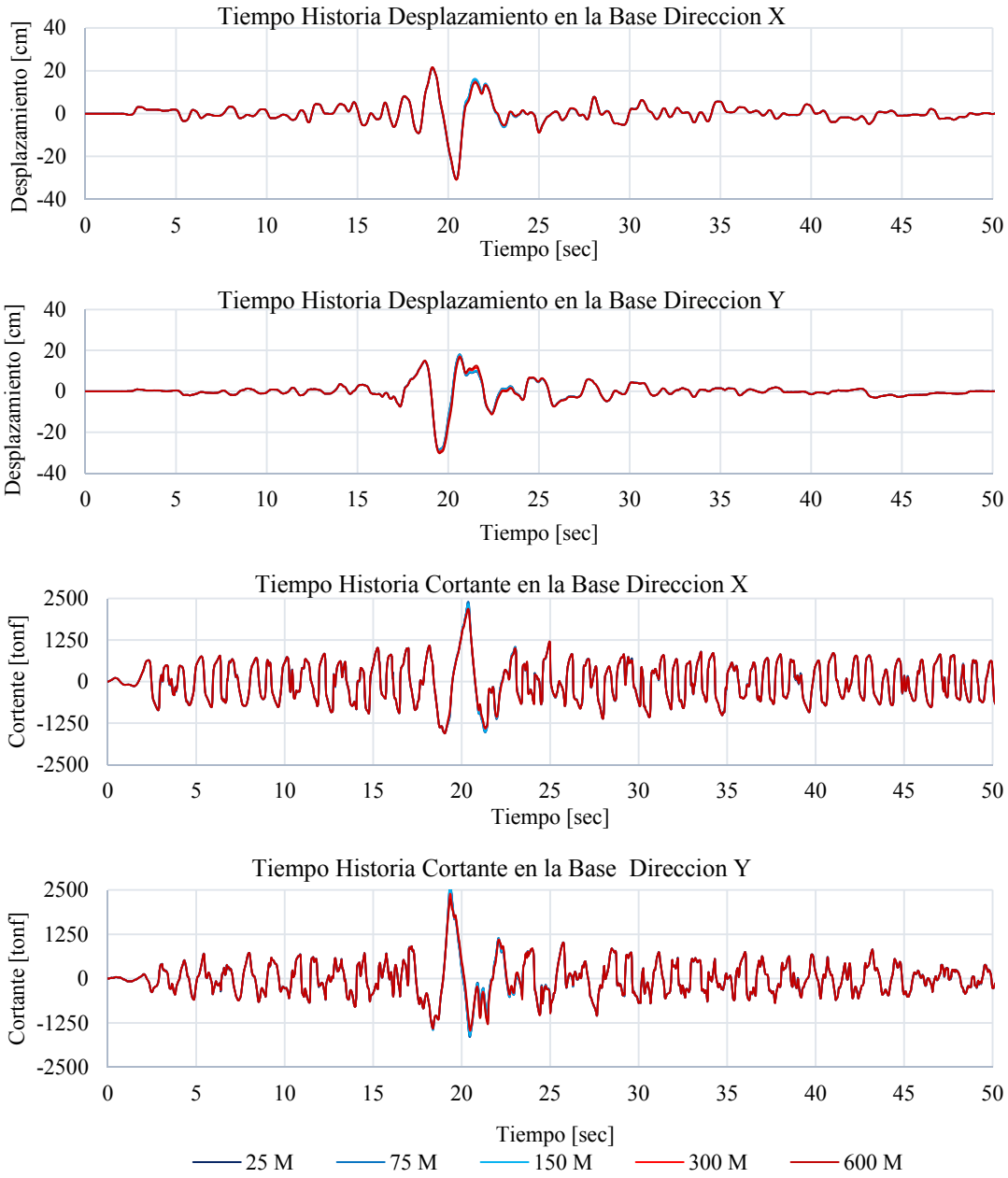


Figura IV- 20: Tiempo Historia de los desplazamiento y cortante en la base en la dirección X y Y, Análisis FNA para diferentes número de modos, aislador FPS.

IV.7.1.6 Comparación de las respuestas máximas.

La figura IV- 21 detalla las respuestas máximas del cortante basal, cortante máximo en el aislador, suma de la fuerza axial sobre los aisladores, momento en la base, desplazamiento en la base y el desplazamiento en el techo, para un análisis FNA con diferentes número de modos, sistema aislado con FPS. La figura detalla que los sistemas con menores modos presentan mayores valores de fuerza, además que los desplazamientos en la base y techo son similares para todos los sistemas.

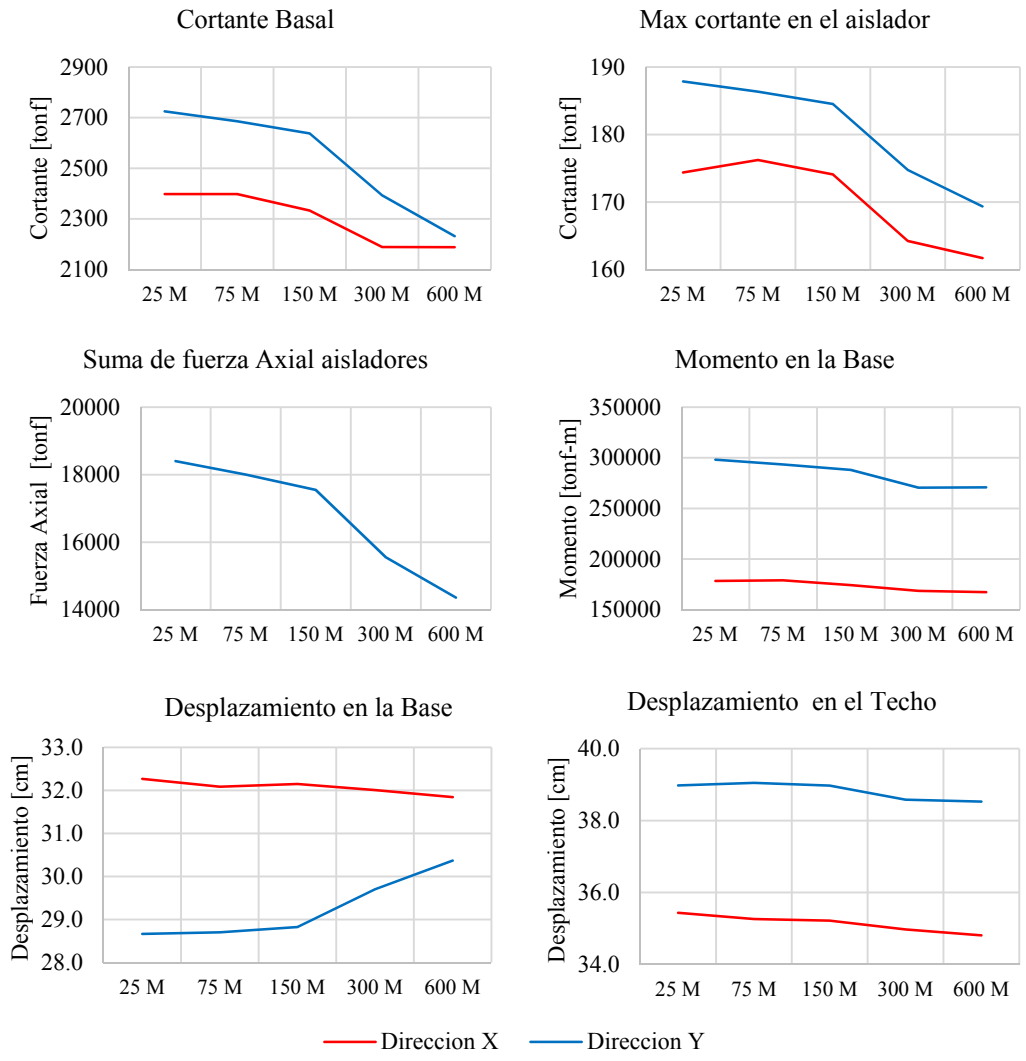


Figura IV- 21: Comparación de la respuesta máxima en el sistema con FPS, Análisis FNA para diferente número de modos.

IV.7.2 Análisis de sensibilidad en el modelo matemático para diferente factor de amortiguamiento en la superestructura, aislador FPS.

El análisis de sensibilidad en el modelo matemático para diferentes factores de amortiguamiento inherente de la superestructura será hecho al modelo 2 con aislador FPS, el análisis se hará para los factores de amortiguamiento $\xi = 0\%$, $\xi = 2\%$, $\xi = 5\%$. Se supondrá diafragma flexible en los entrepisos y el método de análisis será FNA con 300 de vectores Ritz, las respuestas del análisis se detalla a continuación:

IV.7.2.1 Fuerza Axial en los aisladores FPS.

La figura IV- 22 detalla los valores máximos y mínimos de la fuerza axial en los aisladores FPS, análisis FNA con diferente factor de amortiguamiento en la superestructura. Se observa de la figura, que el sistema con menor amortiguamiento presenta fuerza levemente mayores con un máximo de 1180 tonf con respecto 1108 tonf del sistema con mayor amortiguamiento.

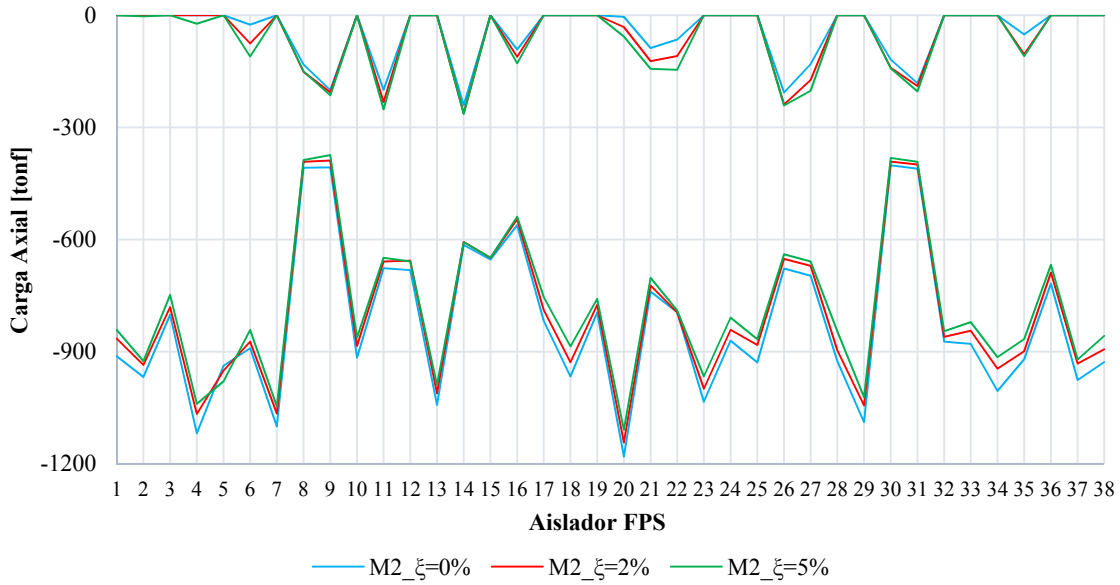


Figura IV- 22: Fuerza axial máxima y mínima en los aisladores FPS, análisis FNA para distintos factores de amortiguamiento en la superestructura.

IV.7.2.2 Curva Fuerza – Deformación para los aisladores 5 y 22 FPS.

La figura IV- 23 detalla las curvas fuerza – deformación de los aisladores 5 y 22 FPS, análisis FNA para distintos factores de amortiguamiento en la superestructura. De la figura se observa que los cortantes y desplazamiento en los aisladores son muy similares para los distintos factores de amortiguamiento, con un cortante máximo de 142 tonf y un desplazamiento máximo de 32 cm.

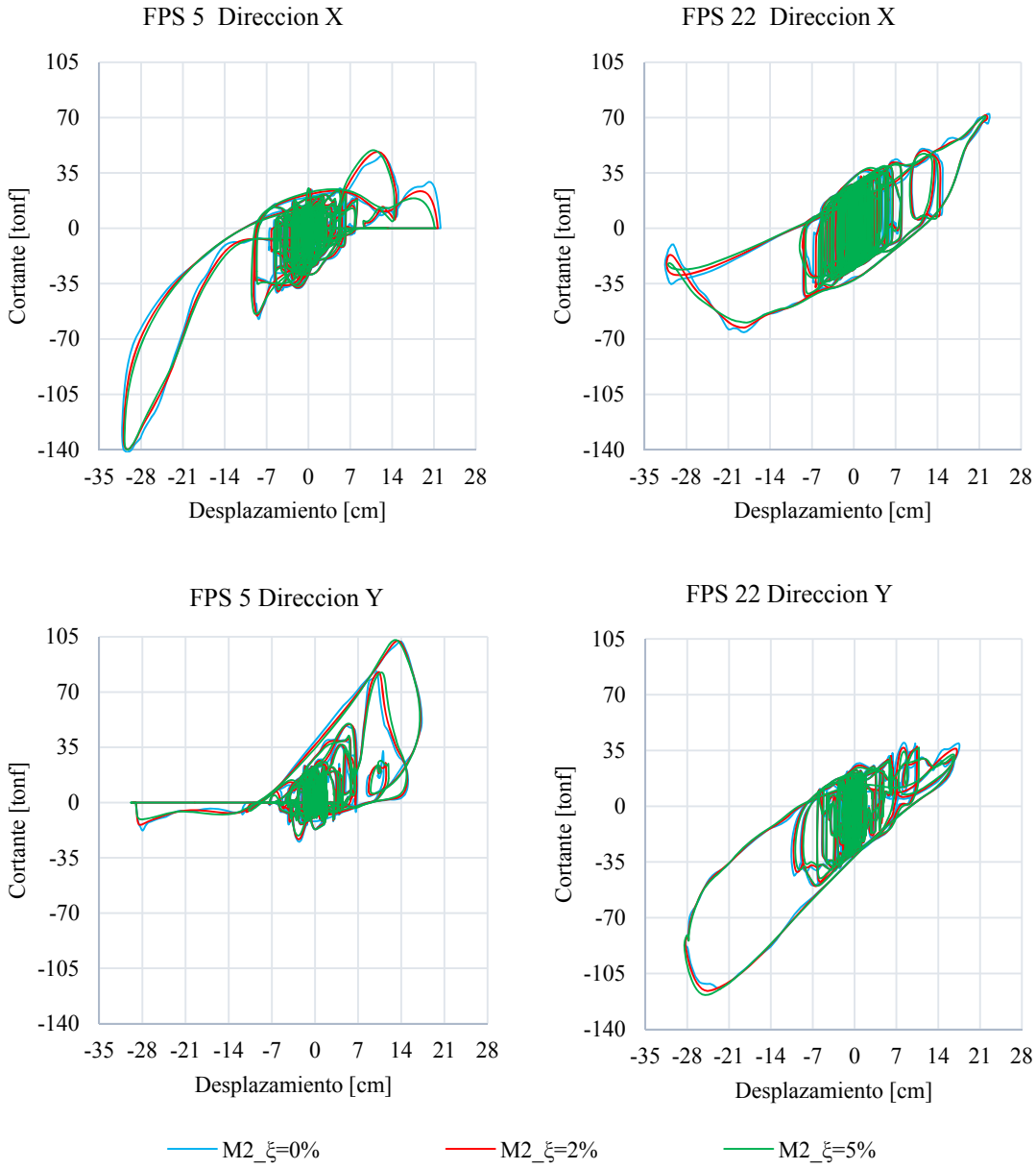


Figura IV- 23: Curvas Fuerza - Deformación de los Aisladores 5 y 22 FPS, análisis FNA para distintos factores de amortiguamiento en la superestructura.

IV.7.2.3 Drift y Desplazamiento en la Superestructura.

La figura IV- 24 detalla los Drift y Desplazamiento de la superestructura para el sistema aislado FPS, análisis FNA para distintos factores de amortiguamiento en la superestructura. De la figura se observa que los Drift y Desplazamientos son muy similares para todos los sistemas, el desplazamiento máximo en el techo en la dirección X es 35 cm y 39 cm en la dirección Y.

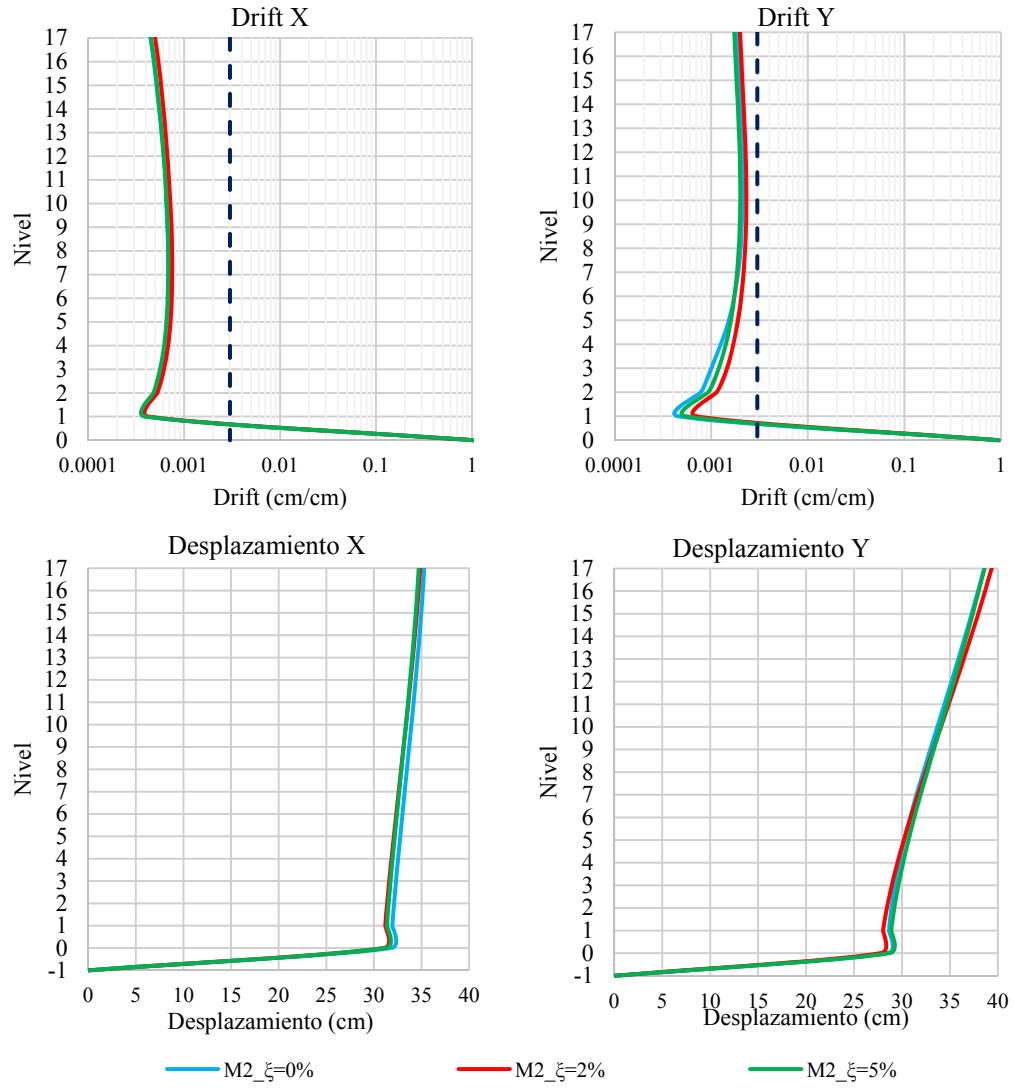


Figura IV- 24: Drift y Desplazamiento en la superestructura, análisis FNA para distintos factores de amortiguamiento en la superestructura, aislador FPS.

IV.7.2.4 Tiempo Historia desplazamiento y cortante en la base.

La figura IV- 25 detalla el tiempo historia del desplazamiento y cortantes en la base para las direcciones X y Y, sistema con aisladores FPS, análisis FNA para distintos factores de amortiguamiento en la superestructura. De la figura se observa que las respuesta en el tiempo desplazamientos y cortantes en la base son muy similares para todos los sistemas.

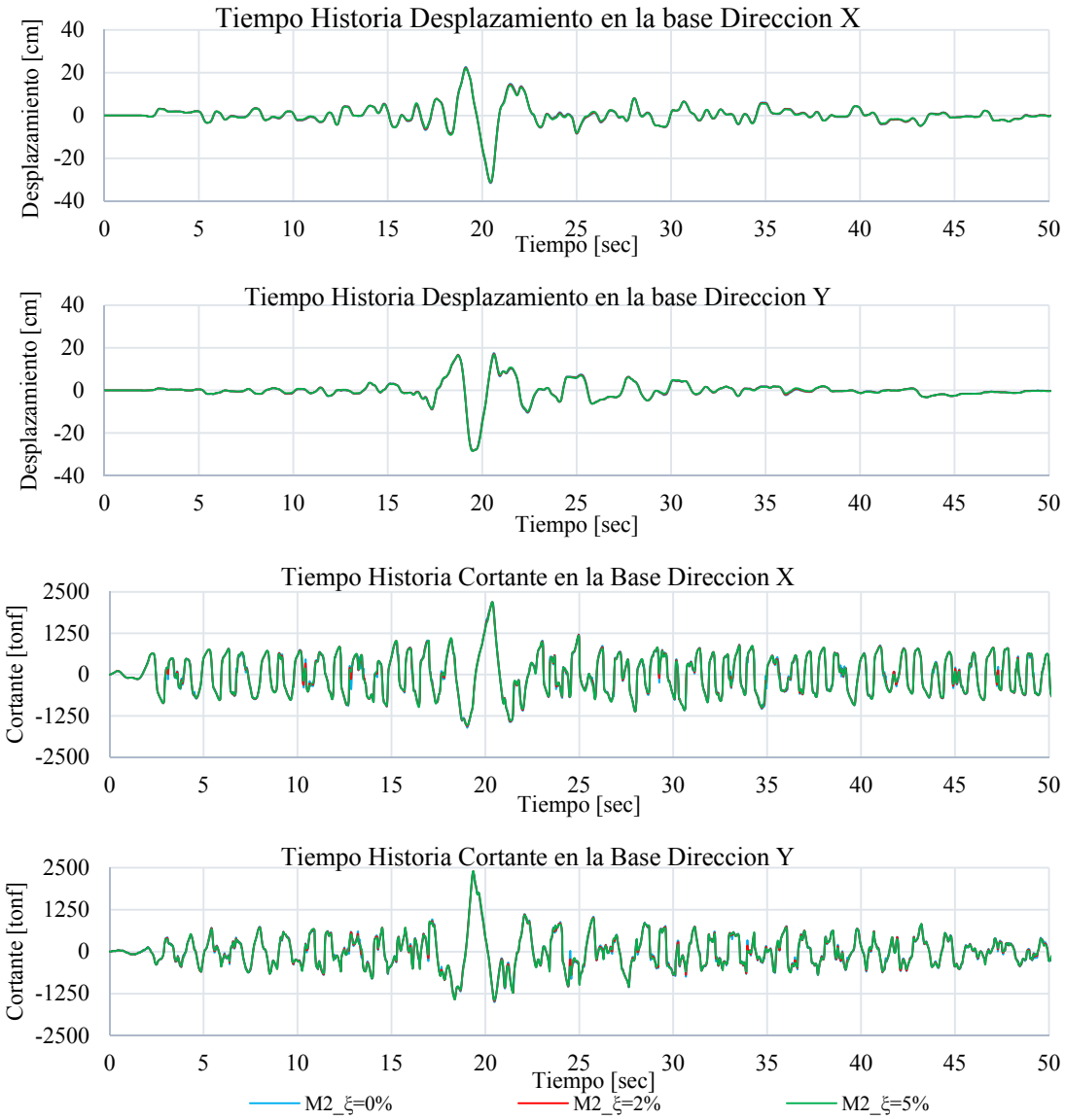


Figura IV- 25: Tiempo Historia del desplazamiento y cortante en la base dirección X y Y, Análisis FNA para distintos factores de amortiguamiento en la superestructura, aislador FPS.

IV.7.2.5 Comparación de las respuestas máximas.

La figura IV- 26 detalla las respuestas máximas del cortante basal, cortante máximo en el aislador, suma de la fuerza axial sobre los aisladores, momento en la base, desplazamiento en la base y el desplazamiento en el techo, análisis FNA para distintos factores de amortiguamiento en la superestructura, sistema aislado con FPS. De la figura se observa que solo existe diferencia en las respuestas de la fuerza cortante y fuerza axial para los sistemas con mayor valor de amortiguamiento estas respuestas son menores.

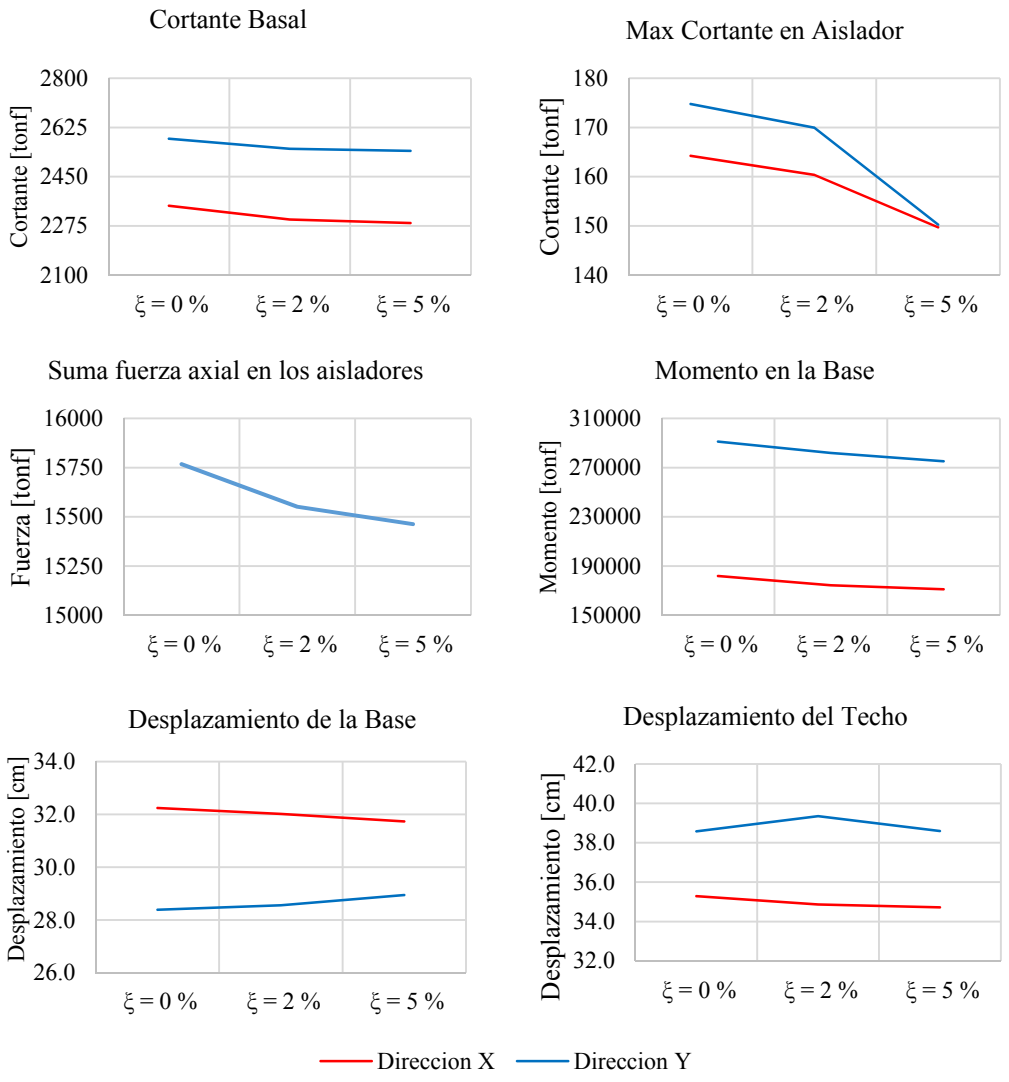


Figura IV- 26: Comparación de la respuesta máxima en el sistema con FPS, análisis FNA para distintos factores de amortiguamiento en la superestructura.

IV.7.3 Análisis de Sensibilidad para diferentes métodos de Análisis no lineal, para el sistema con aisladores FPS.

El análisis de sensibilidad para diferentes métodos de análisis será hecho al modelo 2 con aisladores FPS, se hará un análisis FNA considerando 300 vectores Ritz y un análisis por Integración directa método numérico de Newmark aceleración constante, con coeficientes $\gamma = \frac{1}{2}$; $\beta = \frac{1}{4}$ con iteración Newton Raphson. Se supondrá para ambos métodos que el amortiguamiento inherente en la superestructura será cero, debido a que el análisis por integración directa ID demanda mucho recurso computacional se hará una simplificación en el modelo matemático, esta consistirá en cambiar el modelamiento de los elementos del entrepiso de Shell por Membrana, además los entrepisos serán modelados como diafragma rígido tipo Plate. Las respuestas del análisis se detallan a continuación:

IV.7.3.1 Fuerza Axial en los aisladores FPS.

La figura IV- 27 detalla los valores máximos y mínimos de la fuerza axial en los aisladores FPS para los distintos métodos de análisis ID y FNA. De la gráfica podemos observar que el análisis por ID presenta mayores valores de fuerza axial en los aisladores con una fuerza máxima de 1600 tonf en comparación del máximo de 1060 tonf del método FNA.

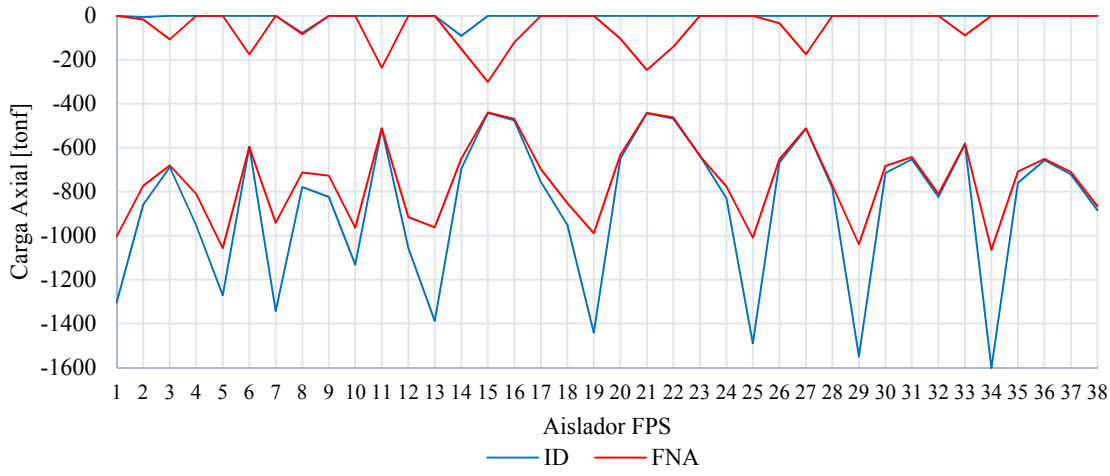


Figura IV- 27: Fuerza axial máxima y mínima en los aisladores FPS, para diferente métodos de análisis ID y FNA.

IV.7.3.2 Curva Fuerza – Deformación para los aisladores 5 y 22 FPS.

La figura IV- 28 detalla las curvas fuerza – deformación de los aisladores 5 y 22 FPS, para distintos análisis ID y FNA. De la figura se observa que existe un diferencia marcada en los máximos valores de cortante para ambos métodos, el sistema con análisis ID detalla un cortante máximo de 203 tonf en comparación de 171 tonf del método FNA. En cuanto a los desplazamientos los valores son iguales para ambos métodos.

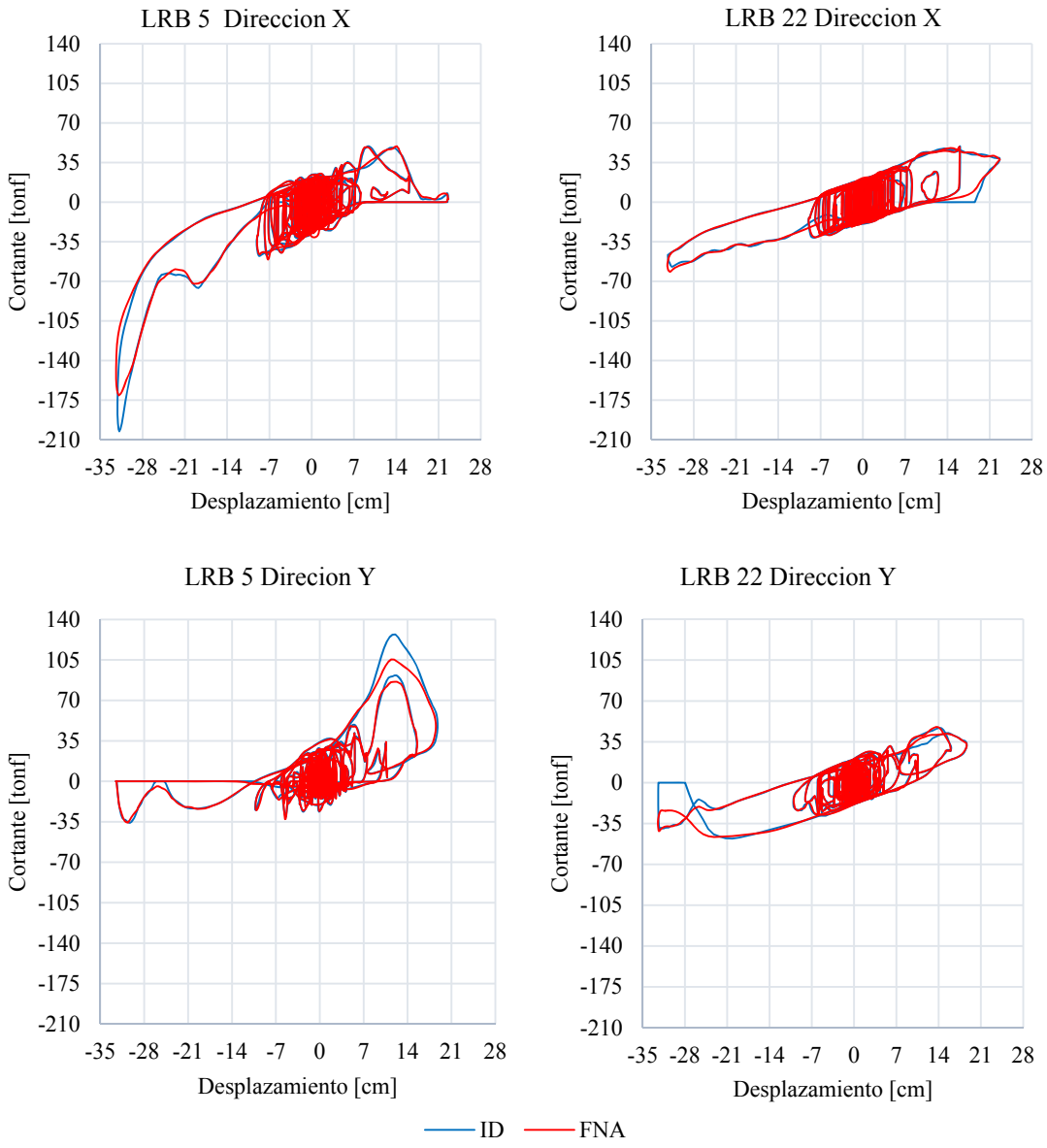


Figura IV- 28: Curvas Fuerza - Deformación de los Aisladores 5 y 22 FPS, para diferentes métodos de análisis ID y FNA.

IV.7.3.3 Drift y Desplazamiento en la Superestructura.

La figura IV- 29 detalla los Drift y Desplazamientos de la superestructura para aislador FPS para diferentes métodos de análisis ID y FNA. La figura detalla que los Drift y Desplazamientos son iguales para ambos métodos. El desplazamiento máximo en el techo en la dirección X es de 33 cm y en la dirección Y de 36 cm.

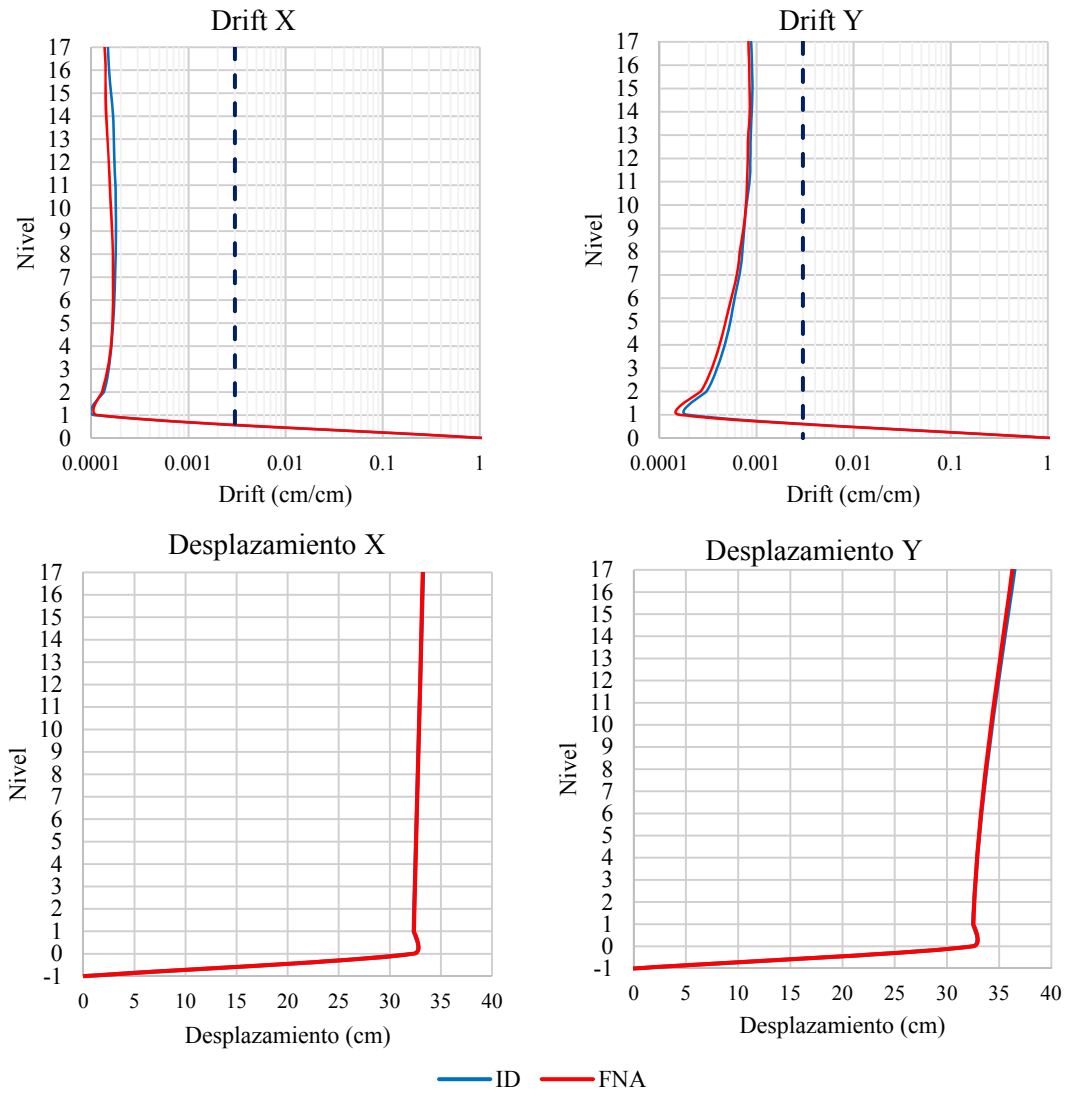


Figura IV- 29: Drirt y Desplazamiento en la superestructura, para diferentes métodos de análisis ID y FNA, aisladores FPS.

IV.7.3.4 Tiempo Historia desplazamiento y cortante en la base.

La figura IV- 30 detalla el tiempo historia del desplazamiento y cortantes en la base para las direcciones X y Y, para aisladores FPS, para diferentes métodos de análisis ID y FNA. De la figura se puede observar que no existe una diferencia marcada en el tiempo historia del desplazamiento y cortante para ambos métodos.

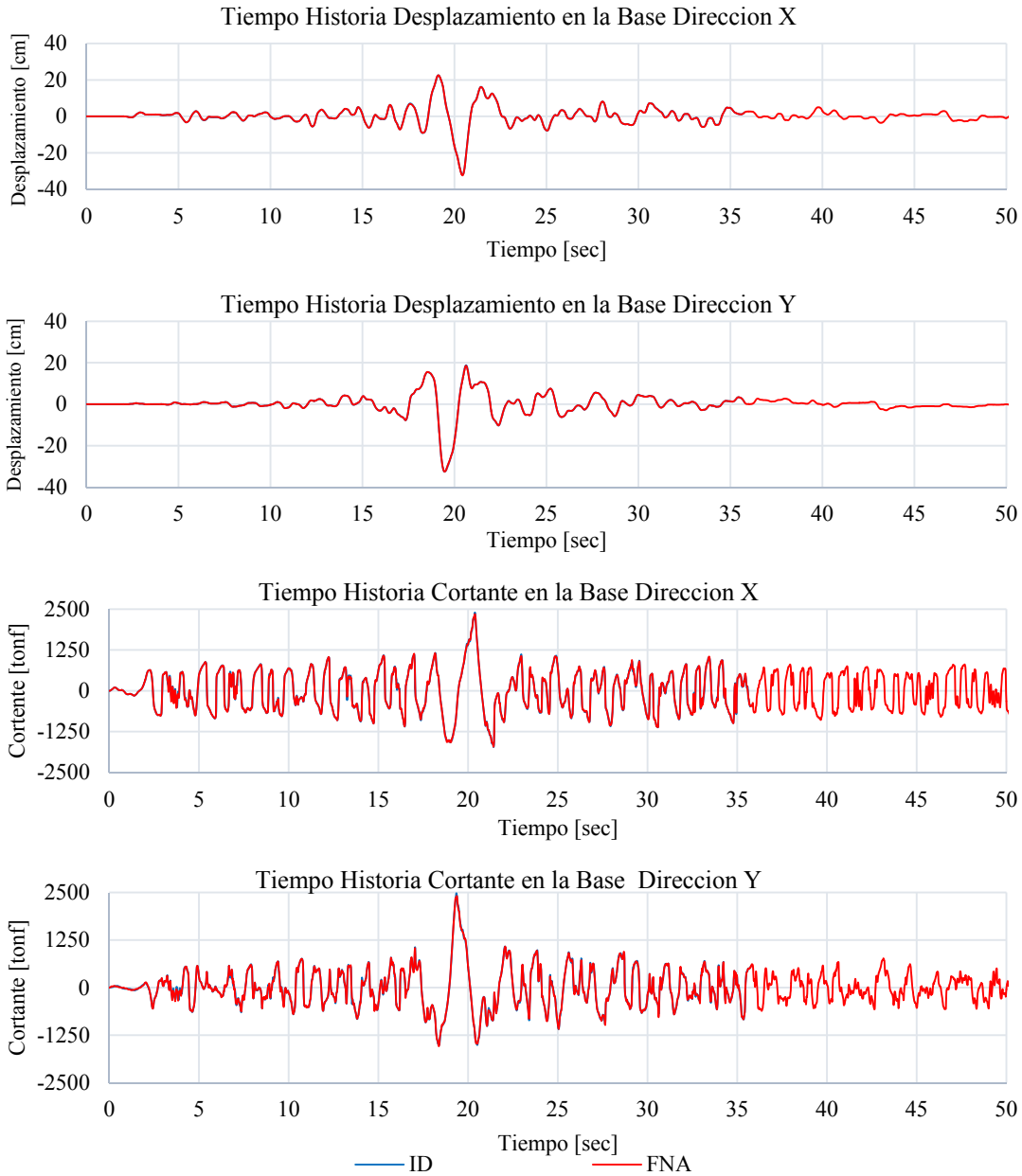


Figura IV- 30: Tiempo Historia del desplazamiento y cortante en la base dirección X y Y, para diferentes métodos de análisis ID y FNA, aisladores FPS.

IV.7.3.5 Comparación de las respuestas máximas.

La figura IV- 31 detalla las respuestas máximas del cortante basal, cortante máximo en el aislador, suma de la fuerza axial sobre los aisladores, momento en la base, desplazamiento en la base y el desplazamiento en el techo, para diferentes métodos de análisis ID y FNA. De la figura se observa que las respuestas de cortantes del método FNA tanto en la base como el máximo en el aislador, es menor con respecto a las respuestas de cortante del método ID. Las demás repuestas son similares para ambos métodos.

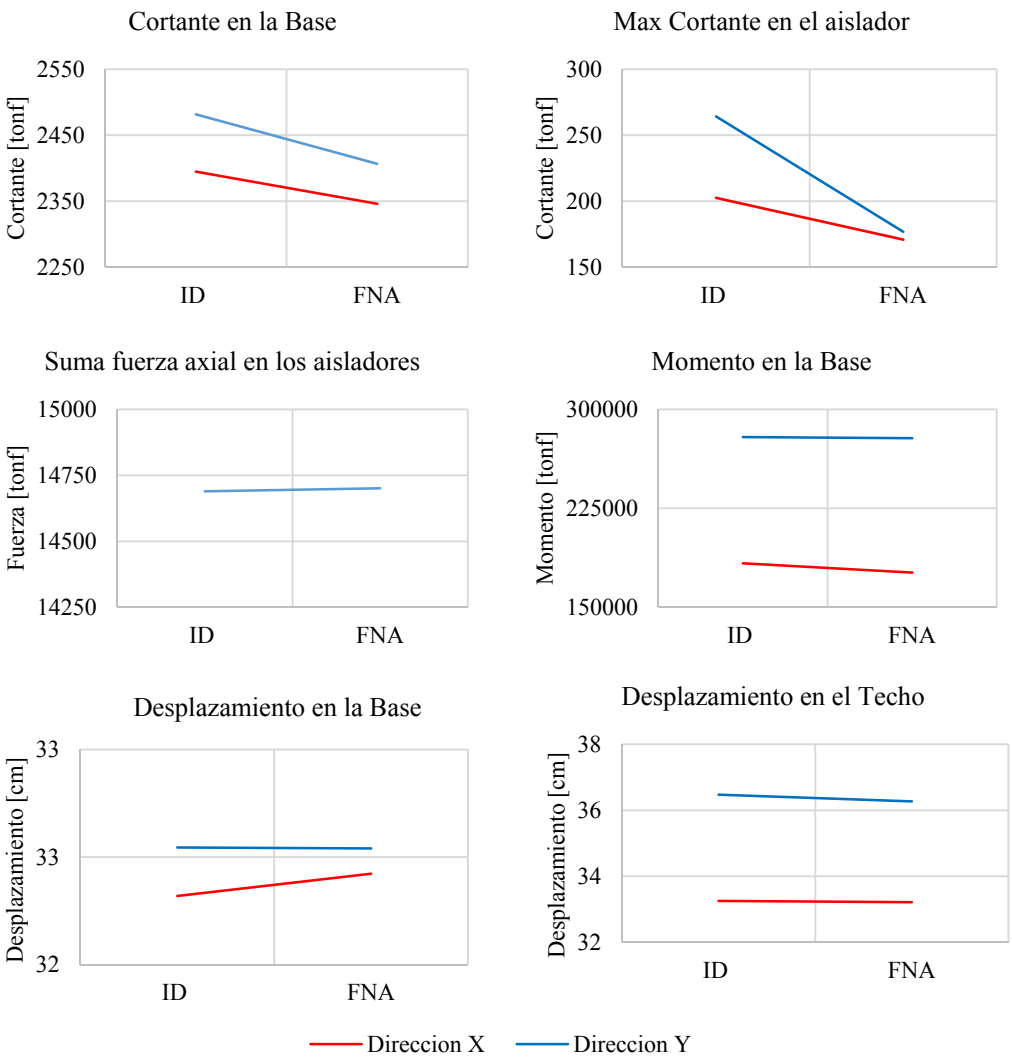


Figura IV- 31: Comparación de la respuesta máxima en el sistema con FPS, para diferentes métodos de análisis ID y FNA.

IV.7.4 Análisis de sensibilidad en el método de análisis ID para diferentes combinaciones del amortiguamiento tipo Rayleigh.

El análisis de sensibilidad en el método de análisis ID para diferentes combinaciones del amortiguamiento tipo Rayleigh se ha hecho al modelo 2, el análisis se hará para 6 combinaciones de amortiguamiento Rayleigh, estas combinaciones han sido definidas en función de la frecuencia vertical, la combinación 1 asigna un mayor factor de amortiguamiento a los modos superiores de la frecuencia vertical, la combinación 6 asigna mayores factores de amortiguamiento a los modos inferiores de la frecuencia vertical, las combinaciones 2, 3, 4 y 5 son valores intermedios de las combinaciones 1 y 6estas se detallan en la figura IV- 32 y en la tabla IV-5. Se repiten las suposiciones al modelo matemático descritas en la sección IV-7.3, el marco teórico para el cálculo de los factores de amortiguamiento tipo Rayleigh para diferentes frecuencias se detalla en el Anexo B-4.

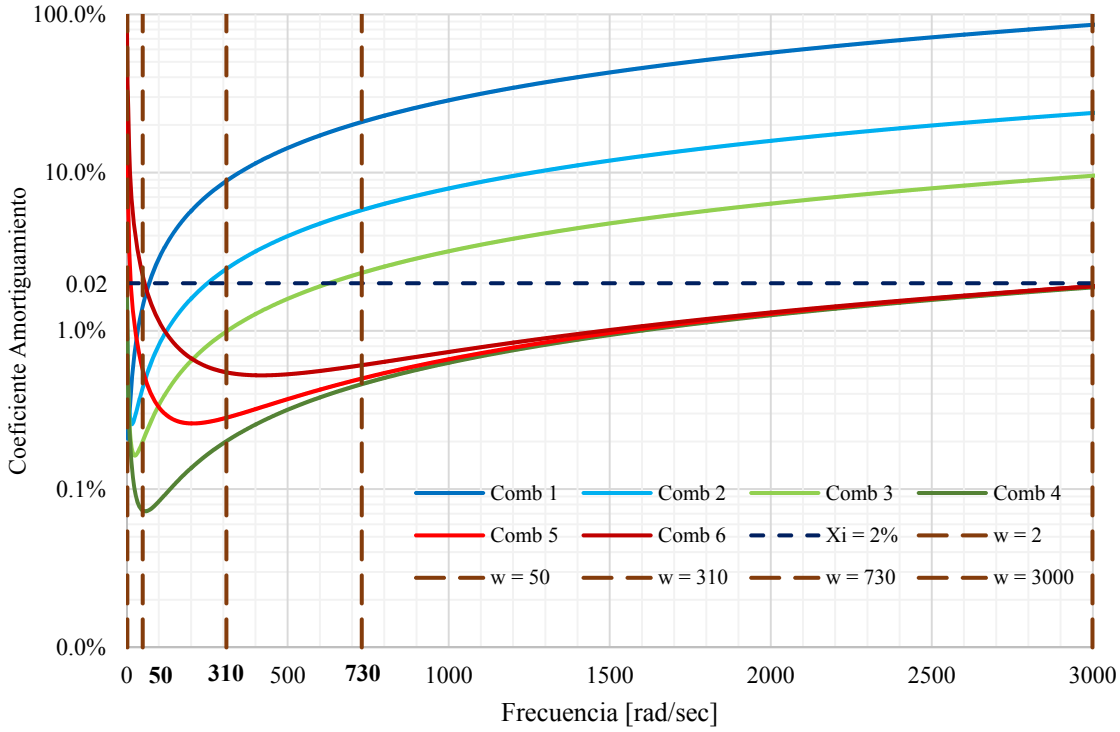


Figura IV- 32: Detalle de las curvas para las distintas combinaciones del amortiguamiento tipo Rayleigh, análisis ID, aislador FPS.

Tabla IV-5: Combinaciones amortiguamiento Rayleigh, análisis ID, aislador FPS.

T	ω	ΣΓz	Combinaciones del factor de amortiguamiento					
[sec]	[rad/sec]	%	Comb 1	Comb 2	Comb 3	Comb 4	Comb 5	Comb 6
3.142	2	0	0.2%	1.1%	1.1%	1.0%	13.3%	54.6%
0.123	50	0.806	1.5%	0.5%	0.2%	0.1%	0.6%	2.1%
0.020	310	0.931	9.0%	2.5%	1.0%	0.2%	0.3%	0.5%
0.009	730	0.971	20.9%	5.8%	2.3%	0.5%	0.5%	0.6%
0.002	3000	1	91.2%	25.3%	10.1%	2.0%	2.0%	2.0%

IV.7.4.1 Fuerza Axial en los aisladores FPS.

La figura IV- 33 detalla los valores máximos y mínimos de la fuerza axial en los aisladores FPS, análisis ID para diferentes combinaciones del amortiguamiento en la superestructura. La figura detalla que la combinación 6 es la que presenta menor fuerza, las combinaciones 3 y 4 presentan los mayores valores de fuerzas, fuerzas similares al sistema con amortiguamiento inherente de cero, las fuerzas máximas para las combinación son: Comb 1 = 1105 tonf, Comb 2 = 1338 tonf, Comb 3 = 1426 tonf, Comb 4 = 1498 tonf, Comb 5 = 1085 tonf, Comb 6 = 787 tonf, Damp Cero = 1570 tonf.

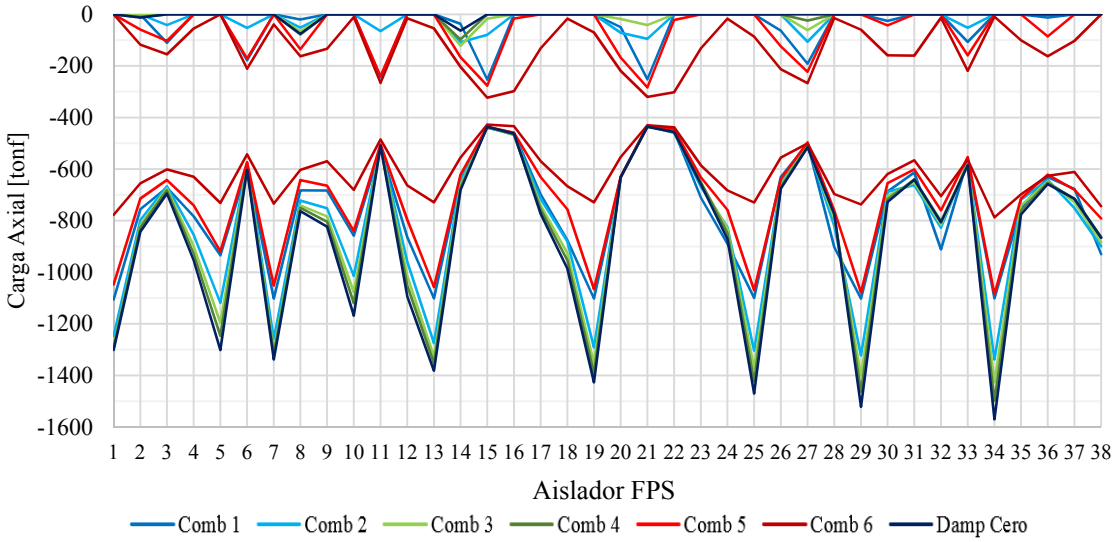


Figura IV- 33: Fuerza axial máxima y mínima en los aisladores FPS, para diferente combinaciones de amortiguamiento inherente en la superestructura análisis ID.

IV.7.4.2 Curva Fuerza – Deformación para los aisladores 5 y 22 FPS.

La figura IV- 34 detalla las curvas fuerza – deformación en la dirección X de los aisladores 5 y 22 FPS, análisis ID para diferentes combinaciones del amortiguamiento inherente en la superestructura. La figura detalla que los desplazamientos y cortantes son sensibles a las combinaciones del amortiguamiento, presentando un menor valor la combinación 6, las combinaciones 3 y 4 presentan respuestas que tienen al amortiguamiento cero. Los cortantes se describen Comb 1 = 118 tonf, Comb 2 = 159 tonf, Comb 3 = 177 tonf, Comb 4 = 189 tonf, Comb 5 = 115 tonf, Comb 6 = 58 tonf, Damp Cero = 200 tonf. Y los desplazamientos describen Comb 1 = 20 cm, Comb 2 = 27 cm, Comb 3 = 30 cm, Comb 4 = 31 cm, Comb 5 = 22 cm, Comb 6 = 12 cm, Damp Cero = 32 cm.

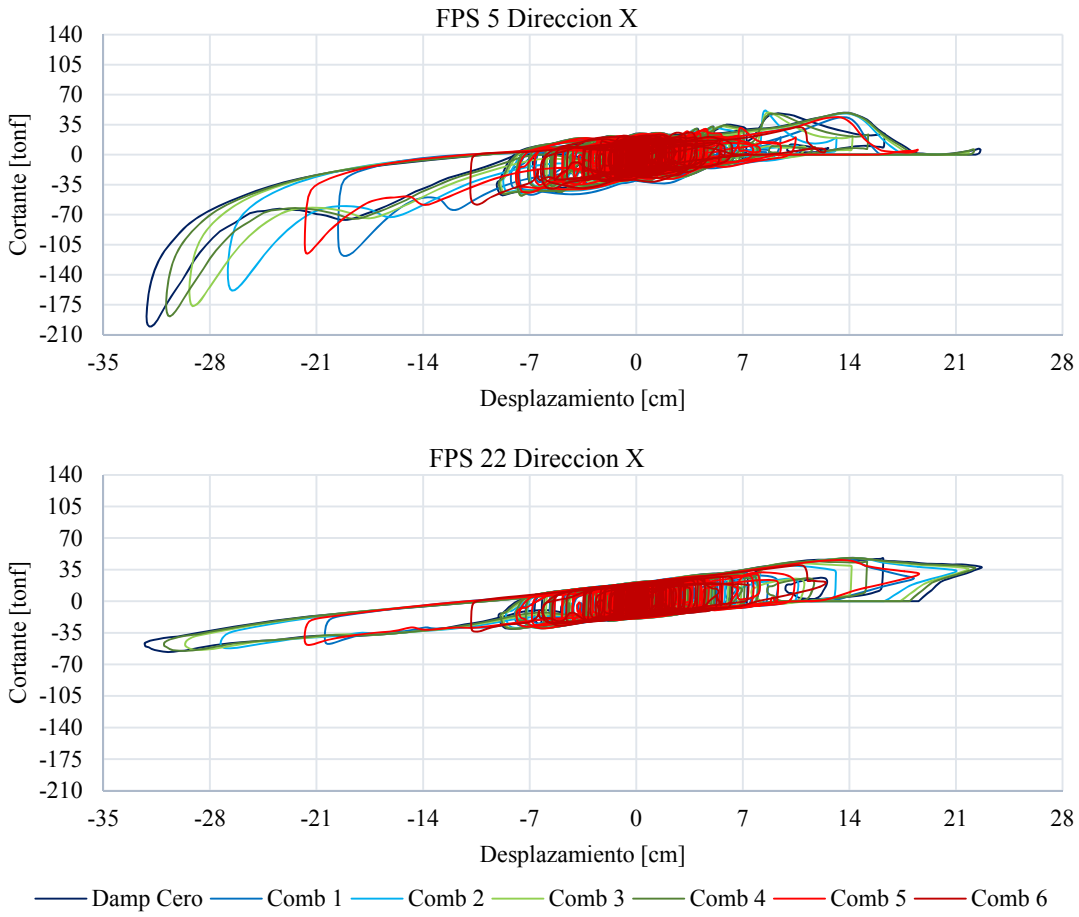


Figura IV- 34: Curvas Fuerza – Deformación en la dirección X de los Aisladores 5 y 22 FPS, para diferente combinaciones de amortiguamiento inherente en la superestructura análisis ID.

La figura IV- 35 detalla las curvas fuerza – deformación en la dirección Y de los aisladores 5 y 22 FPS, análisis ID para diferentes combinaciones del amortiguamiento inherente en la superestructura. La figura detalla que los desplazamientos y cortantes son sensibles a las combinaciones del amortiguamiento, presentando un menor valor la combinación 6, las combinaciones 3 y 4 presentan respuestas que tienen al amortiguamiento cero. Los cortantes se describen Comb 1 = 72 tonf, Comb 2 = 105 tonf, Comb 3 = 117 tonf, Comb 4 = 125 tonf, Comb 5 = 71 tonf, Comb 6 = 45 tonf, Damp Cero = 134 tonf. Y los desplazamientos describen Comb 1 = 25 cm, Comb 2 = 29 cm, Comb 3 = 31 cm, Comb 4 = 31 cm, Comb 5 = 25 cm, Comb 6 = 15 cm, Damp Cero = 32 cm.

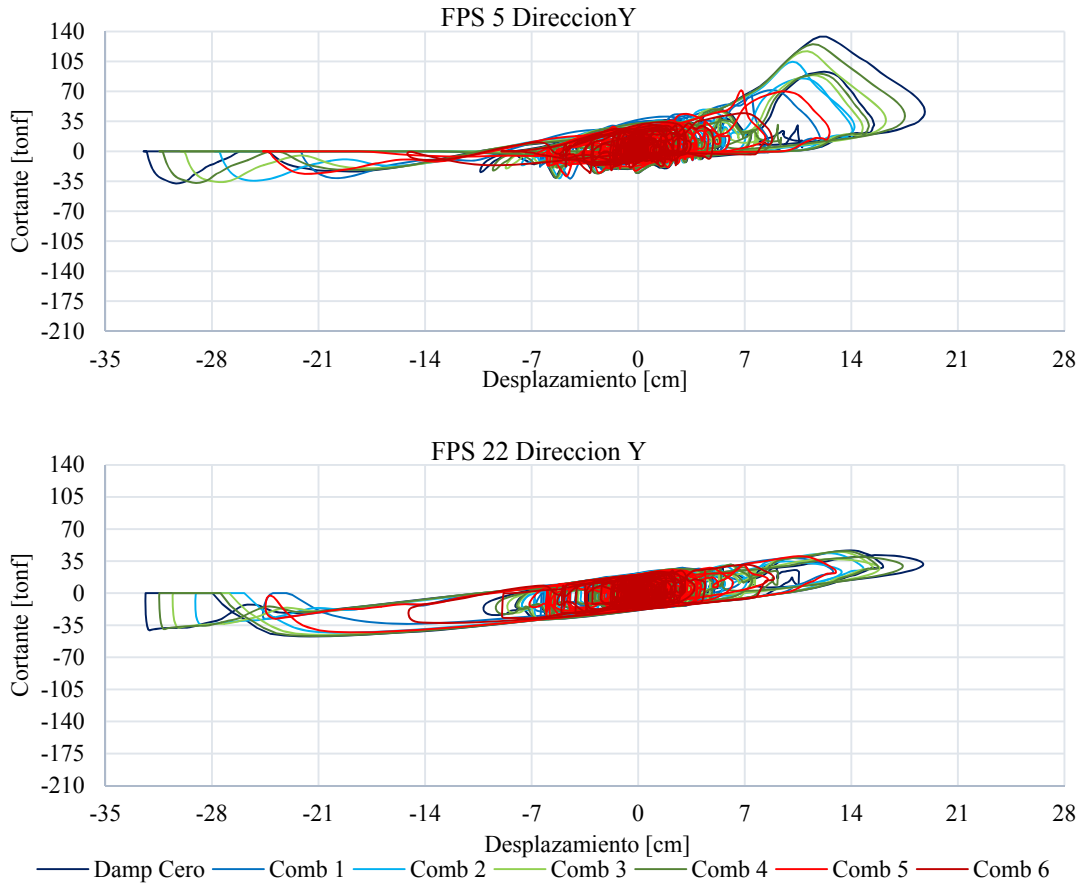


Figura IV- 35: Curvas Fuerza – Deformación en la dirección Y de los Aisladores 5 y 22 FPS, para diferente combinaciones de amortiguamiento inherente en la superestructura análisis ID.

IV.7.5 Análisis de sensibilidad en el modelo matemático para diferente tipo de diafragma en el entrepiso, sistema aislado FPS.

El análisis de sensibilidad en el modelo matemático para diferentes tipos de diafragmas de los entrepisos del sistema será hecho al modelo 2 aislado en la base con FPS, el análisis se hará para un diafragma tipo flexible definida por las propiedades mecánicas que componen los elementos de la losa y un análisis para un diafragma de tipo Rígido sistema compuesto por un diafragma tipo Plate y elementos tipo Membrana para la losa. El método de análisis será FNA con 300 de vectores Ritz y el amortiguamiento inherente de la superestructura igual de cero, las respuestas del análisis se detalla a continuación:

IV.7.5.1 Fuerza Axial en los aisladores FPS.

La figura IV- 36 detalla los valores máximos y mínimos de la fuerza axial en los aisladores FPS, análisis FNA para diferentes tipos de diafragmas. Se observa de la figura que el sistema con diafragma flexible presenta mayor fuerza con un valor máximo de 1180 tonf con respecto 1065 tonf del sistema con diafragma rígido.

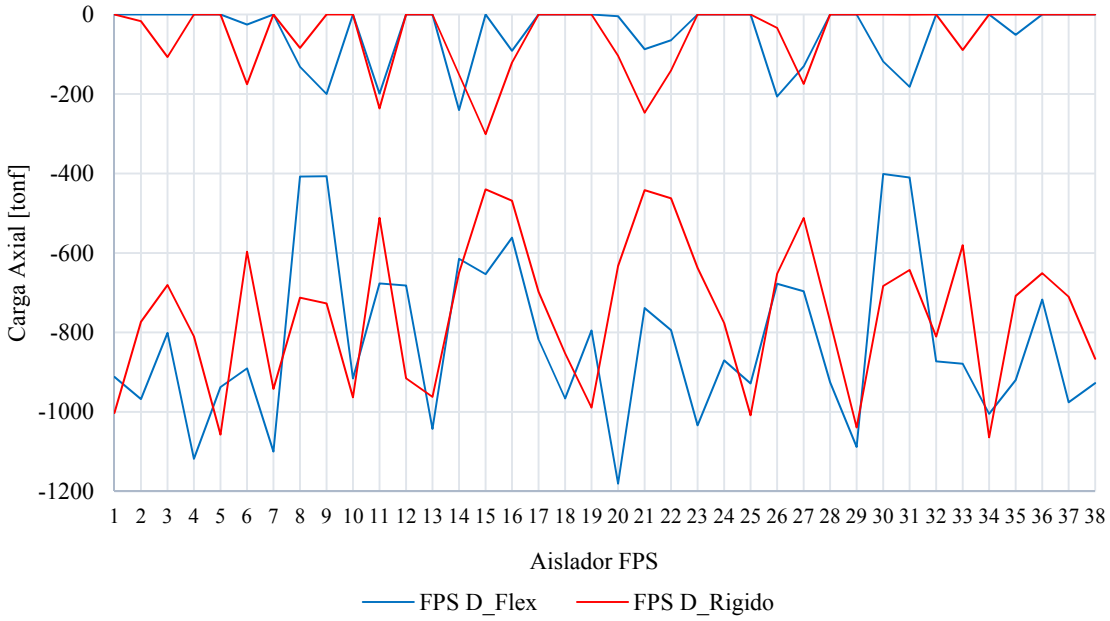


Figura IV- 36: Fuerza axial máxima y mínima en los aisladores FPS, para diferente tipo de diafragmas, análisis FNA.

IV.7.5.2 Curva Fuerza – Deformación para los aisladores 5 y 22 FPS.

La figura IV- 37 detalla las curvas fuerza – deformación de los aisladores 5 y 22 FPS, análisis FNA para diferentes tipos de diafragmas. Se observa de la figura que el aislador 22 (ubicado al centro de la estructura) del sistema con diafragma rígido presenta menores valores de cortante, sin embargo el aislador 5 (ubicado en un extremo de la estructura) del sistema con diafragma rígido presenta mayores valores de cortante además podemos observar que la deformación es similar para ambos sistemas.

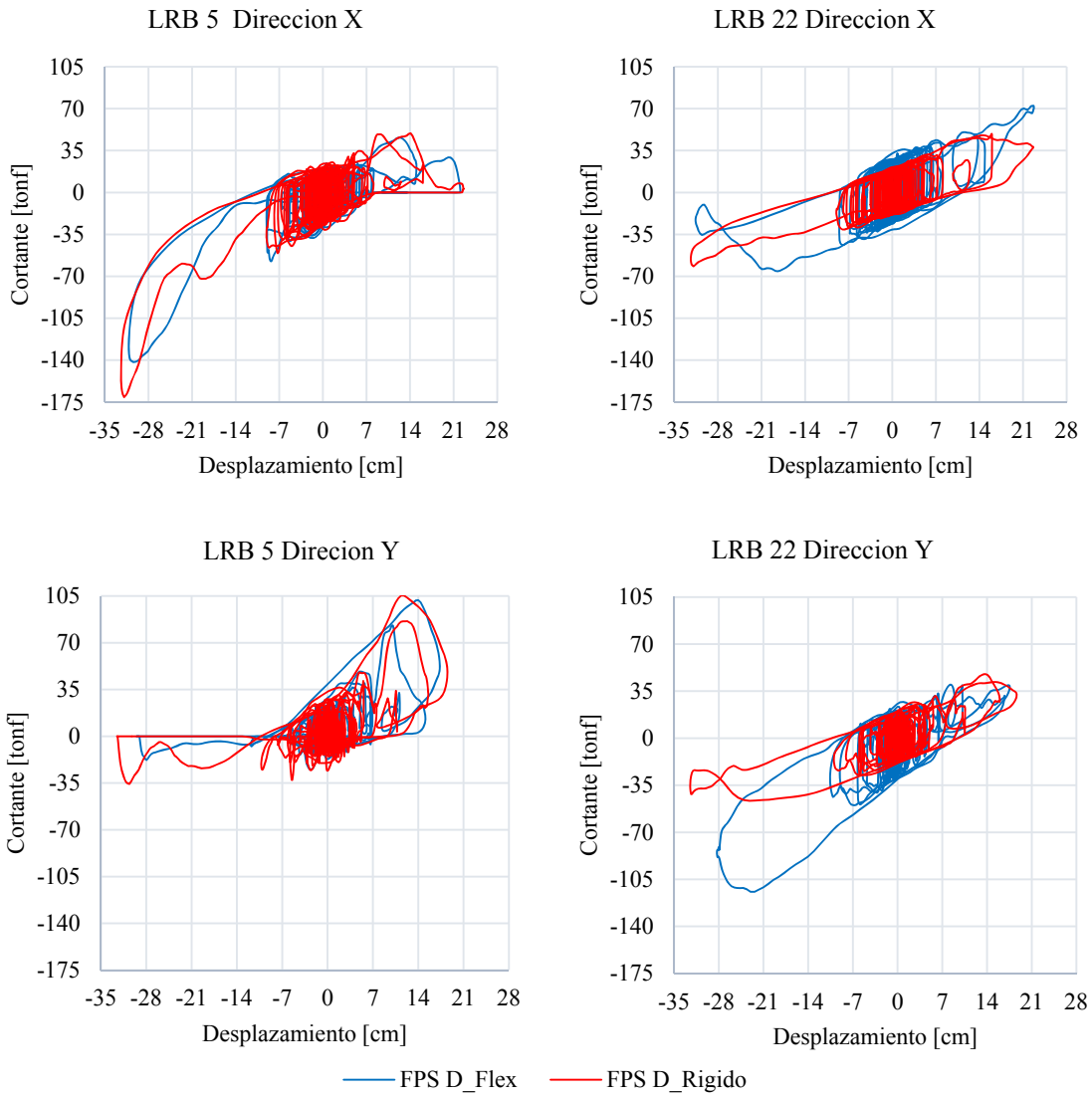


Figura IV- 37: Curvas Fuerza - Deformación de los Aisladores 5 y 22 FPS, para diferente tipo de diafragmas, análisis FNA.

IV.7.5.3 Drift y Desplazamiento en la Superestructura.

La figura IV- 38 detalla los Drift y Desplazamientos de la superestructura para el sistema aislado FPS, para diferentes tipos de diafragmas, análisis FNA. De la figura se observa que los Drift y Desplazamientos son menores en el sistema con diafragma rígido, el desplazamiento en el techo del sistema diafragma flexible es 35 cm en la dirección X y 38 cm en la dirección Y, y los desplazamientos en el techo del sistema con diafragma rígido es 33 cm en la dirección X y 36 cm en la dirección Y.

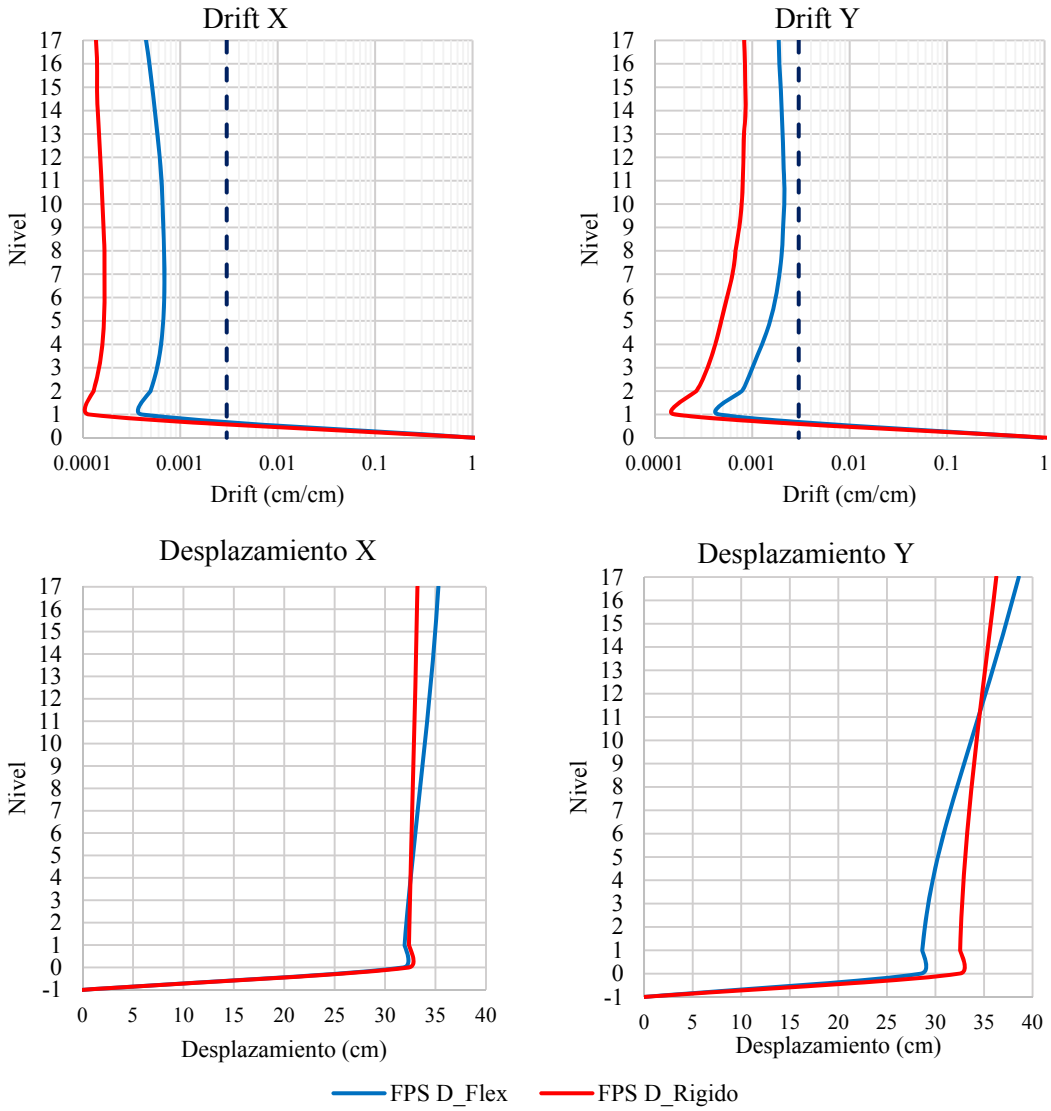


Figura IV- 38: Drift y Desplazamiento en la superestructura, para diferentes tipos de diafragmas, análisis FNA, aisladores FPS.

IV.7.5.4 Tiempo Historia desplazamiento y cortante en la base.

La figura IV- 39 detalla el tiempo historia del desplazamiento y cortantes en la base para las direcciones X y Y, para aisladores FPS, para diferente tipo de diafragmas, análisis FNA. De la figura se puede observar que existen variaciones en la respuesta en el tiempo para ambos sistemas, aunque no se detalla una diferencia marcada en los valores máximos.

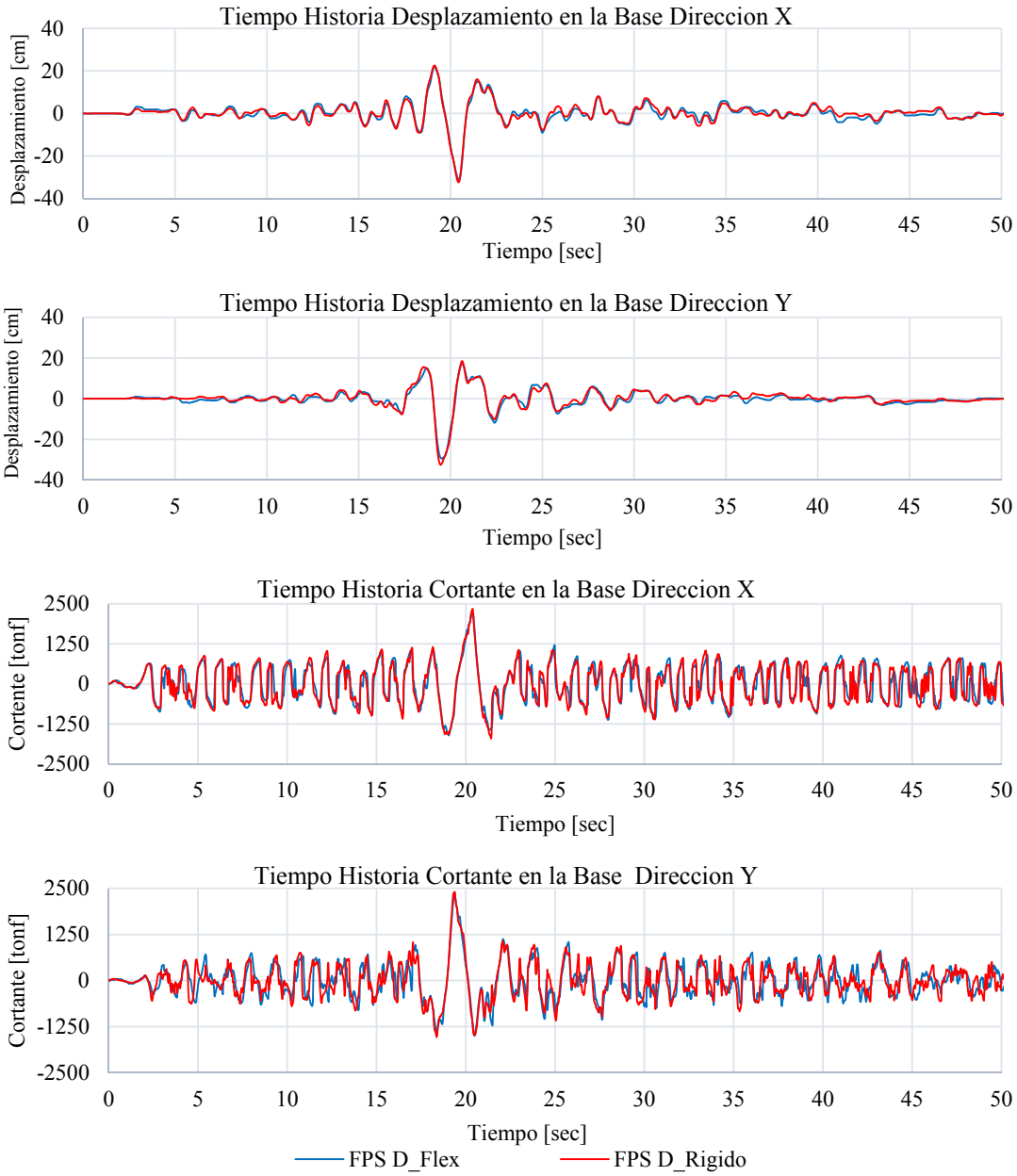


Figura IV- 39: Tiempo Historia del desplazamiento y cortante en la base dirección X y Y, análisis FNA para distintos tipos de diafragmas, aislador FPS.

IV.7.5.5 Comparación de las respuestas máximas.

La figura IV- 40 detalla las respuestas máximas del cortante basal, cortante máximo en el aislador, suma de la fuerza axial sobre los aisladores, momento en la base, desplazamiento en la base y el desplazamiento en el techo, análisis FNA para diferentes tipo de diafragmas, aisladores FPS. Lo más relevante de la figura es la diferencia de la máxima fuerza axial en los aisladores y el desplazamiento en el techo con valores menores para el sistema con diafragma rígido, las demás respuestas son muy similares para ambos sistemas.

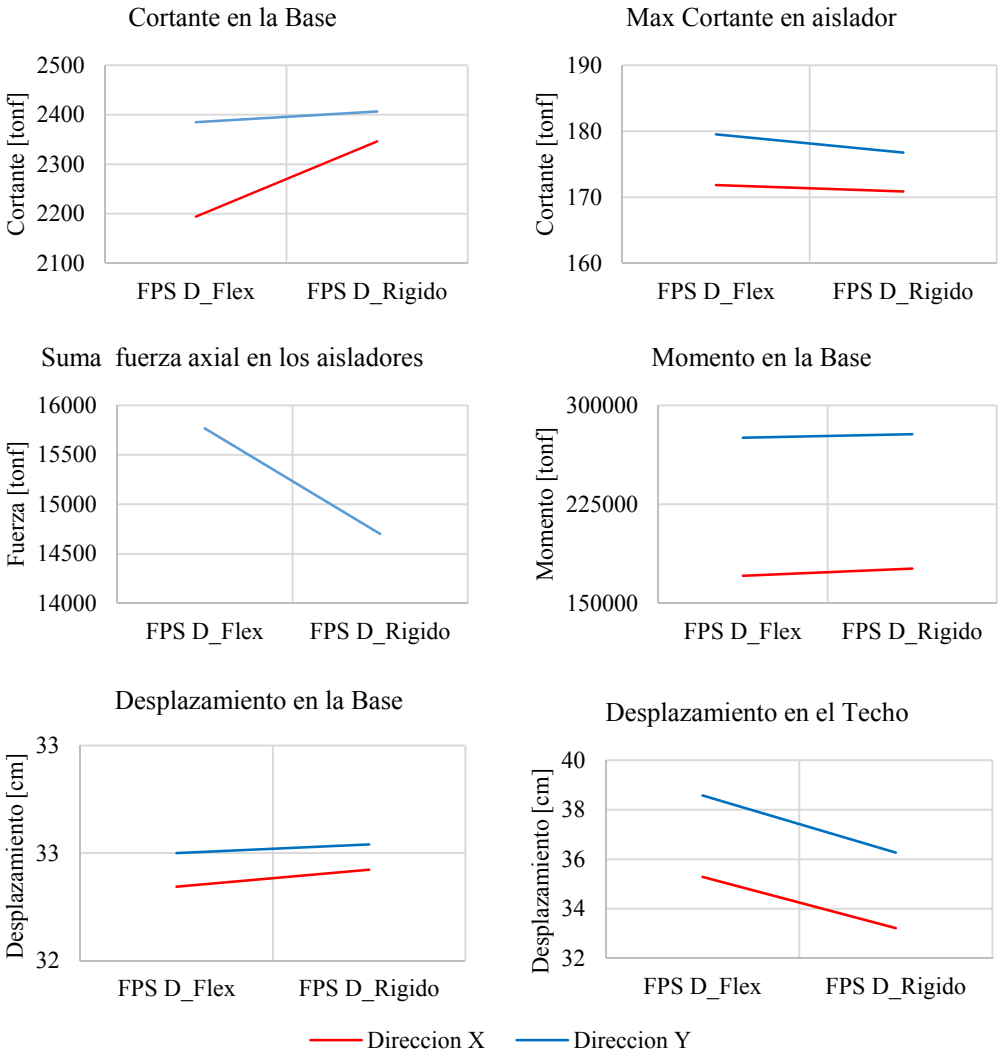


Figura IV- 40: Comparación de la respuesta máxima en el sistema con FPS, análisis FNA para distintos tipos de diafragmas.

IV.7.6 Respuesta de los cuatro modelos aislados con FPS.

Los cuatro modelos de base aislada con FPS han sido analizados con el método FNA considerando 300 vectores Ritz. Los modelos matemáticos han sido elaborados basados en las suposiciones descritas en la sección IV.3 además se considera que el entrepiso sea modelado como diafragma flexible y el amortiguamiento inherente en la superestructura de cero, se definirá como M1 el modelo 1, M2 como modelo 2, M3 como el modelo 3 y M4 como el modelo 4. Las respuestas para los cuatro modelos se detallan a continuación.

IV.7.6.1 Fuerza Axial en los aisladores FPS.

La figura IV- 41 detalla los valores máximos y mínimos de la fuerza axial en los aisladores FPS para los 4 modelos y un análisis FNA. De la figura observamos que el modelo 4 es el que presenta mayores valores de fuerza axial con 1440 tonf seguido del modelo 1 con 1290 tonf, modelo 2 con 1180 tonf y modelo 3 1130 tonf.

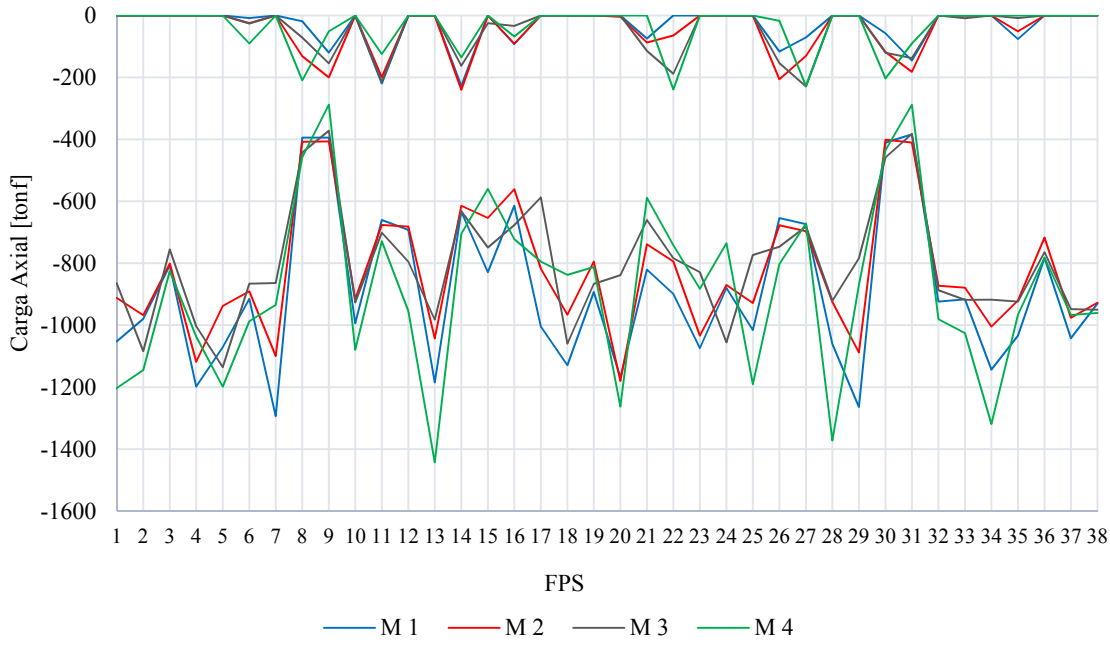


Figura IV- 41: Fuerza axial máxima y mínima en los aisladores FPS para los 4 modelos, método de análisis FNA.

IV.7.6.2 Curva Fuerza – Deformación para los aisladores 5 y 22 FPS.

La figura IV- 42 detalla las curvas fuerza – deformación de los aisladores 5 y 22 FPS, para los cuatro modelos y un análisis FNA. La figura detalla que los cortantes y los desplazamientos máximos son similares para los cuatro modelos, los máximos cortantes para M1 = 153 tonf, M2 = 142 tonf, M3 = 150 tonf y M4 = 153 tonf, en cuanto a los desplazamientos máximos M1 = 30 cm, M2 =31 cm, M3 =32 cm y M4 = 29 cm.

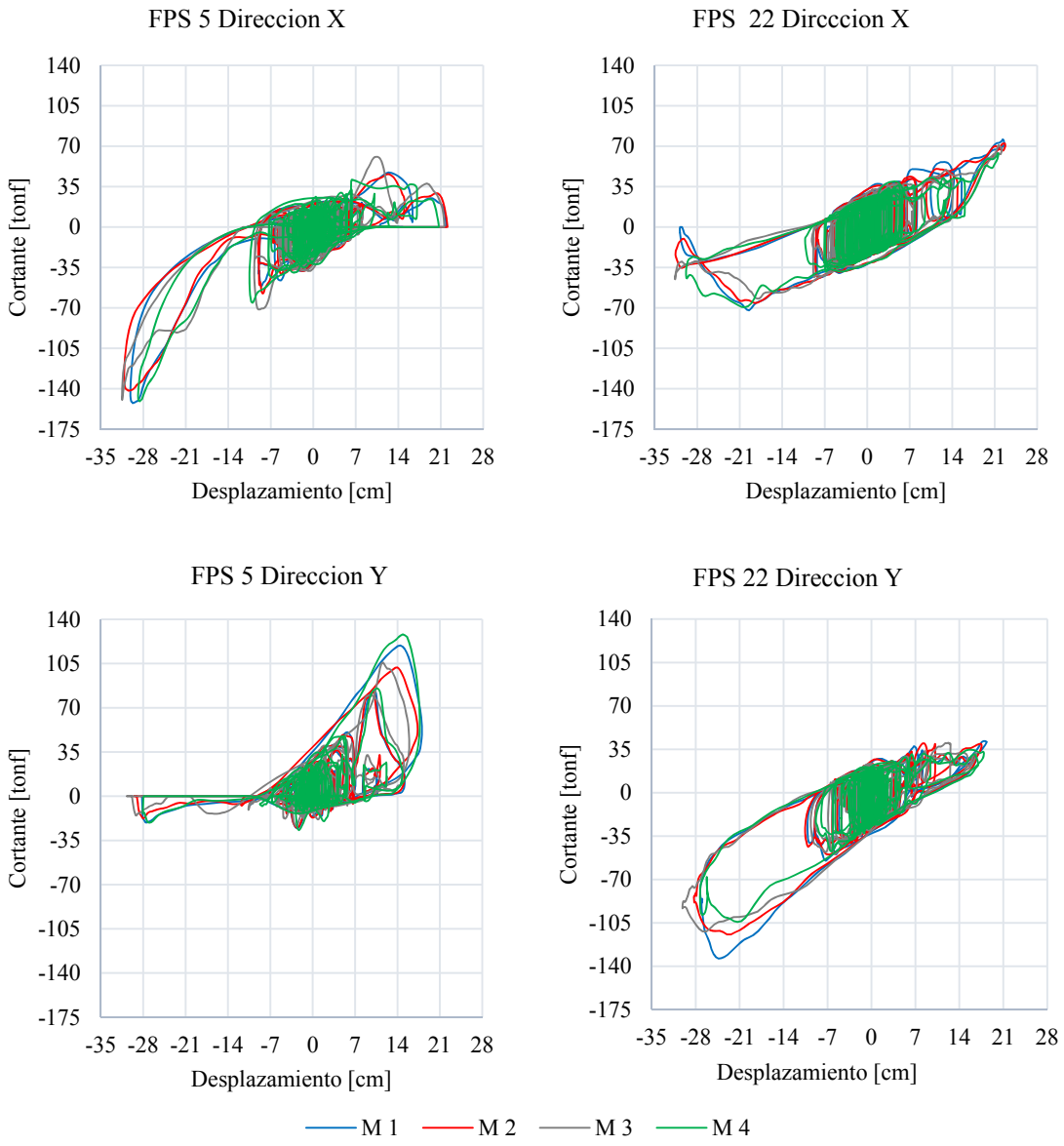


Figura IV- 42: Curvas Fuerza - Deformación de los Aisladores 5 y 22 FPS para los 4 modelos, análisis FNA.

IV.7.6.3 Drift y Desplazamiento en la Superestructura.

La figura IV- 43 detalla los Drift y Desplazamientos de la superestructura para los cuatro modelos aislados con FPS, análisis FNA. De la figura podemos observar que el modelo 3 es el que presenta menores valores de Dritf y Desplazamientos y el modelo 4 es el que detalla mayores valores de drift y desplazamientos.

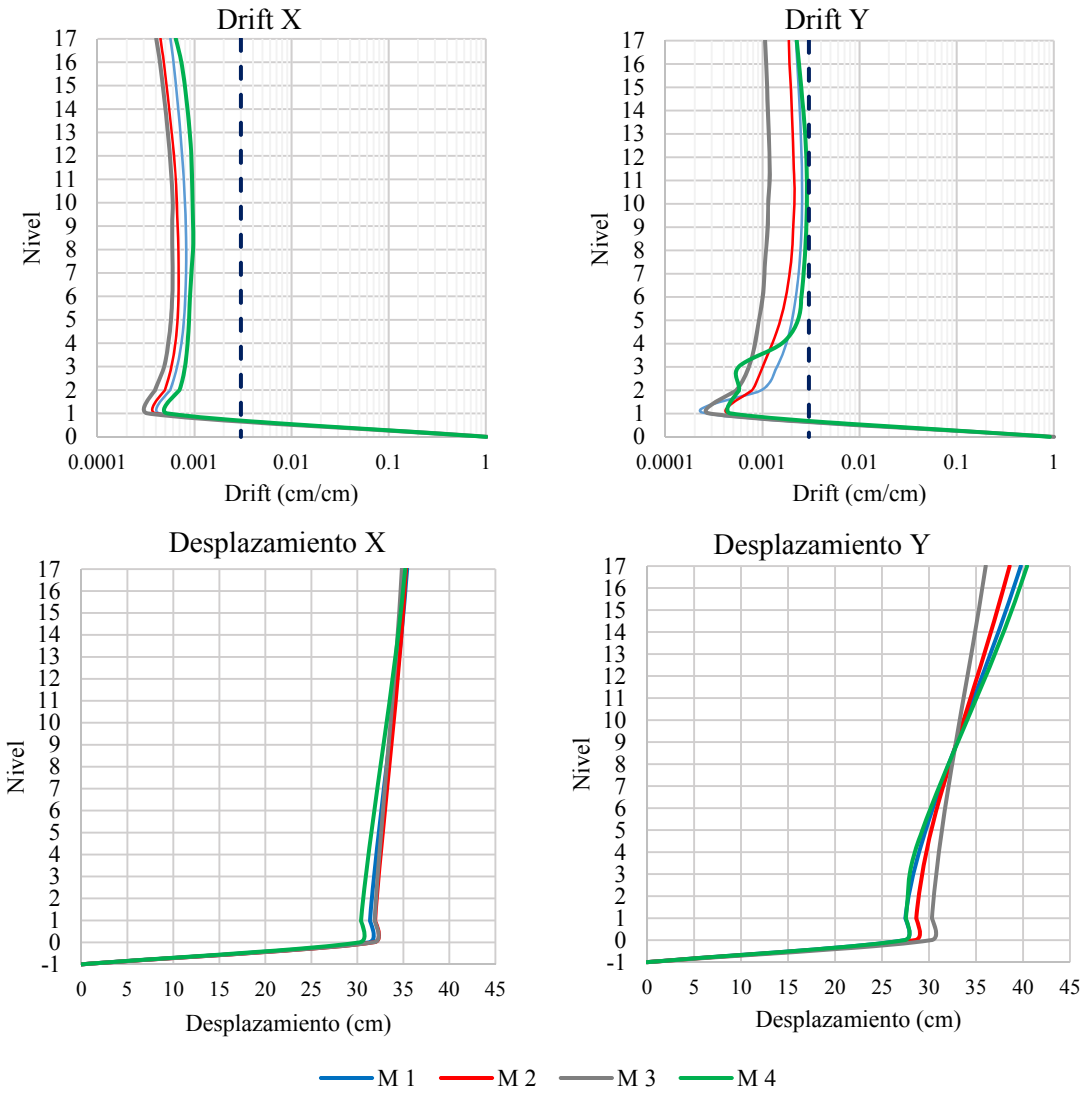


Figura IV- 43: Drift y Desplazamientos en la superestructura para los 4 modelos aislados con FPS, análisis FNA.

IV.7.6.4 Tiempo Historia desplazamiento y cortante en la base.

La figura IV- 44 detalla el tiempo historia del desplazamiento y cortantes en la base para las direcciones X y Y, para los cuatro modelos de base aislada con FPS, análisis FNA. En la figura se observa que las respuesta en el tiempo de los desplazamientos y cortantes no presenta variaciones marcada entre los cuatro modelos.

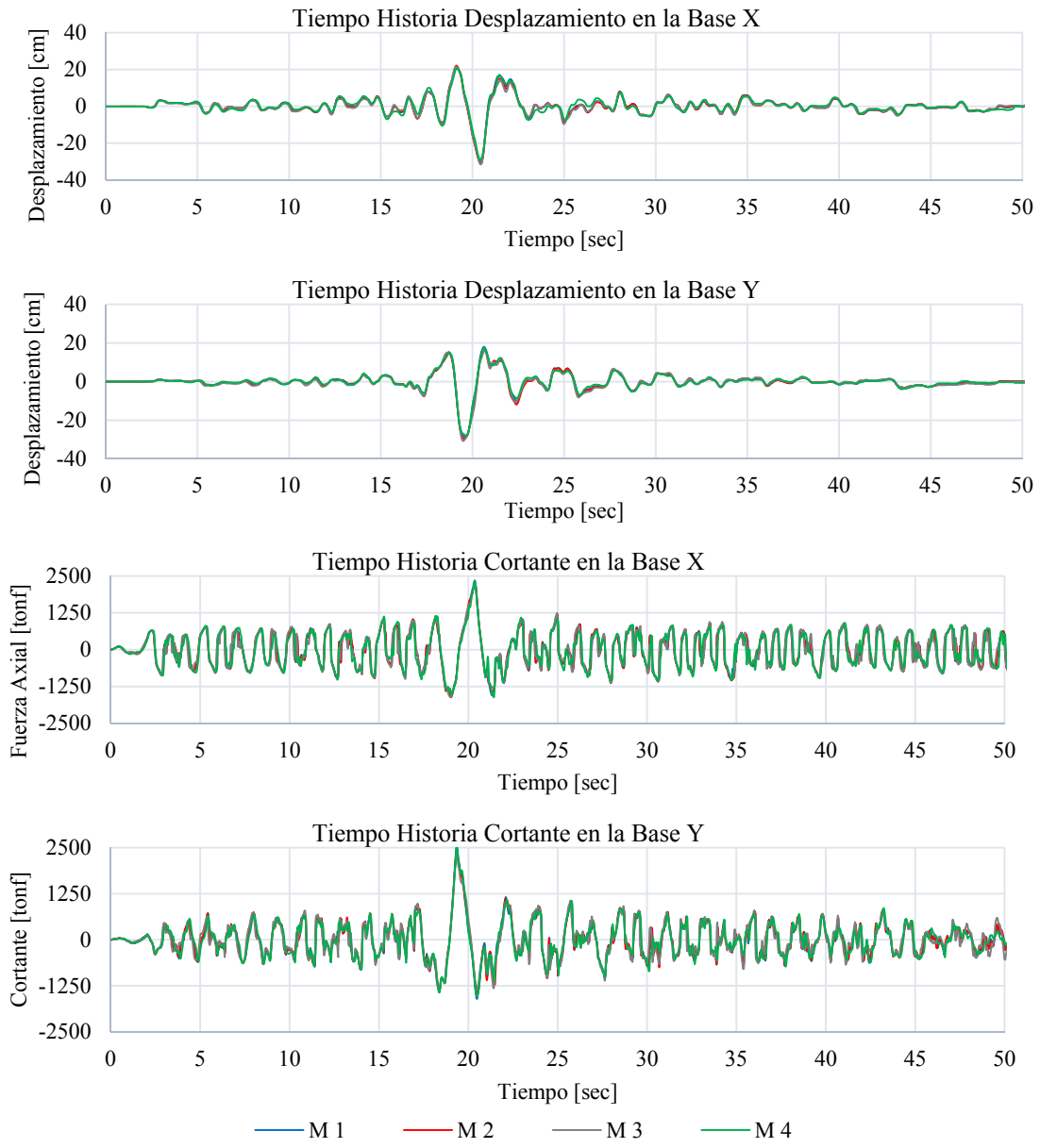


Figura IV- 44: Tiempo Historia del desplazamiento y cortante en la base dirección X y Y, para los 4 modelos aislados con FPS, análisis FNA.

IV.7.6.5 Comparación de las respuestas máximas.

La figura IV- 45 detalla las respuestas máximas del cortante basal, cortante máximo en el aislador, suma de la fuerza axial sobre los aisladores, momento en la base, desplazamiento en la base y el desplazamiento en el techo, para los cuatro modelos aislados con FPS, análisis FNA. De la figura podemos observar que las respuestas de los modelos 1 y 4 son similares, además se observa que el modelo 3 es el que presenta menores valores de respuesta.

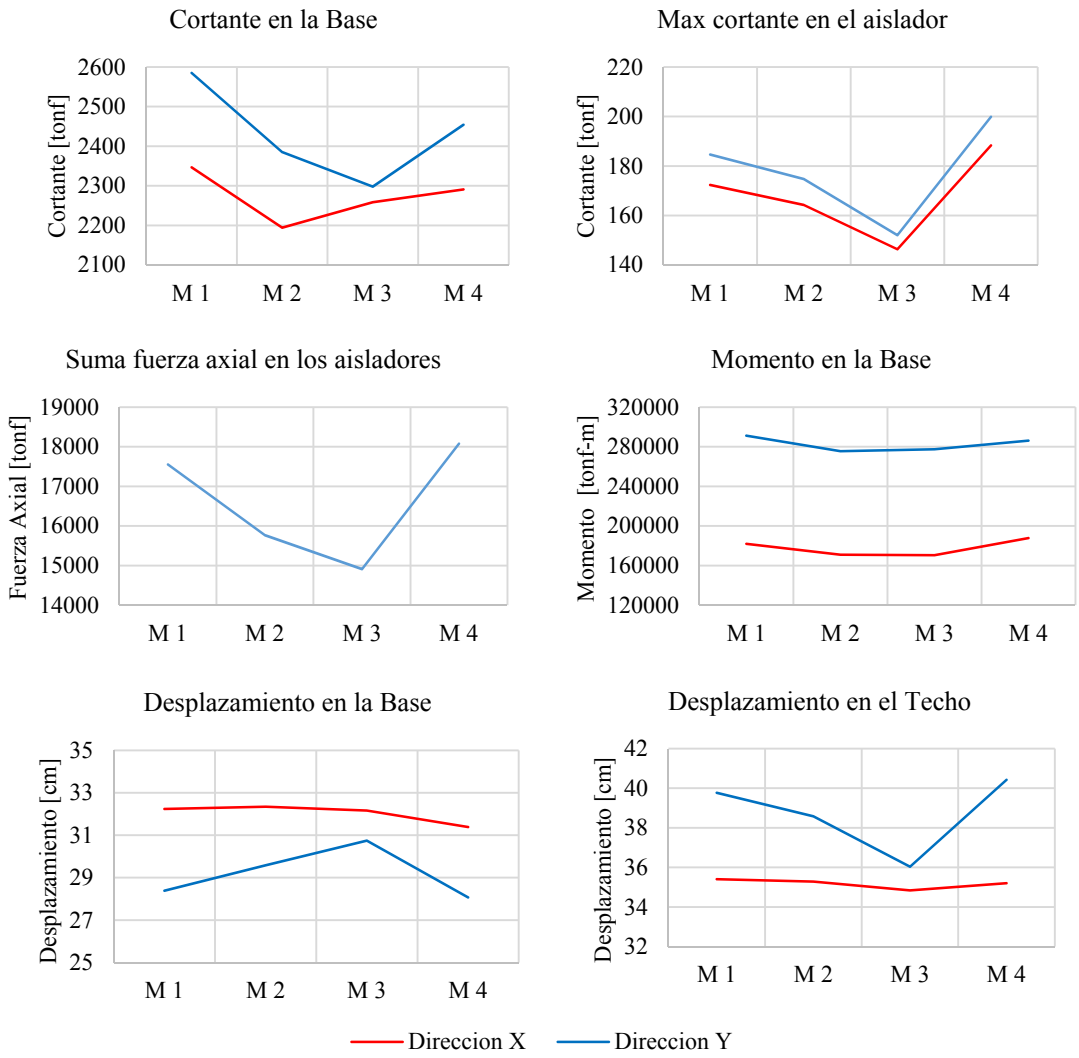


Figura IV- 45: Comparación de la respuesta máxima en los cuatro modelos con aisladores FPS, análisis FNA.

IV.7.6.6 Distribución de cortantes por piso.

La figura IV- 46 detalla las distribución de cortante por piso para los cuatros modelos aislados con FPS, análisis FNA. La figura detalla que el modelo 3 presenta menores valores de cortante, los modelos 1 y 2 detallan respuesta de cortante similares y el modelo 4 en la dirección Y es que detalla mayores cortantes.

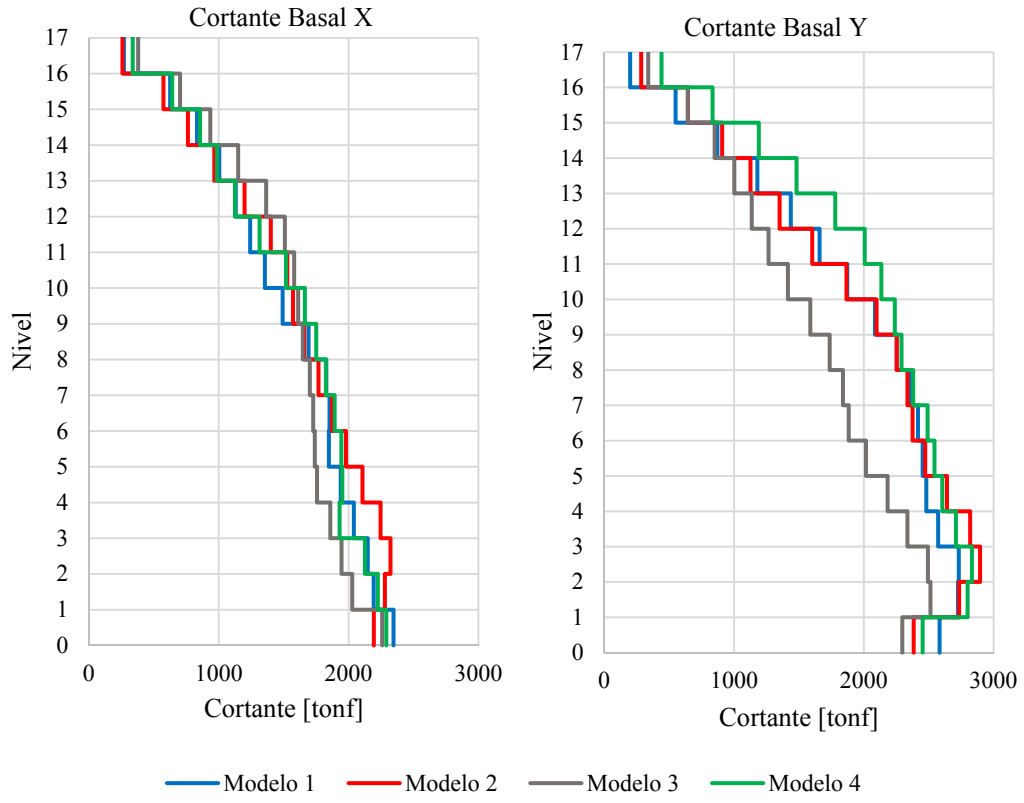


Figura IV- 46: Cortante por piso para los 4 modelos FPS, método de análisis FNA.

La figura IV- 47 detalla la distribución de cortante por piso para el modelo 2 con aisladores FPS análisis FNA, comparando la respuesta del cortante total con respecto a la suma de cortantes por muro en cada dirección. La figura detalla que la suma de cortante por muro es mayor el resultado del cortante total para ambas direcciones.

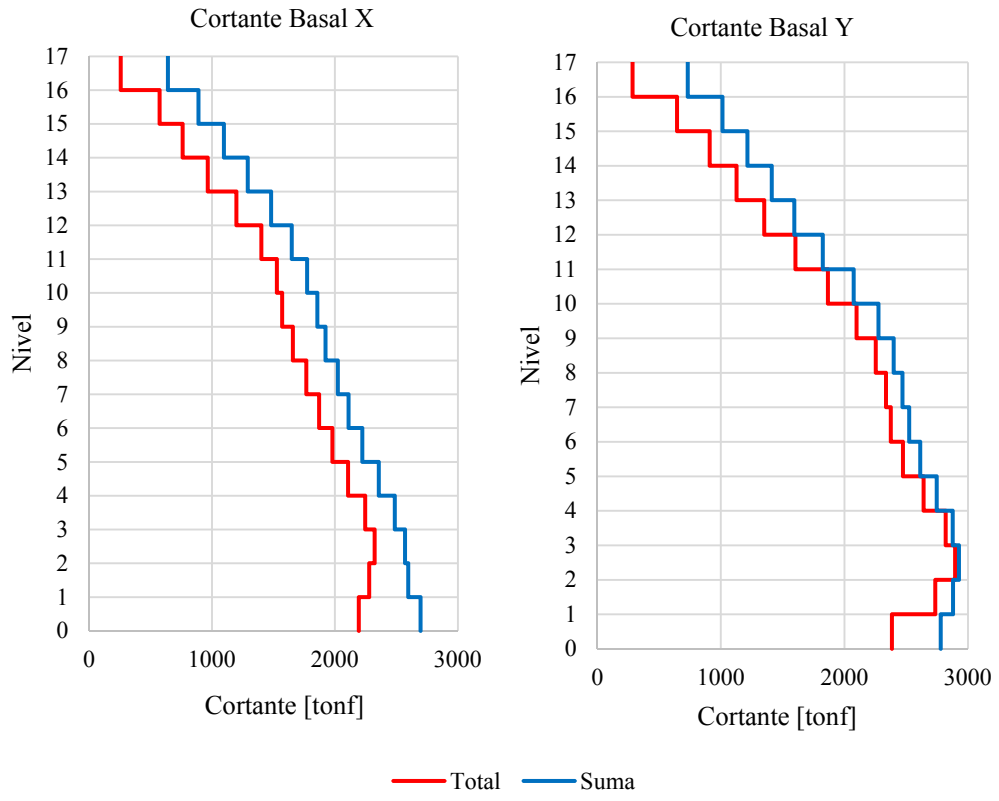


Figura IV- 47: Distribución de cortantes por piso para el modelo 2 con aisladores FPS, comparación del cortante total con respecto a la suma de cortante por muro, análisis FNA.

IV.8 Análisis del Sistema de base aislada con LRB.

Al igual que el sistema aislado con FPS, existe incertidumbre en la respuesta del sistema aislado con LRB asociada a los criterios en la creación del modelo matemático y el método de análisis no lineal, por lo que haremos una serie de análisis de sensibilidad que se detallan:

a. Análisis de sensibilidad en el método de análisis FNA para diferentes números vectores Ritz, 25, 75, 150, 300 y 600 vectores.

b. Análisis de sensibilidad al modelo matemático para diferentes factores de amortiguamiento inherente en la superestructura, factores: $\xi = 0\%$, $\xi = 2\%$, $\xi = 5\%$, para el análisis FNA.
c. Análisis de sensibilidad para diferentes métodos de análisis no lineales, FNA e Integración Directa.

Finalmente se hará una comparación de las respuestas de los cuatro sistemas aislados con LRB, análisis que serán ejecutados tomando en cuenta los resultados de los análisis de sensibilidad.

IV.8.1 Análisis de sensibilidad del método FNA para diferente número de modos, aislador LRB.

El análisis de sensibilidad del método de análisis FNA para diferentes modos será hecho al modelo matemático 2 con aislador LRB, el análisis se hará para: 25, 75, 150, 300 y 600 modos, se supondrá en el modelo diafragma flexible y amortiguamiento inherente en la superestructura de cero, las respuestas se detallan a continuación:

IV.8.1.1 Factores de participación modal.

La Tabla IV-6 detalla los porcentajes factores de participación modal en las direcciones X, Y y Z, así como porcentaje participantes de la carga gravitacional, para el sistema con LRB, análisis FNA para diferentes números de modos. La tabla detalla que los factores de participación modal son mayores del 99% para cualquier número de modos, sin embargo este es casi un 100% para los modos superiores, con respecto a la carga gravitacional esta alcanza el 100% solo con modos superiores.

Tabla IV-6: Factores de participación modal y % de la carga gravitacional participante, análisis FNA para diferente número de modos, aislador LRB

Modos	% Participacion Modal			% Carga Gravitacional		
	Γx	Γy	Γz	Dead	Live	SD
25	99.9999	100.0000	99.3874	98.7520	88.0769	88.0769
75	100.0000	100.0000	99.8137	99.7629	98.7493	98.7493
150	100.0000	100.0000	99.9575	99.9517	99.9768	99.9768
300	100.0000	100.0000	99.9889	99.9853	99.9999	99.9999
600	100.0000	100.0000	99.9901	99.9869	100.0000	100.0000

IV.8.1.2 Fuerza Axial en los aisladores LRB.

La figura IV- 48 detalla los valores máximos y mínimos de la fuerza axial en los aisladores LRB, análisis FNA para diferente número de modos. De la figura se puede observar que no hay diferencia en las respuestas para los sistemas con diferentes números de modos, la fuerza axial máxima a compresión es de 1000 tonf y la fuerza axial máxima a tensión de 550 tonf.

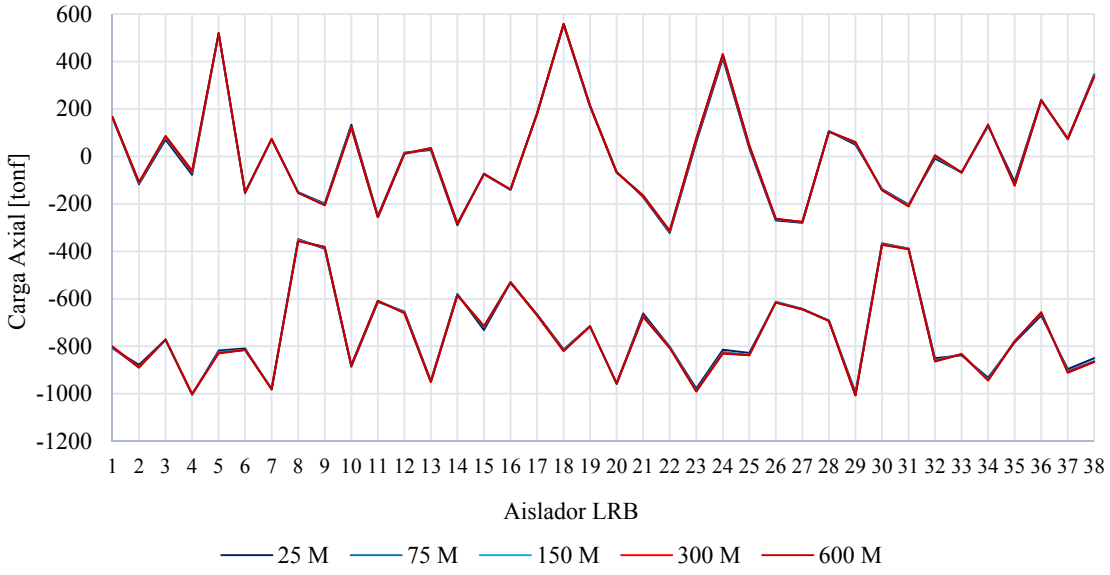


Figura IV- 48: Fuerza axial máxima y mínima en los aisladores LRB, para un análisis FNA con diferente número de modos.

IV.8.1.3 Curva Fuerza – Deformación para los aisladores 5 y 22 LRB.

La figura IV- 49 detalla las curvas fuerza – deformación de los aisladores 5 y 22 LRB, análisis FNA para diferentes números de modos. Se puede observar de la figura que no hay diferencia en las respuestas para los diferentes sistemas. Se detalla un cortante máxima de 48 tonf y desplazamiento máximo de 31 cm. Se observa además que los diagramas histeréticos en cada dirección son iguales para los aisladores 5 y 22.

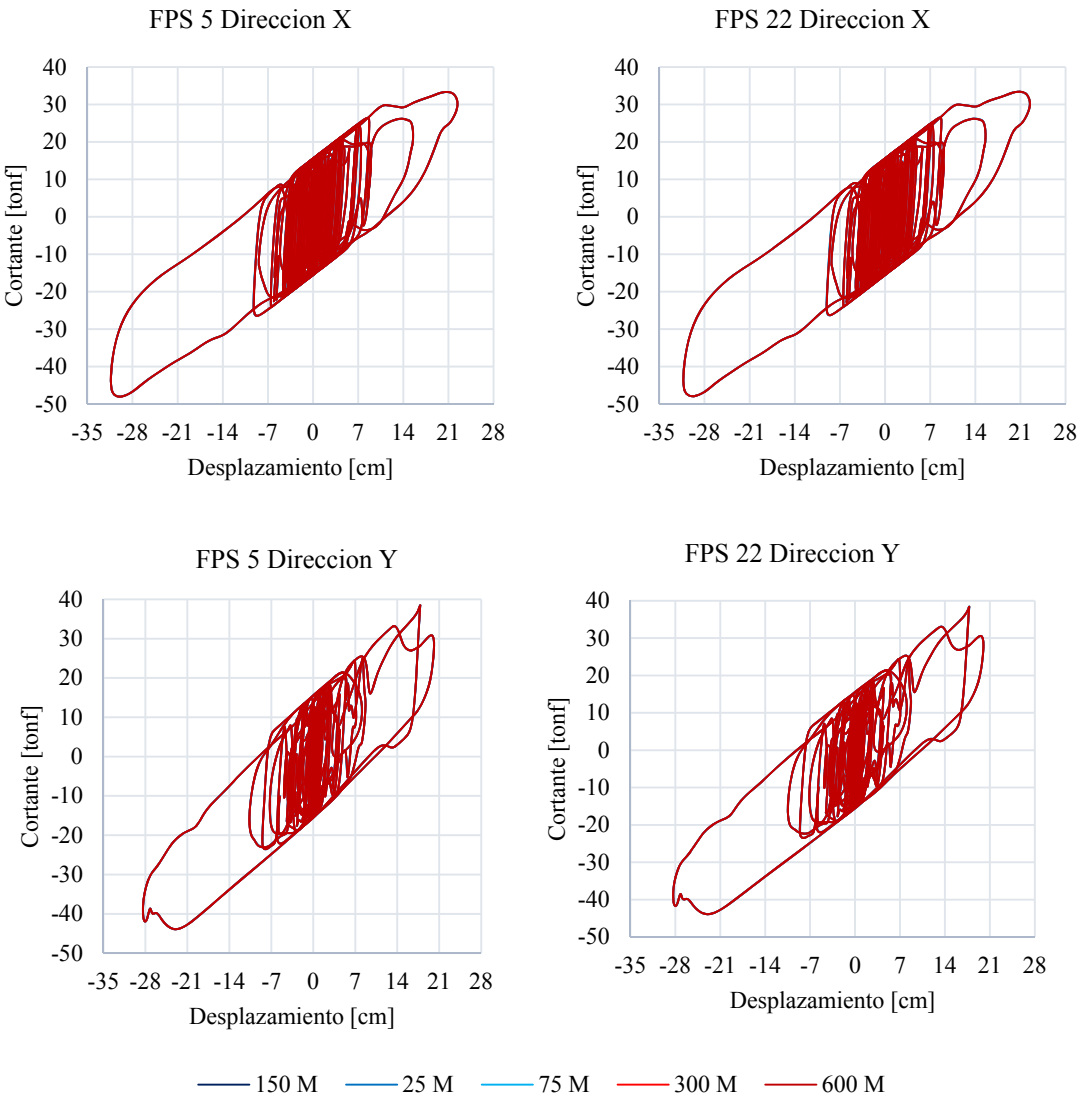


Figura IV- 49: Curvas Fuerza - Deformación de los Aisladores 5 y 22 LRB, análisis FNA para diferente número de modos.

IV.8.1.4 Drift y Desplazamiento en la Superestructura.

La figura IV- 50 detalla las Drift y Desplazamiento de la superestructura para el sistema aislado LRB, análisis FNA con diferente número de modos. La figura detalla un mismo Drift y Desplazamientos para los diferentes sistemas, el desplazamiento máximo del techo en la dirección X es 34 cm y en la dirección Y de 33 cm.

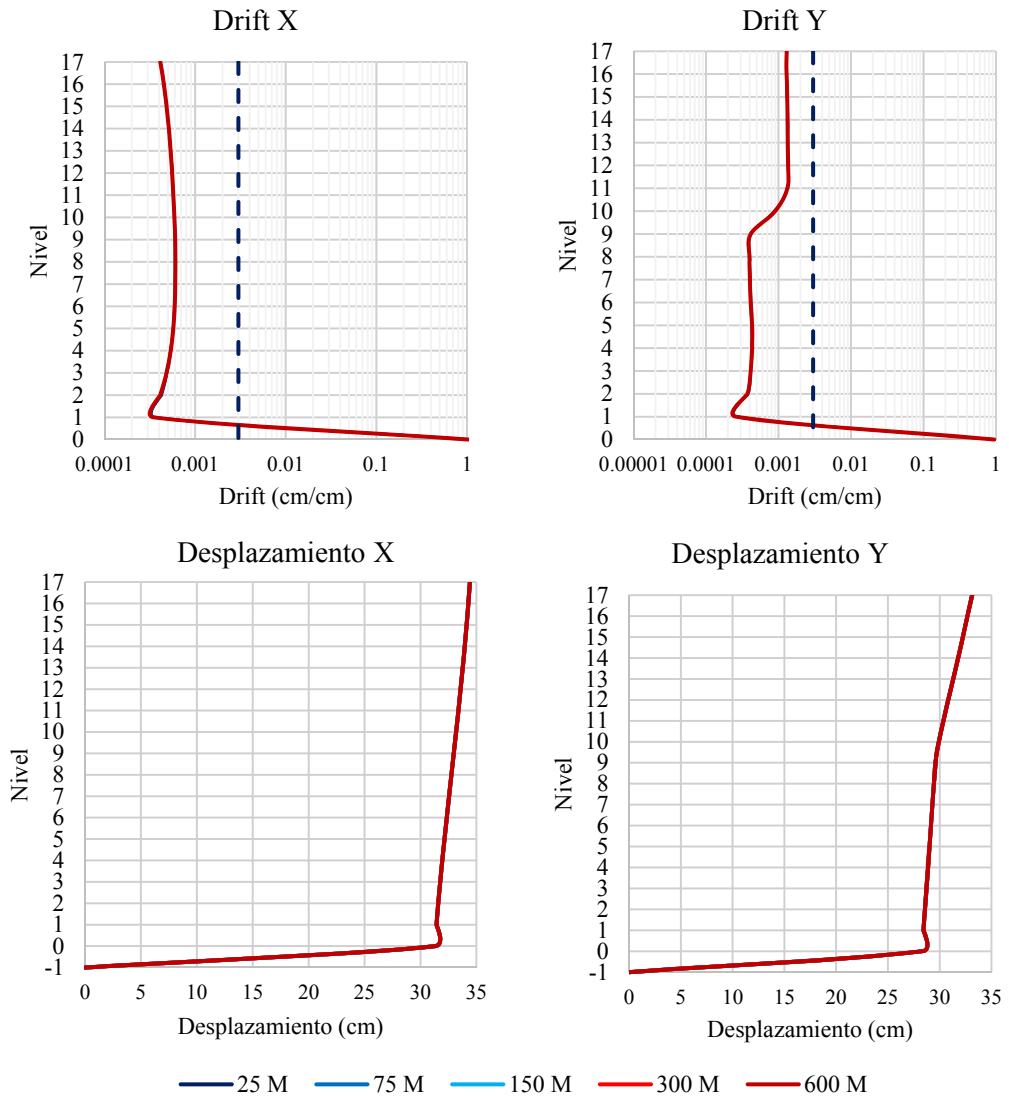


Figura IV- 50: Drirt y Desplazamiento en la superestructura, Análisis FNA para diferentes número de modos, aislador LRB.

IV.8.1.5 Tiempo Historia desplazamiento y cortante en la base.

La figura IV- 51 detalla el tiempo historia del desplazamiento y cortantes en la base para las direcciones X y Y, para aisladores LRB, análisis FNA con diferentes modos. En la figura se puede observar la historia de los desplazamientos y los cortantes en la base son iguales para los sistemas.

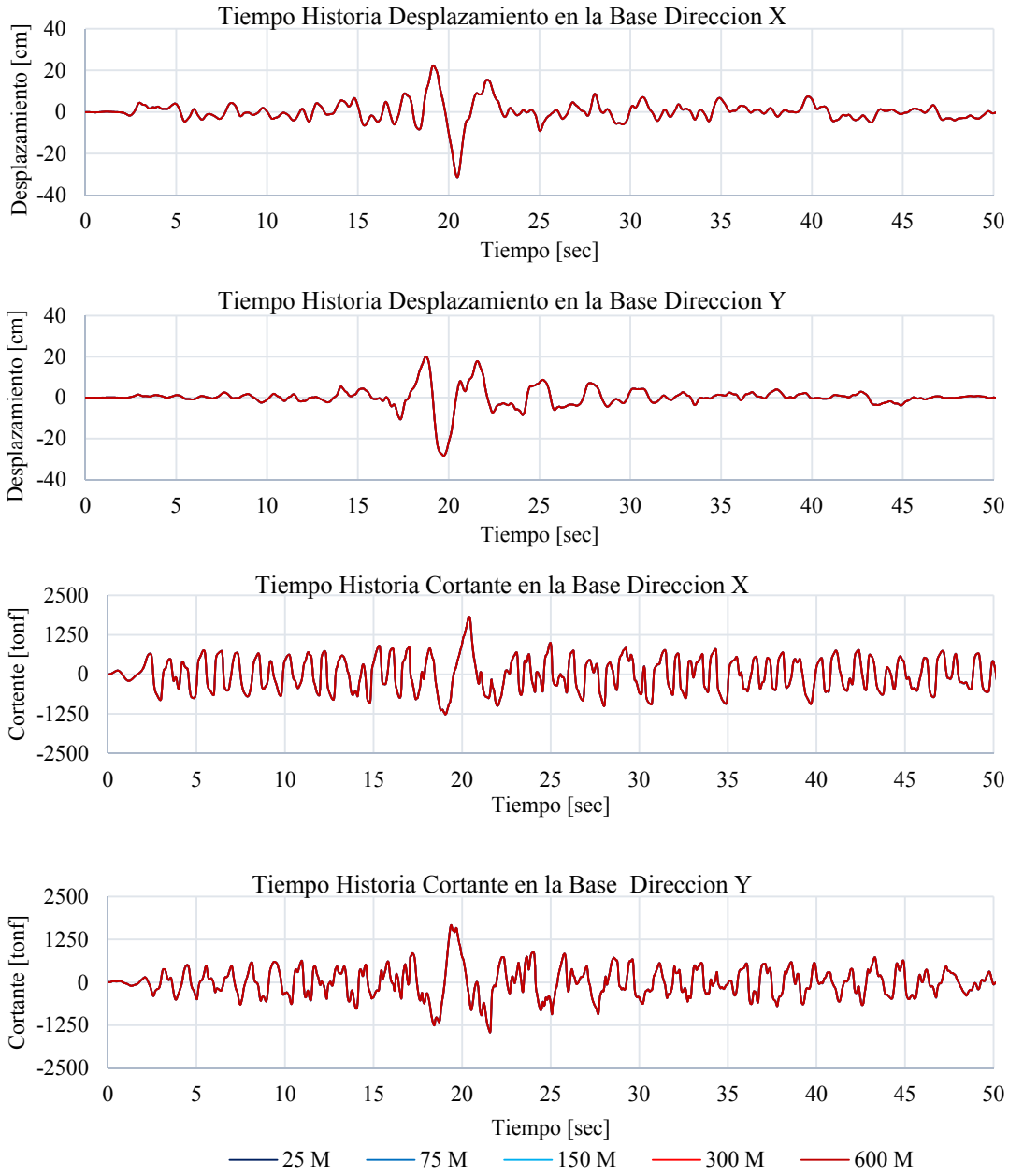


Figura IV- 51: Tiempo Historia del desplazamiento y cortante en la base en la dirección X y Y, Análisis FNA para diferentes número de modos, aislador LRB.

IV.8.1.6 Comparación de las respuestas máximas.

La figura IV- 52 detalla las respuestas máximas del cortante basal, cortante máximo en el aislador, suma de la fuerza axial sobre los aisladores, momento en la base, desplazamiento en la base y el desplazamiento en el techo, para un análisis FNA con diferentes número de modos, sistema aislado con LRB. La figura describe los resultados vistos en las figuras anteriores, no existe diferencia en las respuesta para diferentes números de modos, se puede concluir que las respuestas del sistema con LRB es insensible al número de modos en el análisis FNA.

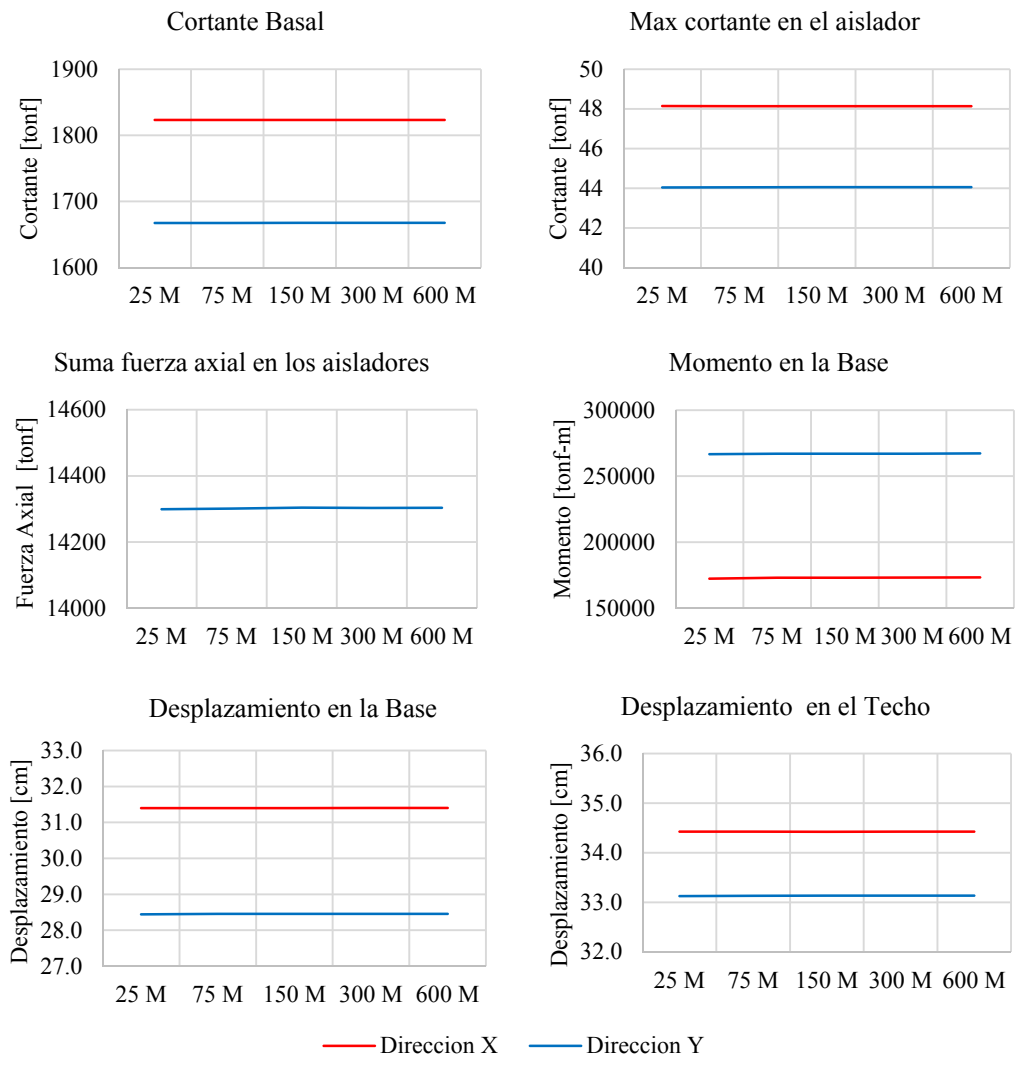


Figura IV- 52: Comparación de la respuesta máxima en el sistema con LRB, análisis FNA para diferente número de modos.

IV.8.2 Análisis de sensibilidad en el modelo matemático para diferente factor de amortiguamiento en la superestructura, aislador LRB.

El análisis de sensibilidad en el modelo matemático para diferentes factores de amortiguamiento inherente en la superestructura será hecho al modelo 2 con aislador LRB, el análisis se hará para los siguientes factores de amortiguamiento $\xi = 0\%$, $\xi = 2\%$, $\xi = 5\%$. Se supondrá diafragma flexible en los entrepisos y el método de análisis será FNA con 300 de vectores Ritz, las respuestas del análisis se detallan a continuación:

IV.8.2.1 Fuerza Axial en los aisladores LRB.

La figura IV- 53 detalla los valores máximos y mínimos de la fuerza axial en los aisladores LRB, análisis FNA con diferente factor de amortiguamiento en la superestructura. Se observa de la figura que el sistema con menor amortiguamiento presenta fuerza levemente mayores con una fuerza a compresión de 1070 tonf y una fuerza a tensión máxima de 610 tonf.

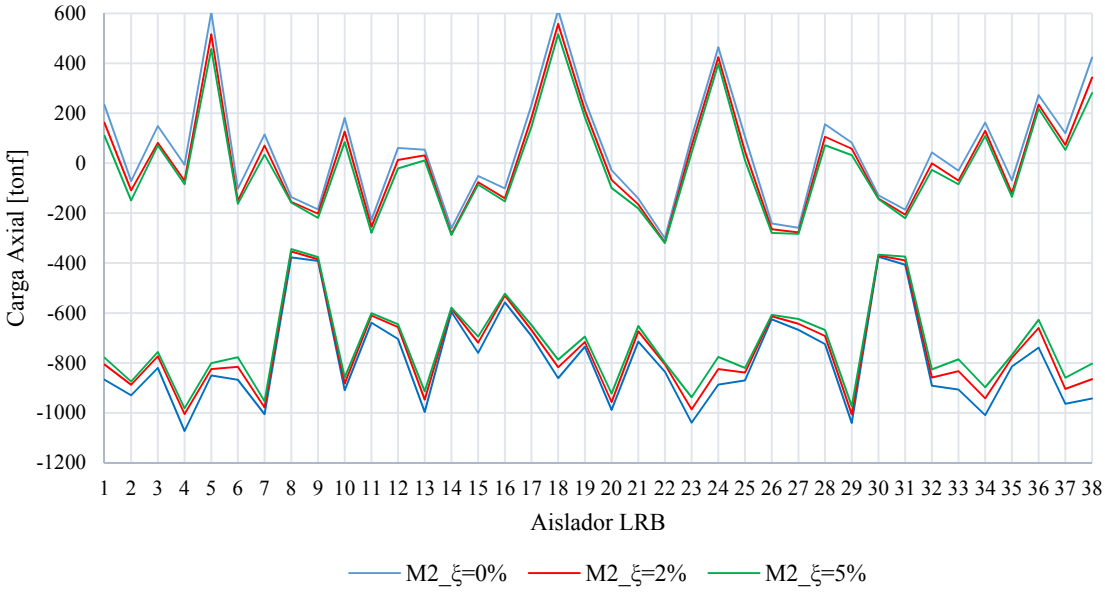


Figura IV- 53: Fuerza axial máxima y mínima en los aisladores LRB, análisis FNA para distintos factores de amortiguamiento en la superestructura.

IV.8.2.2 Curva Fuerza – Deformación para los aisladores 5 y 22 LRB.

La figura IV- 54 detalla las curvas fuerza – deformación de los aisladores 5 y 22 LRB análisis FNA para distintos factores de amortiguamiento en la superestructura. De la figura se observa que los cortantes y desplazamientos en los aisladores son muy similares para los distintos factores de amortiguamiento, con un cortante máximo de 48 tonf y un desplazamiento máximo de 32 cm.

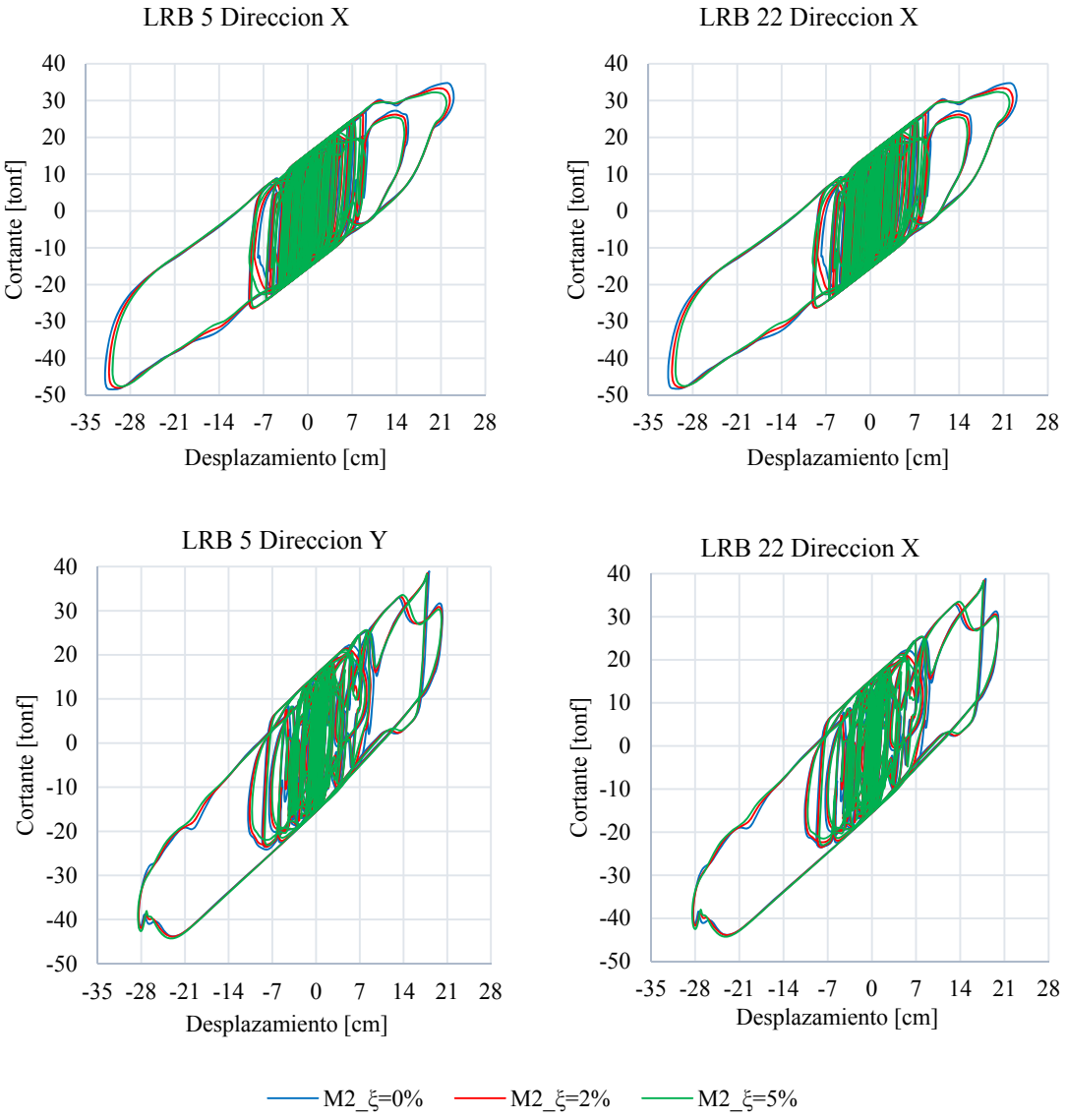


Figura IV- 54: Curvas Fuerza - Deformación de los Aisladores 5 y 22 LRB, análisis FNA para distintos factores de amortiguamiento en la superestructura.

IV.8.2.3 Drift y Desplazamiento en la Superestructura.

La figura IV- 55 detalla los Drift y Desplazamientos de la superestructura para el sistema aislado LRB, análisis FNA para distintos factores de amortiguamiento en la superestructura. De la figura se puede observar que los Drift máximos para los tres modelos es el mismo, el desplazamiento en X existe una ligera diferencia donde el sistema con menor amortiguamiento detalla menor desplazamiento, el desplazamiento máximo en el techo en la dirección X es 35 cm y 34 cm en la dirección Y.

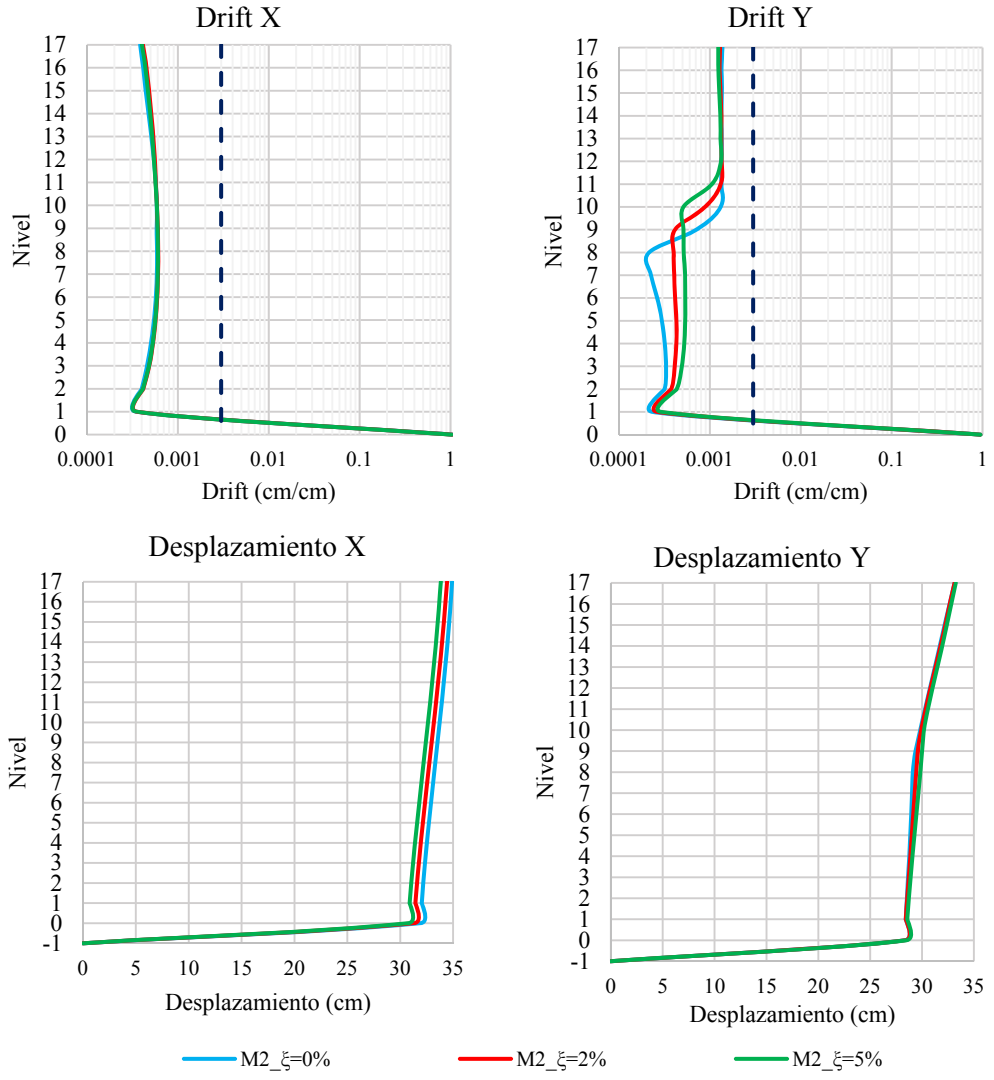


Figura IV- 55: Drift y Desplazamiento en la superestructura, análisis FNA para distintos factores de amortiguamiento en la superestructura, aislador LRB.

IV.8.2.4 Tiempo Historia desplazamiento y cortante en la base.

La figura IV- 56 detalla el tiempo historia del desplazamiento y cortantes en la base para las direcciones X y Y, sistema con aisladores LRB, análisis FNA para distintos factores de amortiguamiento en la superestructura. De la figura se observa que las respuesta en el tiempo desplazamientos y cortantes en la base son muy similares para todos los sistemas

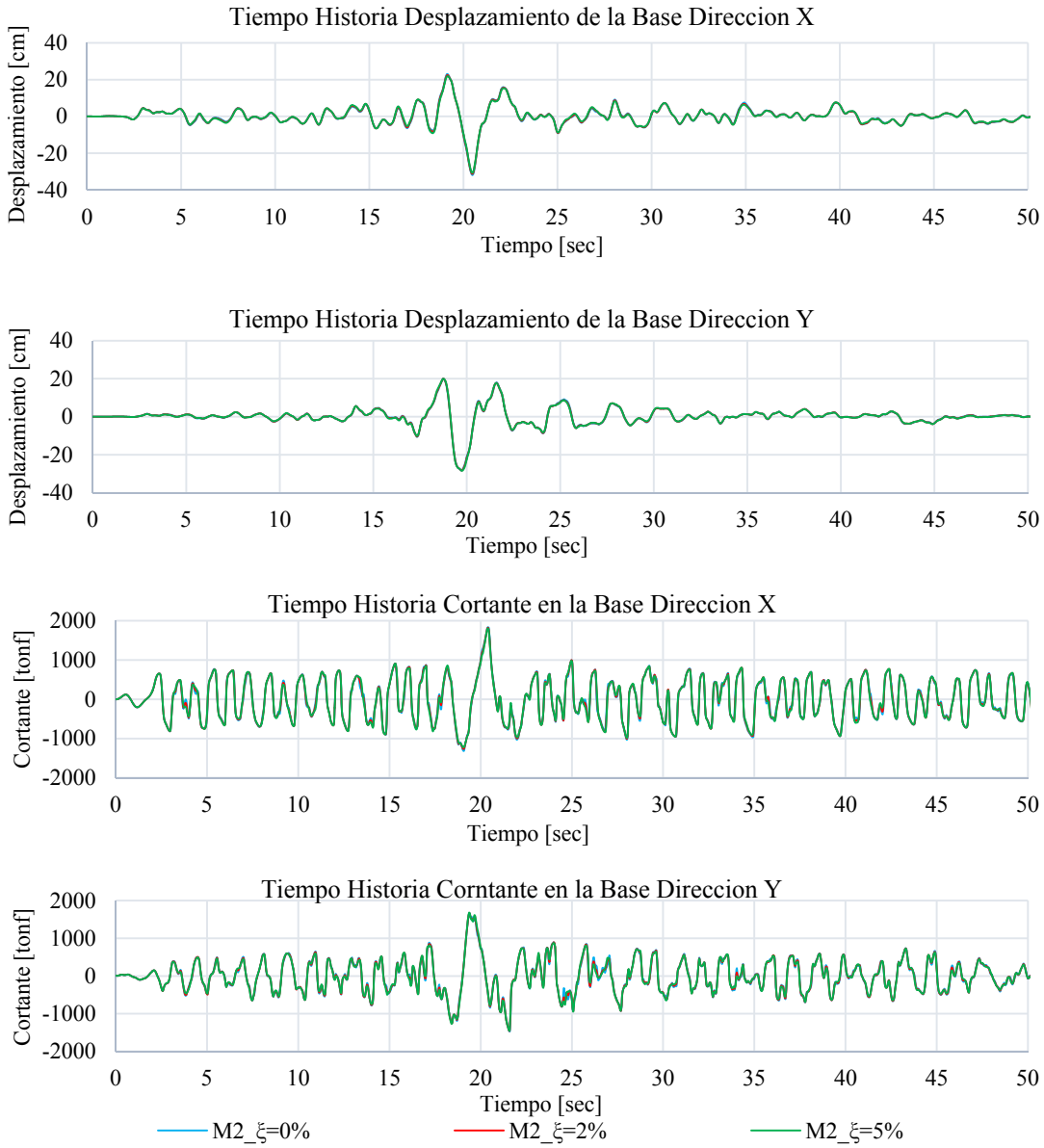


Figura IV- 56: Tiempo Historia del desplazamiento y cortante en la base dirección X y Y, Análisis FNA para distintos factores de amortiguamiento en la superestructura, aislador LRB.

IV.8.2.5 Comparación de las respuestas máximas.

La figura IV-57 detalla las respuestas máximas del cortante basal, cortante máximo en el aislador, suma de la fuerza axial sobre los aisladores, momento en la base, desplazamiento en la base y el desplazamiento en el techo, análisis FNA para distintos factores de amortiguamiento en la superestructura, sistema aislado con FPS. Se puede observar de la figura que los valores de las fuerzas son muy similares para los distintos factores de amortiguamiento, la mayor diferencia de resultados se nota en los desplazamientos del techo, para mayor factor de amortiguamiento menor desplazamiento.

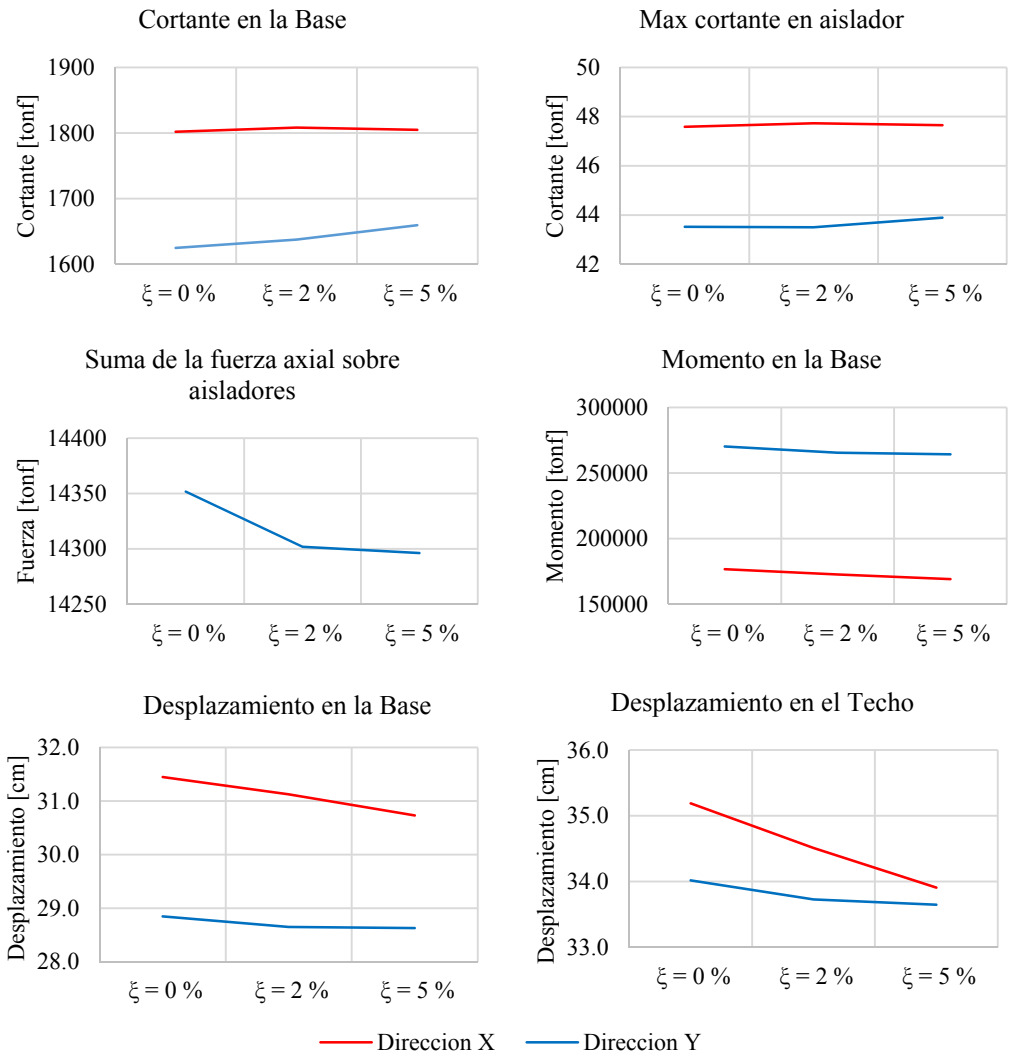


Figura IV- 57: Comparación de la respuesta máxima en el sistema con LRB, análisis FNA para distintos factores de amortiguamiento en la superestructura.

IV.8.3 Análisis de Sensibilidad para diferentes métodos de Análisis no lineal, para el sistema con aisladores LRB.

El análisis de sensibilidad para diferentes métodos de análisis será hecho al modelo 2 con aisladores LRB, se hará un análisis FNA considerando 300 vectores Ritz y un análisis por Integración directa método numérico de Newmark aceleración constante, con coeficientes $\gamma = \frac{1}{2}$; $\beta = \frac{1}{4}$ e iteración Newton Raphson. Se supondrá para ambos, métodos que el amortiguamiento inherente en la superestructura será cero y el diafragma de piso se considera flexible, no se hará la simplificación en el modelo matemático hecho para el sistema FPS. Las respuestas del análisis se detallan a continuación:

IV.8.3.1 Fuerza Axial en los aisladores LRB.

La figura IV- 58 detalla los valores máximos y mínimos de la fuerza axial en los aisladores LRB para los distintos métodos de análisis ID y FNA. De la gráfica podemos observar que no hay diferencia en las respuestas obtenidas por ambos métodos, la fuerza axial máxima a compresión es de 1070 tonf y la fuerza axial máxima a tensión de 610 tonf.

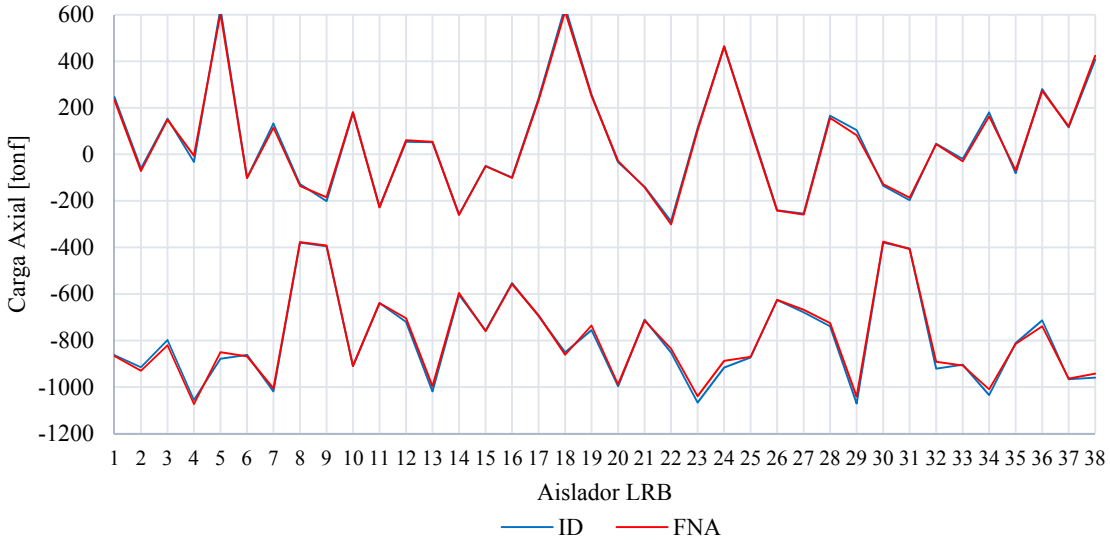


Figura IV-58: Fuerza axial máxima y mínima en los aisladores FPS, para diferente métodos de análisis ID y FNA.

IV.8.3.2 Curva Fuerza – Deformación para los aisladores 5 y 22 LRB.

La figura IV- 59 detalla las curvas fuerza – deformación de los aisladores 5 y 22 LRB, para distintos análisis ID y FNA. Se puede observar de la figura que no hay diferencia en las respuestas para ambos métodos. Se detalla un cortante máximo de 48 tonf y desplazamiento máximo de 32 cm.

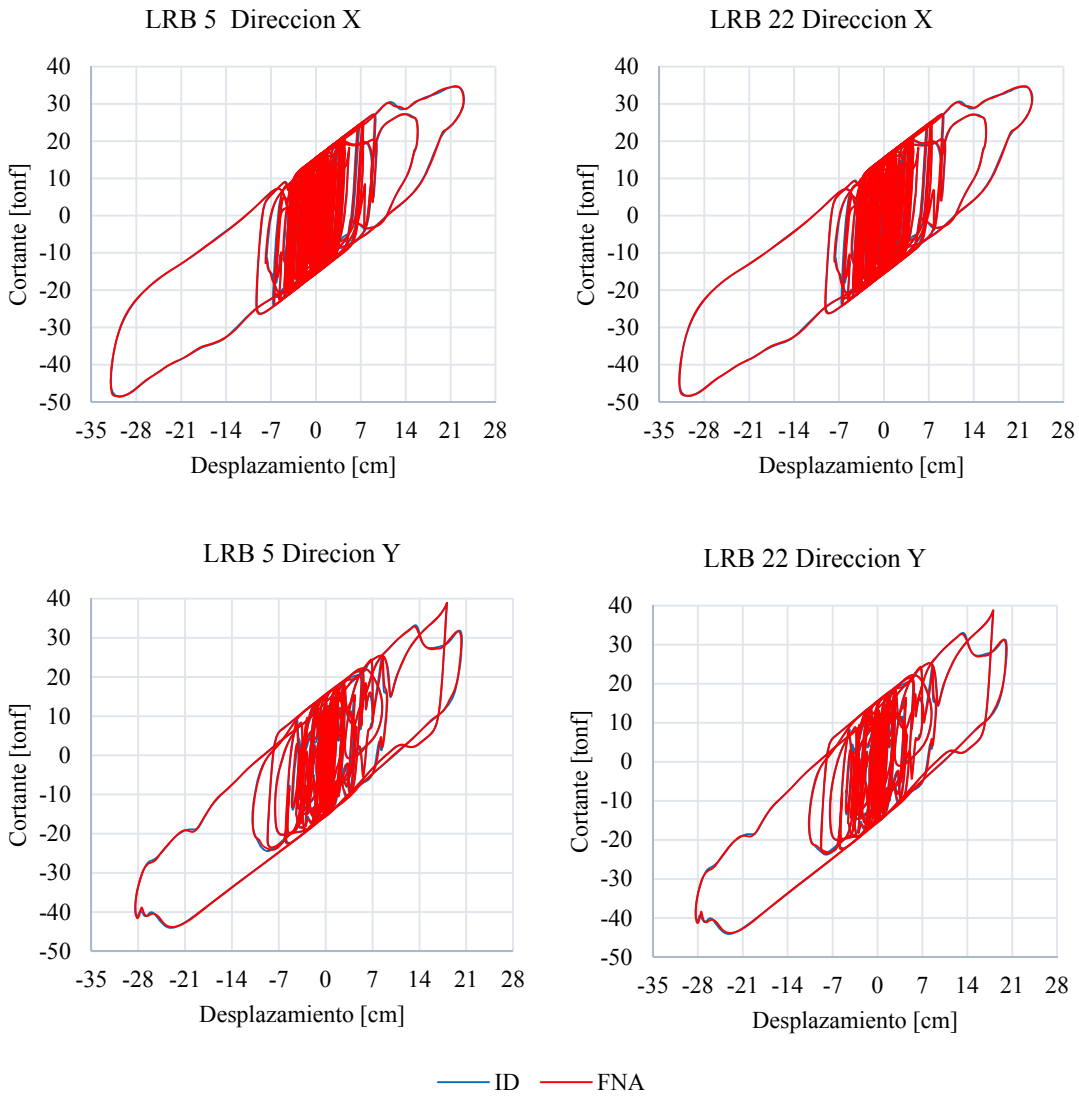


Figura IV- 59: Curvas Fuerza - Deformación de los Aisladores 5 y 22 LRB, para diferentes métodos de análisis ID y FNA.

IV.8.3.3 Drift y Desplazamiento en la Superestructura.

La figura IV- 60 detalla los Drift y Desplazamiento de la superestructura para aislador LRB para diferentes métodos de análisis ID y FNA. La figura detalla que no hay diferencia en los Drift y Desplazamientos para los diferentes métodos de análisis. El desplazamiento máximo en el techo en la dirección X es de 35 cm y en la dirección Y de 33 cm.

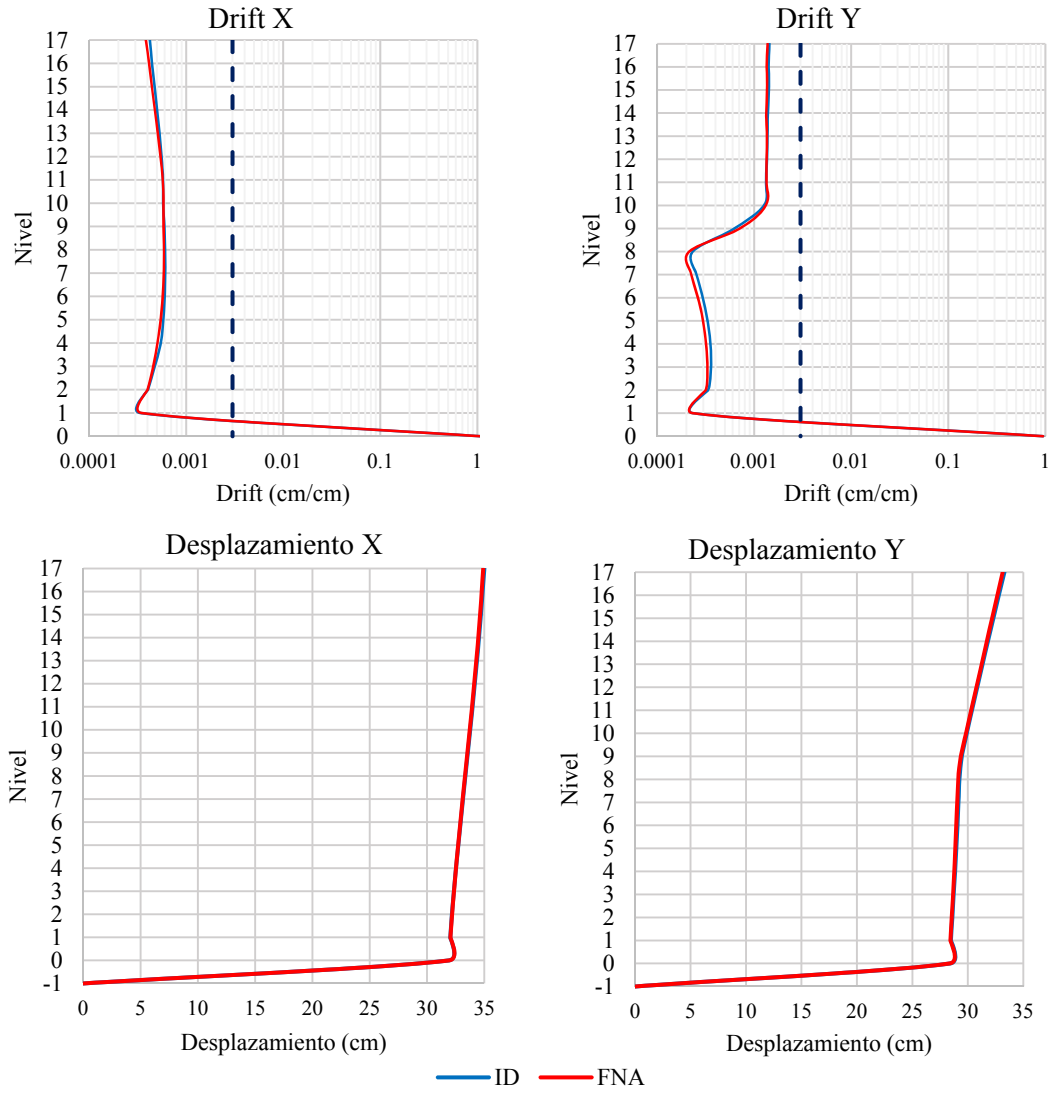


Figura IV- 60: Drift y Desplazamiento en la superestructura, para diferentes métodos de análisis ID y FNA, aisladores LRB.

IV.8.3.4 Tiempo Historia desplazamiento y cortante en la base.

La figura IV- 61 detalla el tiempo historia del desplazamiento y cortantes en la base para las direcciones X y Y, para aisladores LRB, para diferentes métodos de análisis ID y FNA. La figura detalla que no hay diferencia en las respuestas del tiempo historia de los desplazamientos y cortantes para los diferentes métodos de análisis.

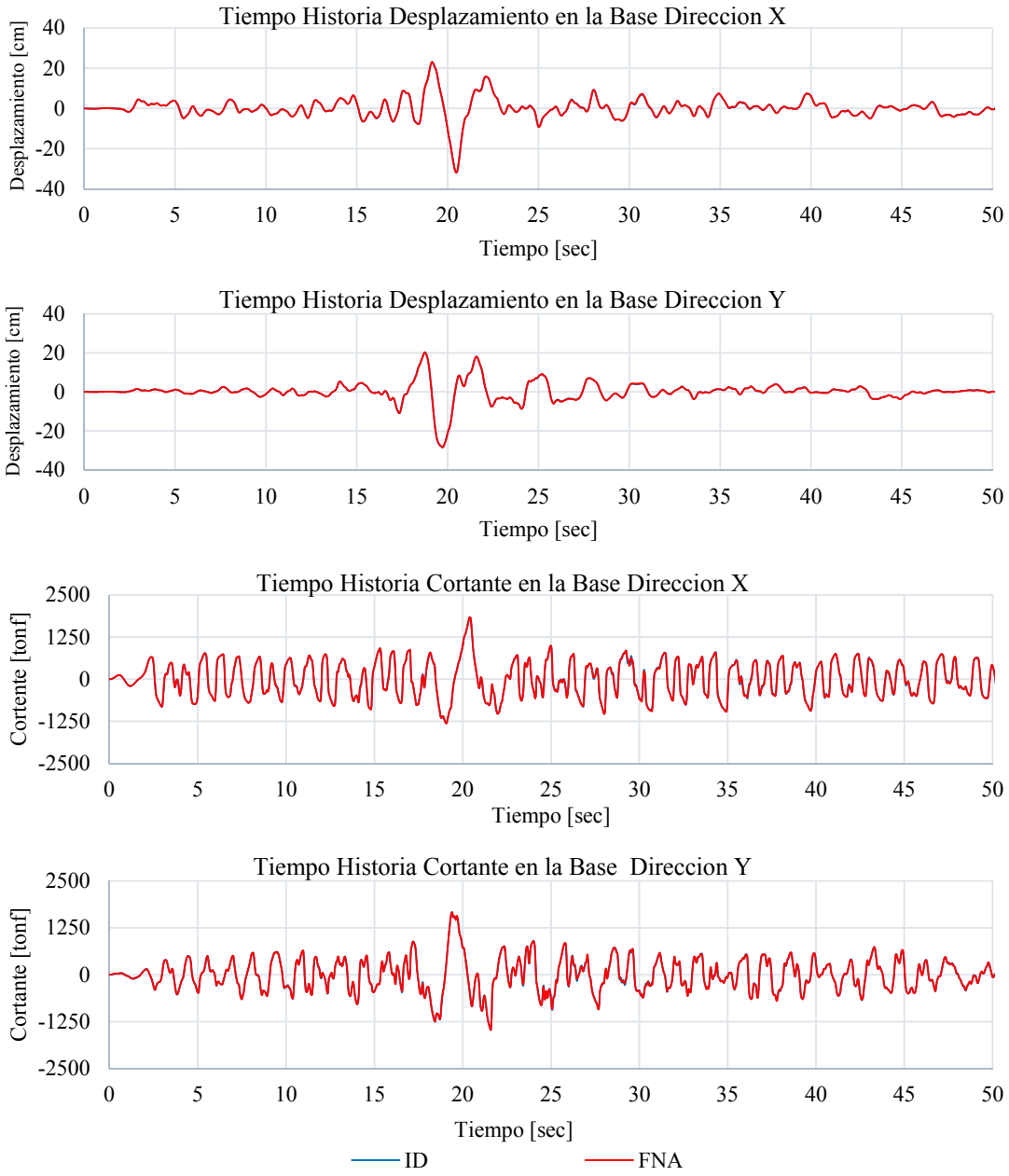


Figura IV- 62: Tiempo Historia del desplazamiento y cortante en la base dirección X y Y, para diferentes métodos de análisis ID y FNA, aisladores LRB.

IV.8.3.5 Comparación de las respuestas máximas.

La figura IV- 63 detalla las respuestas máximas del cortante basal, cortante máximo en el aislador, suma de la fuerza axial sobre los aisladores, momento en la base, desplazamiento en la base y el desplazamiento en el techo, para diferentes métodos de análisis ID y FNA. Se puede observar en la figura que la única diferencia en las respuestas es la fuerza axial total sobre los aisladores, la respuesta del metodo FNA presenta un mayor valor.

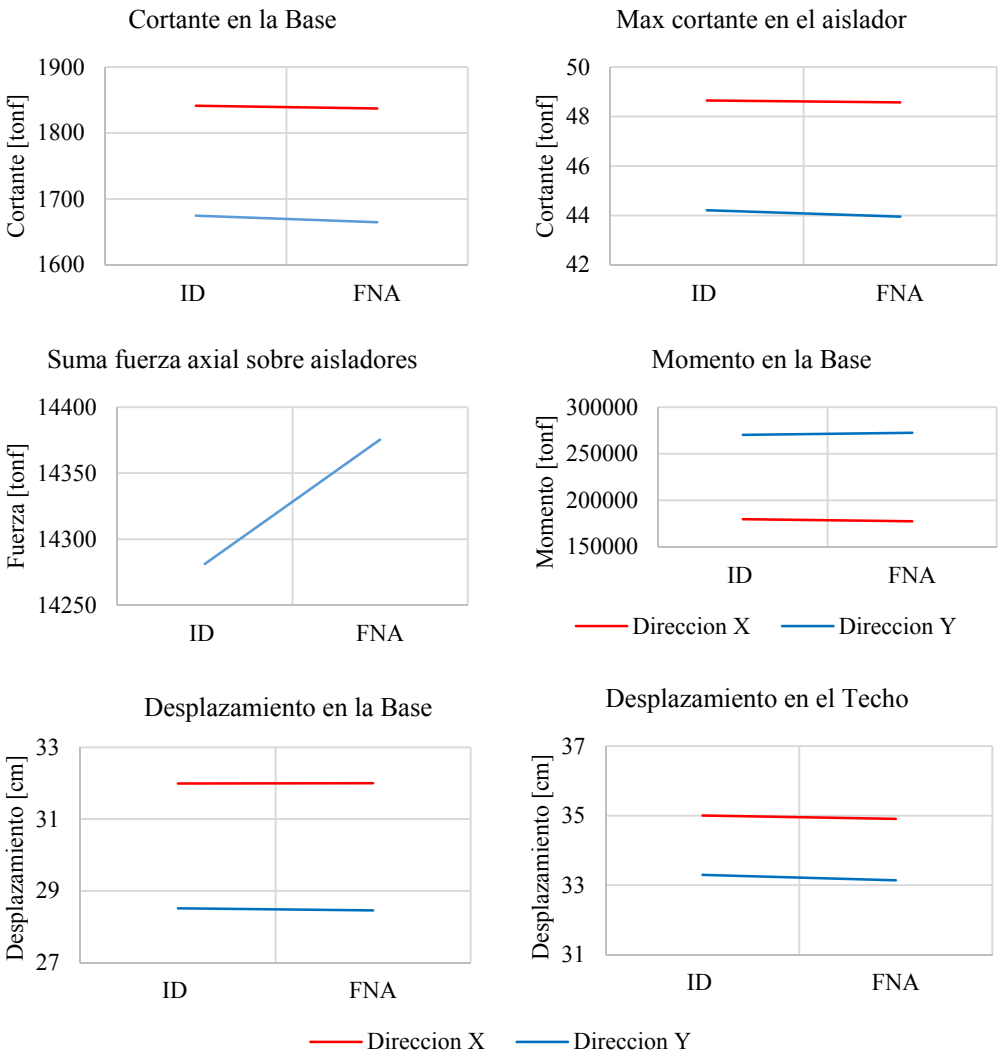


Figura IV- 63: Comparación de la respuesta máxima en el sistema con LRB, para diferentes métodos de análisis ID y FNA.

IV.8.4 Respuesta de los cuatro modelos aislados con LRB.

Los cuatro modelos de base aislada con LRB han sido analizados con el método FNA considerando 300 vectores Ritz. Los modelos matemáticos han sido elaborados basados en las suposiciones descritas en la sección IV.3 además se considera que el entrepiso sea modelado como diafragma flexible y el amortiguamiento inherente en la superestructura de cero, se definirá como M1 el modelo 1, M2 como modelo 2, M3 como el modelo 3 y M4 como el modelo 4. Las respuestas para los cuatro modelos se detallan a continuación.

IV.8.4.1 Fuerza Axial en los aisladores LRB.

La figura IV- 64 detalla los valores máximos y mínimos de la fuerza axial en los aisladores LRB para los 4 modelos y un análisis FNA. De la figura se puede observar que el modelo 4 es el que presenta mayores fuerzas axiales a compresión y a tensión, las fuerza a compresión son: modelo 1 con 1110 tonf, modelo 2 con 1070 tonf, modelo 3 con 1100 tonf y modelo 4 con1140 tonf y las fuerzas a tensión son: modelo 1 con 630 tonf, modelo con 610 tonf, modelo 3 con 540 y el modelo 4 con 610 tonf.

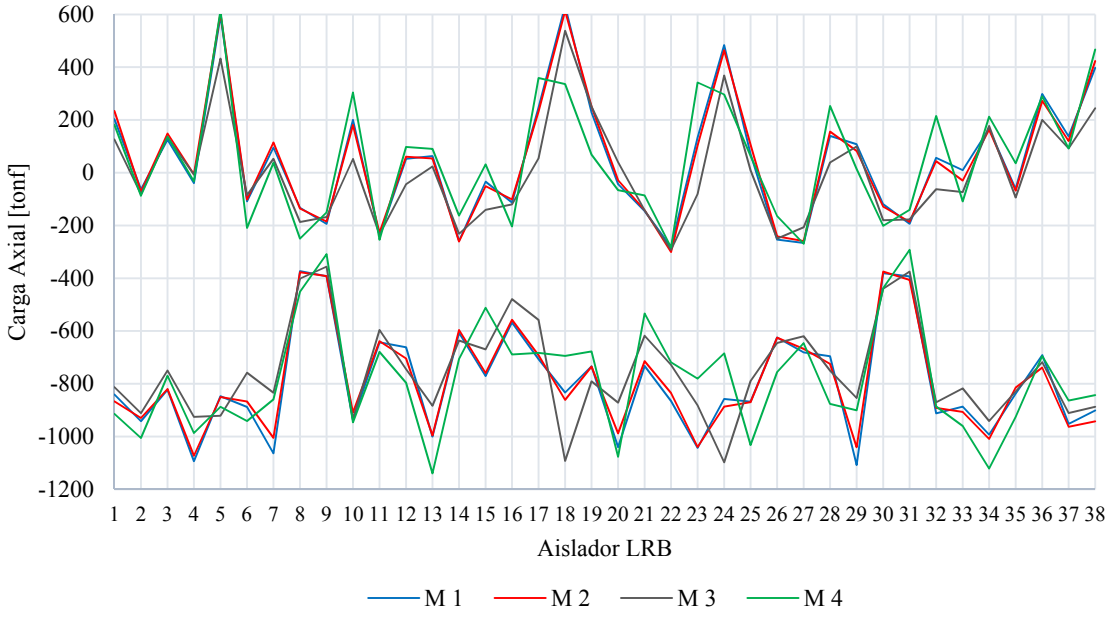


Figura IV- 64: Fuerza axial máxima y mínima en los aisladores LRB para los 4 modelos, método de análisis FNA.

IV.8.4.2 Curva Fuerza – Deformación para los aisladores 5 y 22 LRB.

La figura IV- 65 detalla las curvas fuerza – deformación de los aisladores 5 y 22 LRB, para los cuatro modelos y un análisis FNA. La figura detalla que los cortantes y los desplazamientos máximos son similares para las cuatro modelos, los máximos cortantes para M1 = 47 tonf, M2 = 48 tonf, M3 = 49 tonf y M4 = 47 tonf, en cuanto a los desplazamientos máximos M1 = 31 cm, M2 =32 cm, M3 =31 cm y M4 = 30 cm.

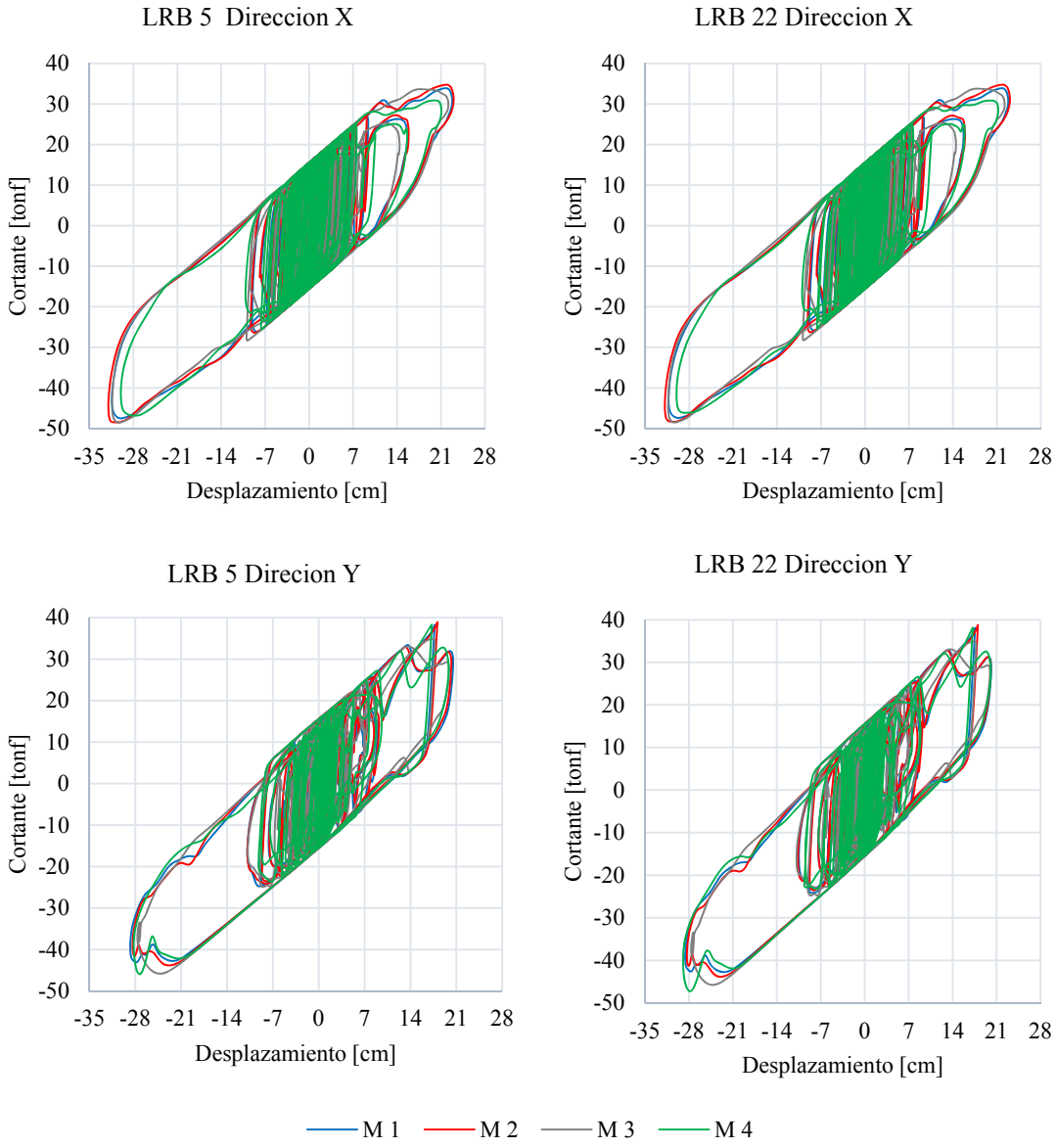


Figura IV- 65: Curvas Fuerza - Deformación de los Aisladores 5 y 22 LRB para los 4 modelos, método de análisis FNA.

IV.8.4.3 Drift y Desplazamiento en la Superestructura.

La figura IV- 66 detalla los Drift y Desplazamientos de la superestructura para los cuatro modelos aislados con LRB, análisis FNA. De la figura podemos observar que el modelo 3 es el que presenta menores valores de Dritf y Desplazamientos y el modelo 4 es el que detalla mayores valores de drift y desplazamientos.

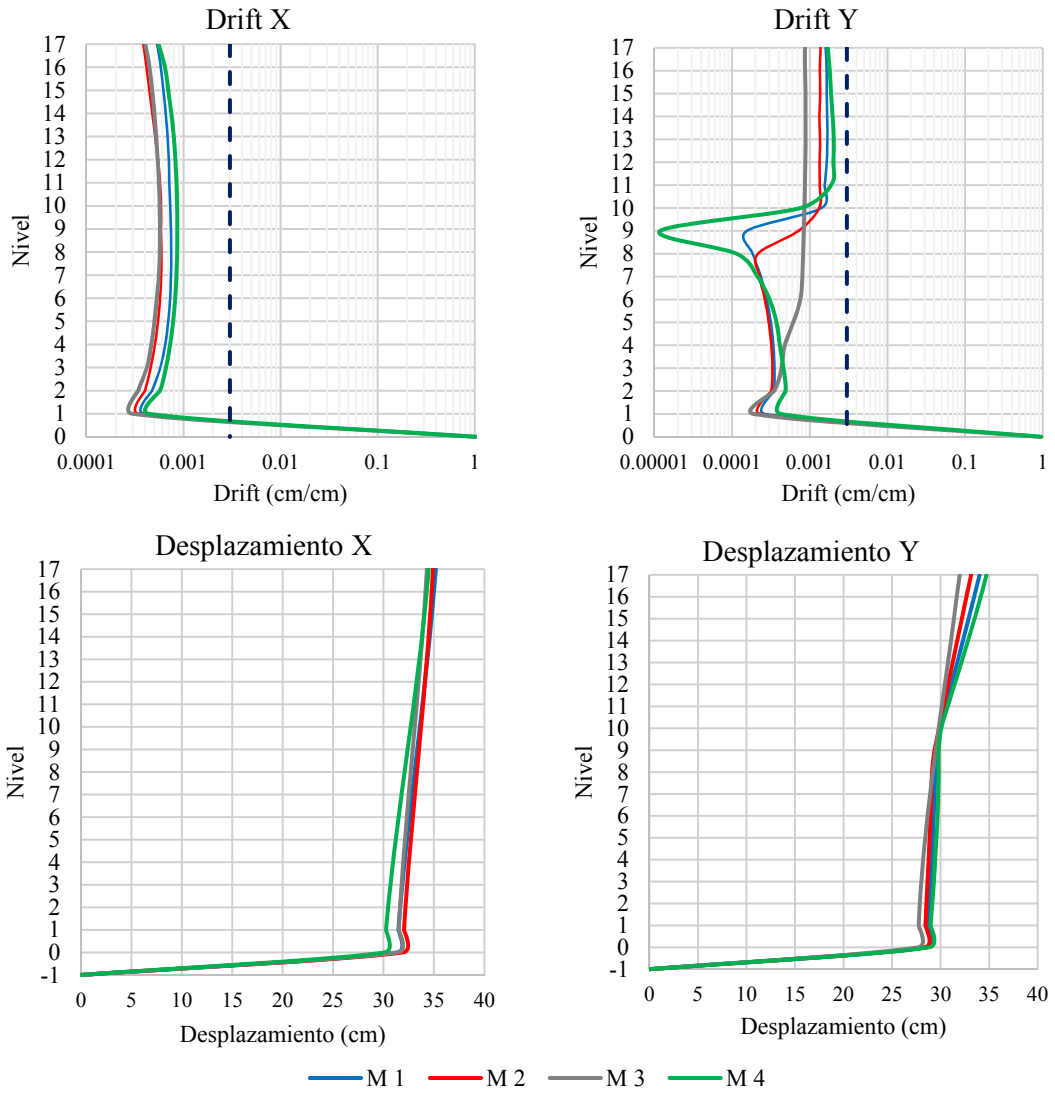


Figura IV- 66: Drift y Desplazamientos en la superestructura para los 4 modelos aislados LRB, método de análisis FNA.

IV.8.4.4 Tiempo Historia desplazamiento y cortante en la base.

La figura IV- 67 detalla el tiempo historia del desplazamiento y cortantes en la base para las direcciones X y Y, para los cuatro modelos de base aislada con LRB, análisis FNA. En la figura se observa que las respuesta en el tiempo de los desplazamientos y cortantes no presenta variaciones marcada entre los cuatro modelos.

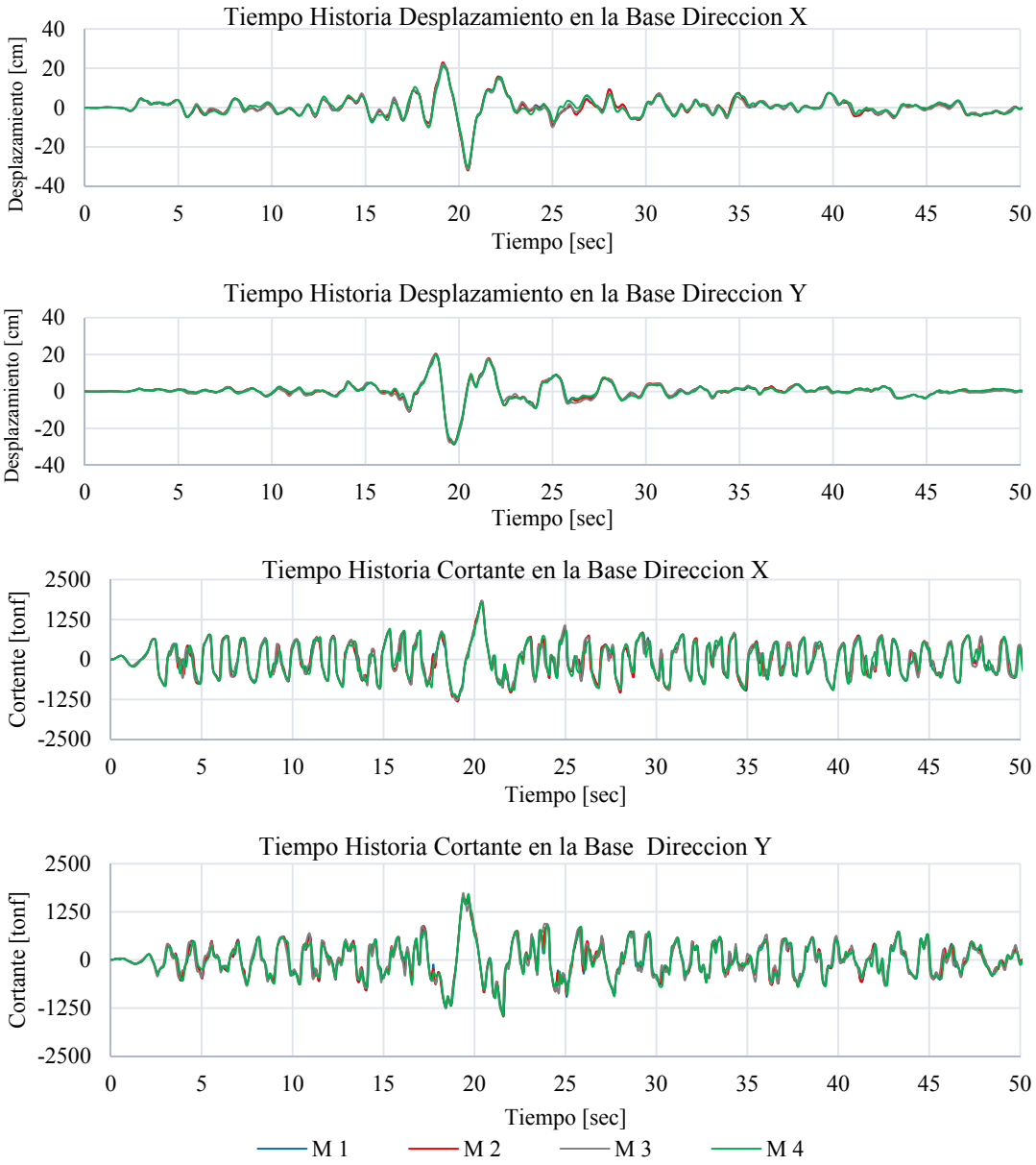


Figura IV- 67: Tiempo Historia del desplazamiento y cortante en la base dirección X y Y, para los 4 modelos aislados con LRB, análisis FNA.

IV.8.4.5 Comparación de las respuestas máximas.

La figura IV- 68 detalla las respuestas máximas del cortante basal, cortante máximo en el aislador, suma de la fuerza axial sobre los aisladores, momento en la base, desplazamiento en la base y el desplazamiento en el techo, para los cuatro modelos aislados con LRB, análisis FNA. De la figura podemos observar que las respuestas en la dirección X para los cuatros modelos es muy similar, las respuestas en la dirección Y presentan variaciones.

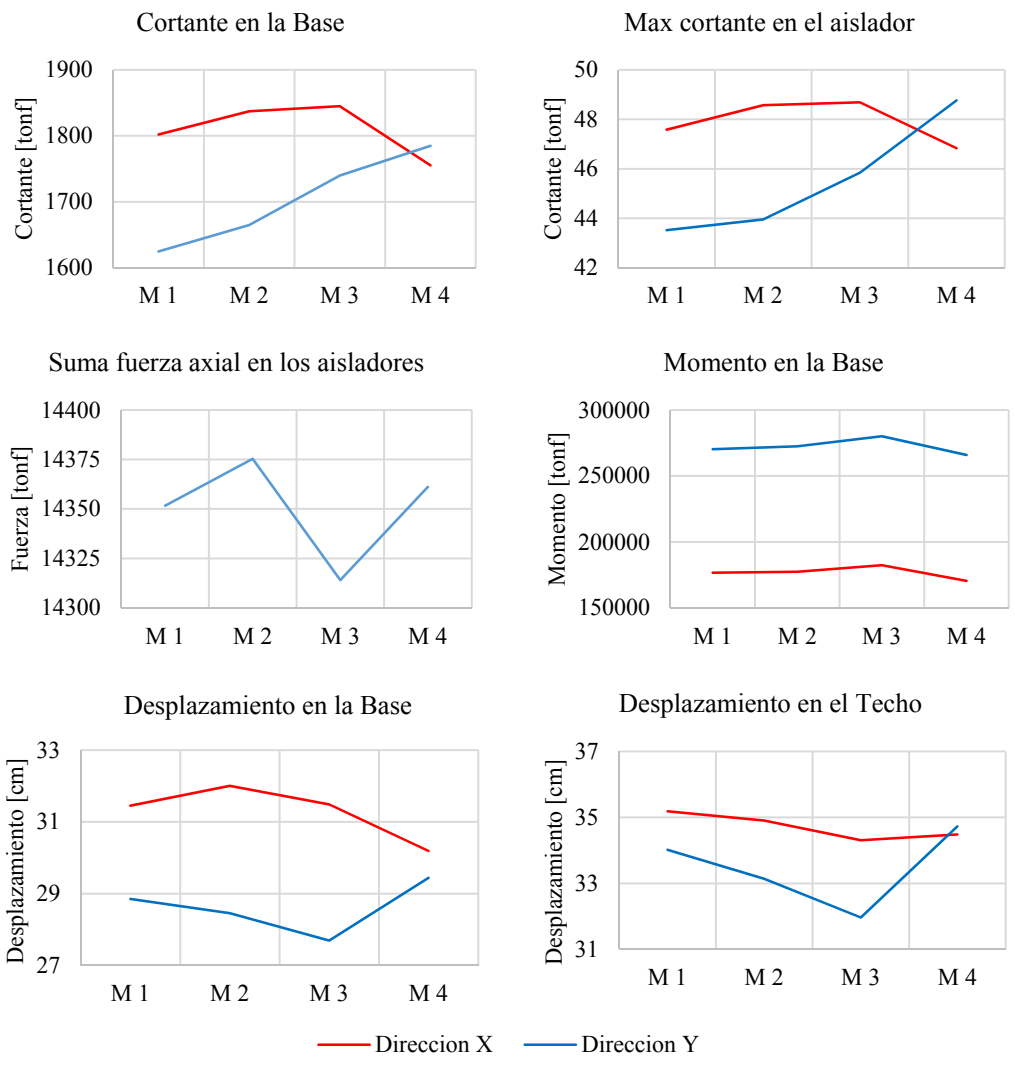


Figura IV- 68: Comparación de la respuesta máxima en el sistema con LRB, para los 4 modelos, método de análisis FNA.

IV.8.4.6 Distribución de cortantes por piso.

La figura IV- 69 detalla la distribución de cortante por piso para los cuatros modelos aislados con LRB, análisis FNA. La figura detalla que el modelo 3 presenta menores valores de cortante, los modelos 1 y 2 detallan respuesta de cortante similares y el modelo 4 en la dirección Y es el que presenta mayor valor de cortante.

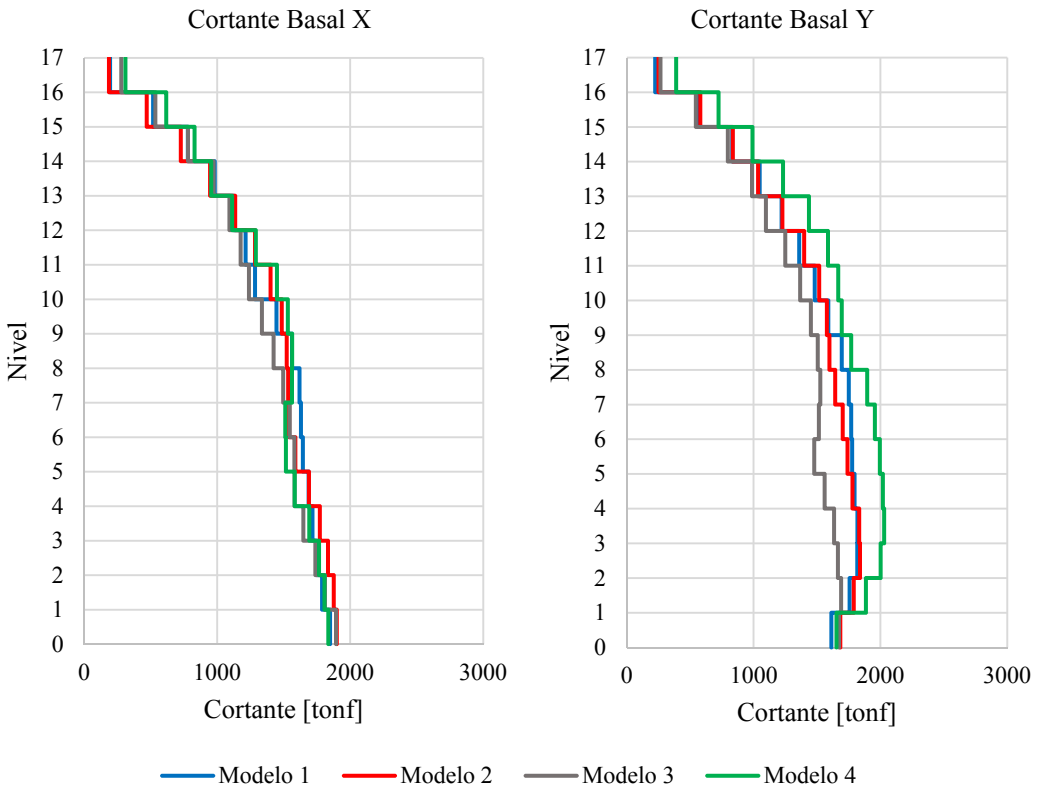


Figura IV- 69: Cortante por piso para los 4 modelos LRB, método de análisis FNA.

La figura IV- 70 detalla la distribución de cortante por piso para el modelo 2 con aisladores LRB, análisis FNA, comparando la respuesta del cortante total con respecto a la suma de cortantes por muro en cada dirección. La figura detalla que la suma de cortante por muro es mayor el resultado del cortante total para ambas direcciones.

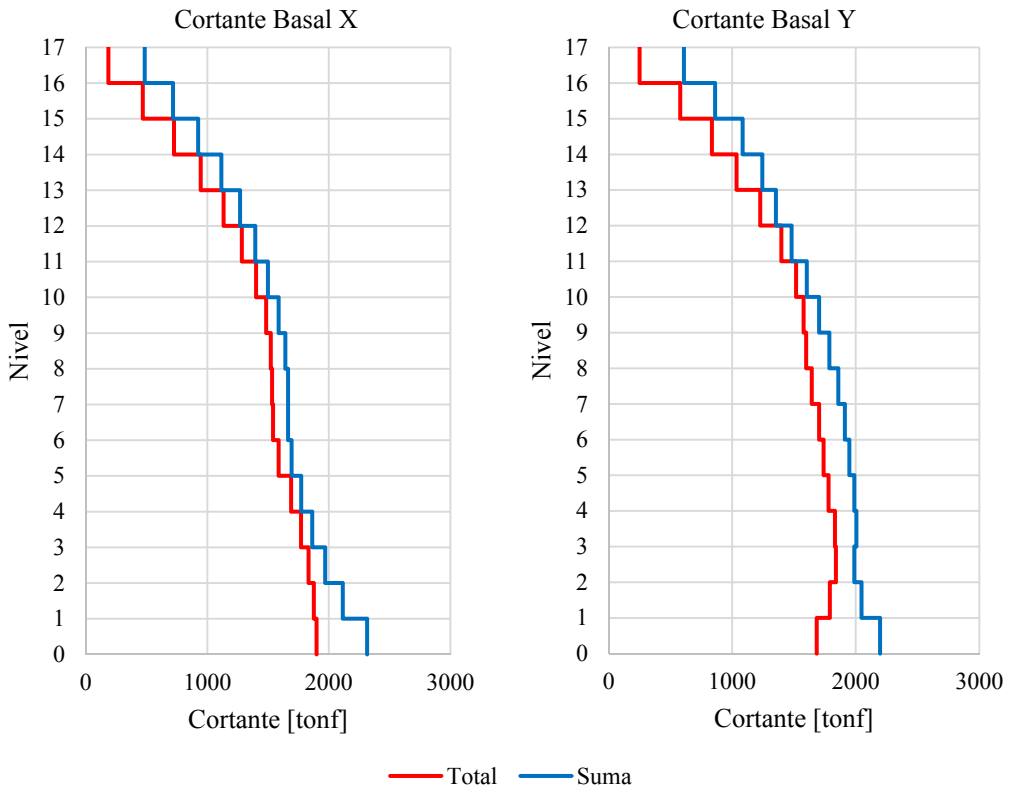


Figura IV- 70: Distribución de cortantes por piso para el modelo 2 con aisladores LRB, comparación del cortante total con respecto a la suma de cortante por muro, análisis FNA

IV.9 Comparación de respuestas de los sistemas FPS y LRB

A continuación se detallan las respuestas del modelo 2 aislado con FPS y LRB, analizados con el método FNA considerando 300 vectores Ritz, el modelo matemático basado en los supuestos de la sección IV.3 considerando los entrepisos del modelo como diafragma flexible y un amortiguamiento inherente en la superestructura de cero.

IV.9.1 Fuerza Axial en los aisladores.

La figura IV- 71 detalla los valores máximos y mínimos de la fuerza axial en el modelo 2 para aisladores FPS y LRB, análisis FNA. De la figura podemos observar que las fuerzas axiales a compresión para ambos aisladores son similares, el aislador FPS detalla una fuerza axial de 1180 tonf y la fuerza axial del LRB de 1080 tonf, en cuanto a las fuerzas axiales a tensión del FPS son cero y del aislador LRB de 610 tonf.

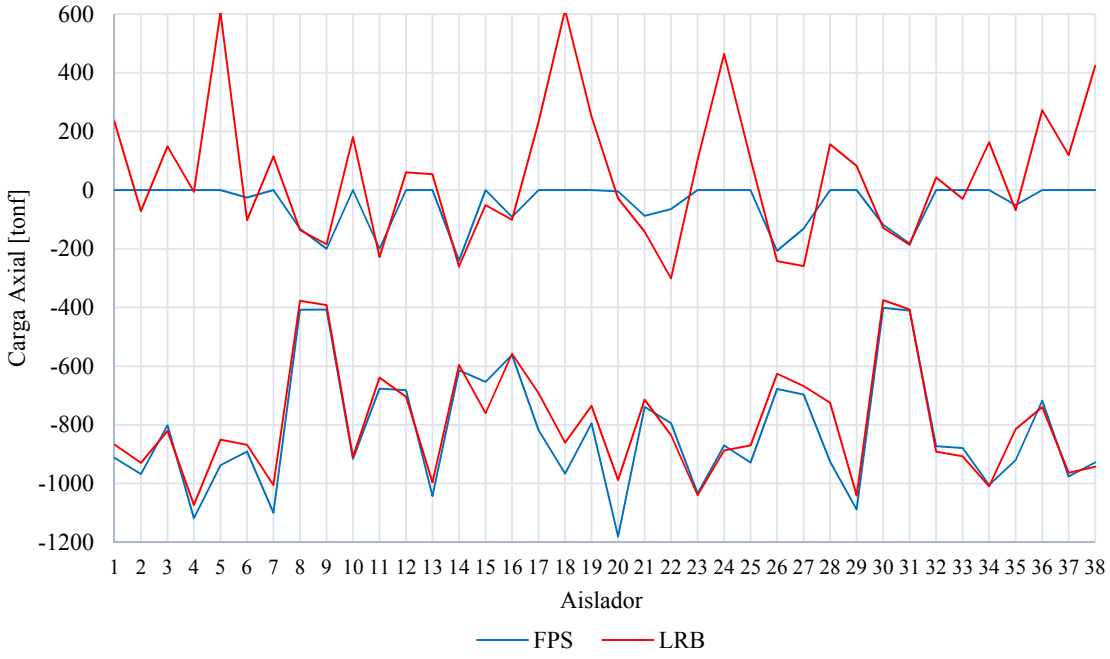


Figura IV- 71: Fuerza axial máxima y mínima en los aisladores FPS y LRB, modelo 2, método de análisis FNA.

IV.9.2 Curvas Fuerza – Deformación de los aisladores 5 y 22.

La figura IV- 72 detalla las curvas fuerza – deformación de los aisladores 5 y 22 del modelo 2 para los sistemas FPS y LRB, análisis FNA. De la figura se detalla que los cortantes son mayores para el sistema con FPS con una fuerza máxima de 140 tonf con respecto al cortante máximo 48 tonf del LRB. En cuanto a los desplazamientos para ambos sistemas, el valor en muy similar con 32 cm como máximo valor.

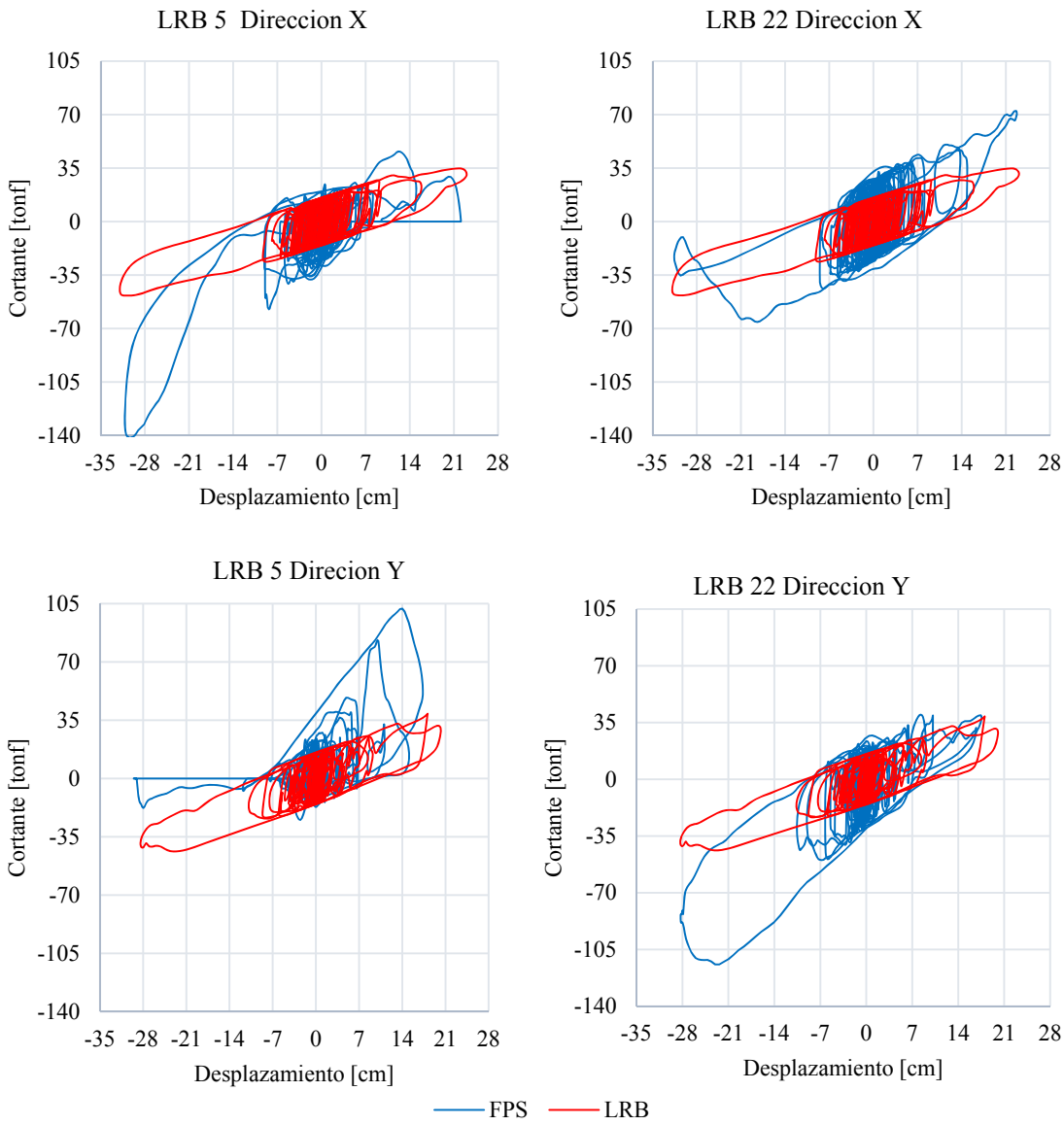


Figura IV- 72: Curvas Fuerza - Deformación de los Aisladores 5 y 22 modelo 2 con aisladores FPS y LRB, análisis FNA.

IV.9.3 Drift y Desplazamientos en la Superestructura.

La figura IV- 73 detalla los Drift y Desplazamientos de la superestructura para el modelo 2 con los sistemas FPS y LRB. De la figura se puede observar que el sistema con aisladores FPS presenta mayores valores de Dritf y Desplazamientos, se puede observar que los desplazamiento en la base son iguales para ambos, pero el desplazamiento en el techo dirección Y el sistema con FPS es mucho mayor con un valor de 39 cm con respecto a los 33 del sistema LRB.

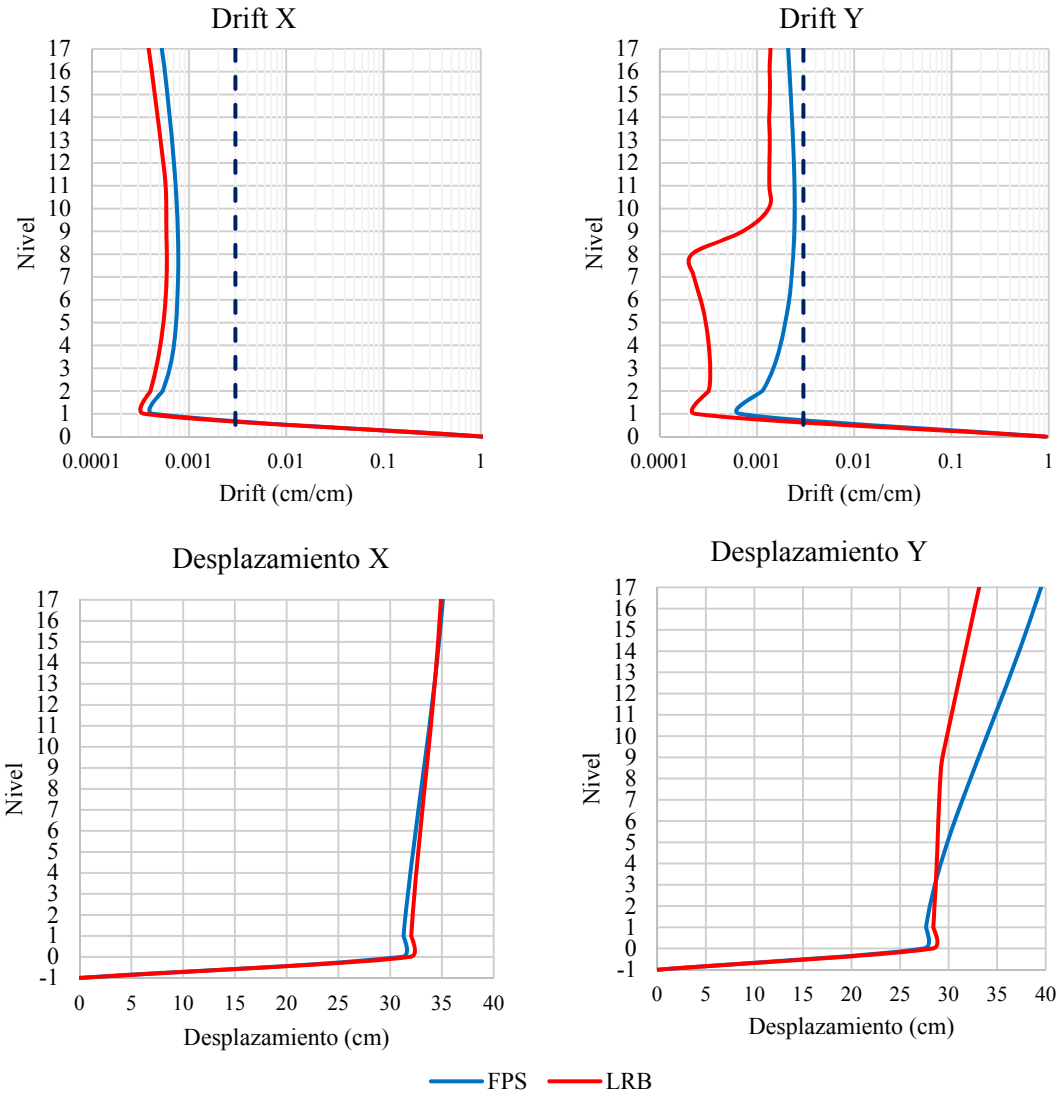


Figura IV- 73: Drift y Desplazamientos en la superestructura para el modelo 22 con los sistemas FPS y LRB, análisis FNA.

IV.9.4 Tiempo Historia de los desplazamientos y cortantes en la base.

La figura IV- 74 detalla el tiempo historia del desplazamiento y cortantes en la base para las direcciones X y Y, para el modelo 2 con los sistemas FPS y LRB. De la figura se puede observar que los desplazamientos en X son similares para ambos sistemas, sin embargo los desplazamientos en Y son mayores para el sistema FPS el mismo comportamiento se da en los cortantes el sistema con FPS presenta mayores valores. .

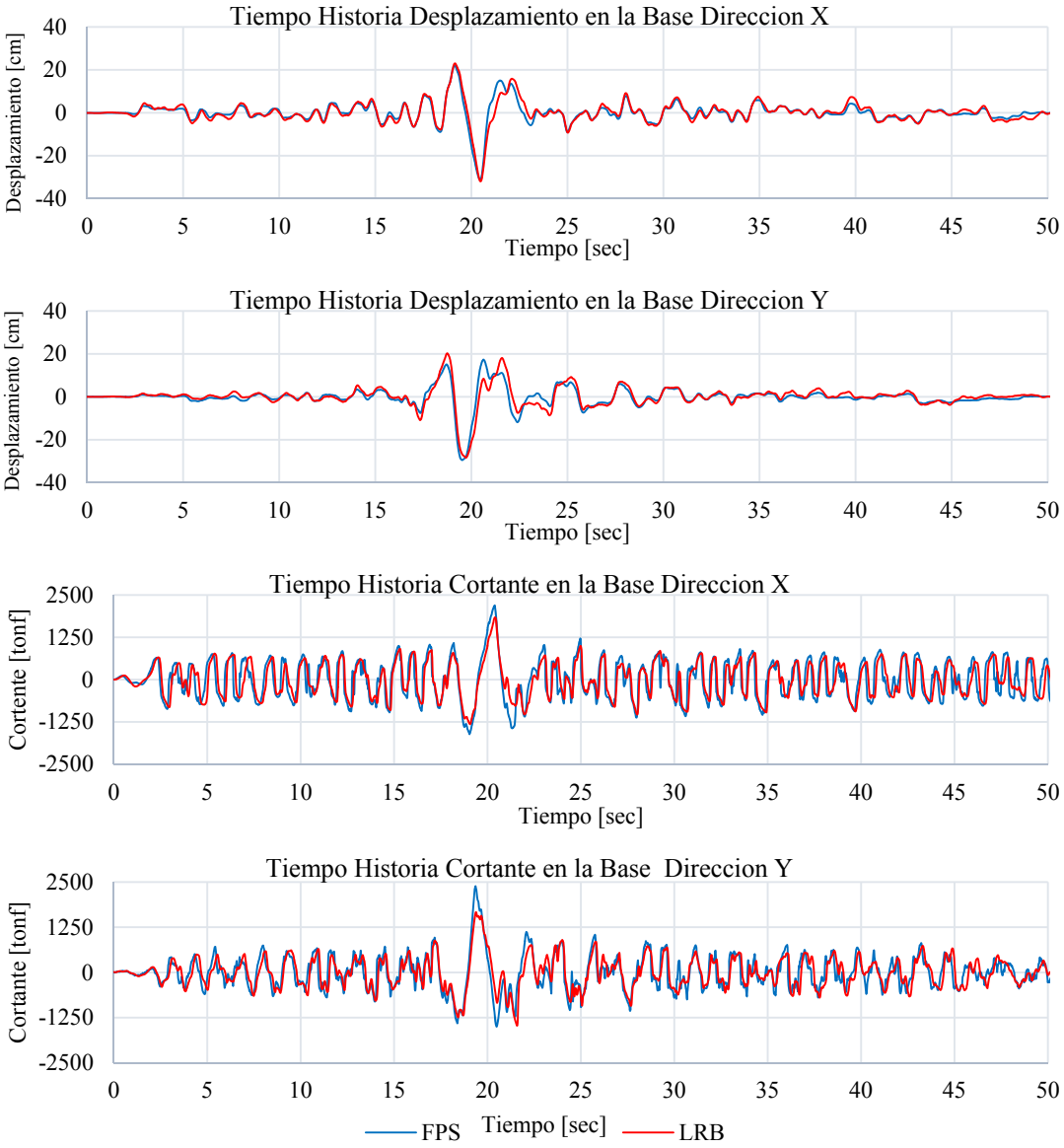


Figura IV- 74: Tiempo Historia del desplazamiento y cortante en la base dirección X y Y, para el modelo 2 con los sistemas FPS y LRB, análisis FNA.

IV.9.5 Comparación de las respuestas máximas.

La figura IV- 75 detalla las respuestas máximas del cortante basal, cortante máximo en el aislador, suma de la fuerza axial sobre los aisladores, momento en la base, desplazamiento en la base y el desplazamiento en el techo, para el modelo 2 con los sistemas FPS y LRB, análisis FNA. De la figura se puede ver que las fuerzas en el sistema LRB son menores que el sistema FPS.

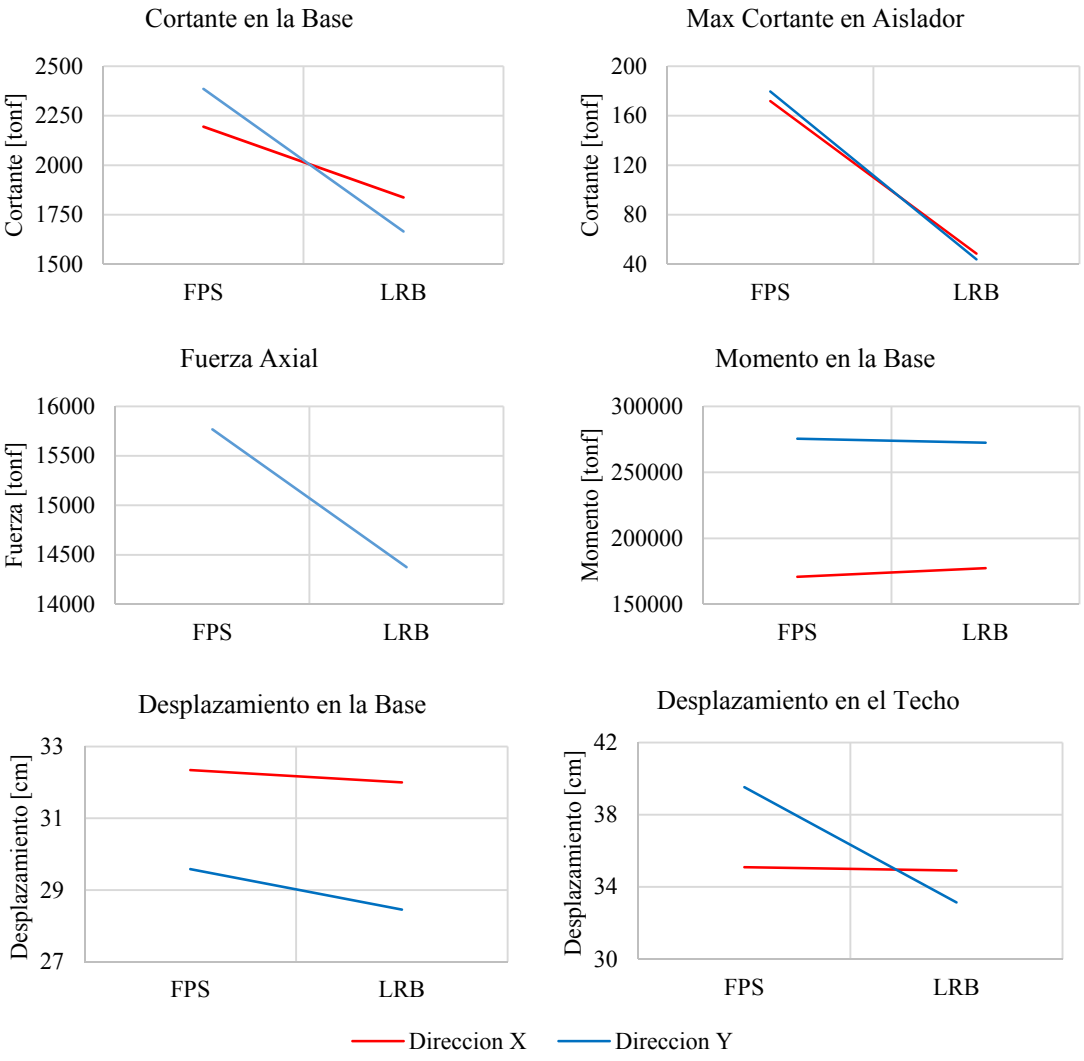


Figura IV- 75: Comparación de la respuesta máxima para el modelo 2 con los sistemas FPS y LRB, análisis FNA.

IV.9.6 Distribución de cortantes por piso.

La figura IV- 76 detalla la distribución de cortante por piso, para el modelo 2 con los sistemas FPS y LRB, análisis FNA. Se puede observar de la figura que la distribución de cortantes por piso en las dos direcciones es mayor para el sistema con FPS, el mayor cortante del sistema FPS es 2897 tonf con respecto a los 1899 tonf del sistema LRB.

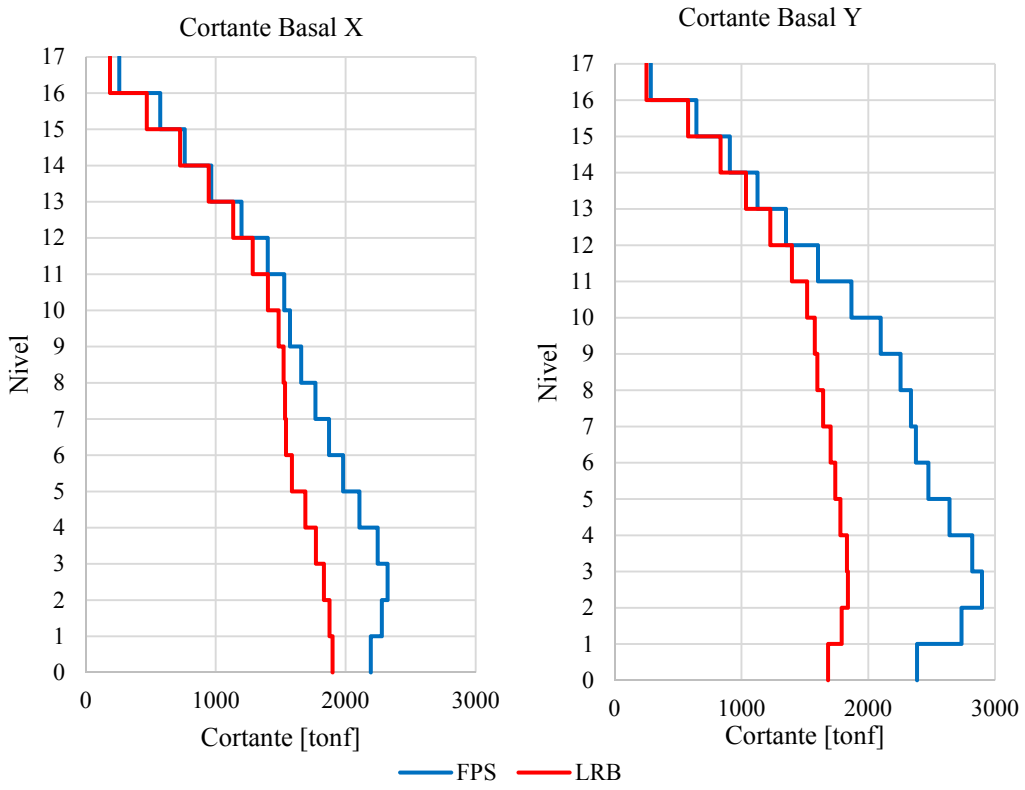


Figura IV- 76: Cortante por piso para el modelo 2 con los sistemas FPS y LRB, análisis FNA.

La figura IV- 77 detalla la distribución de cortante por piso para el modelo 2 con los sistemas FPS y LRB, análisis FNA, comparando la respuesta del cortante total con respecto a la suma de cortantes por muro en cada dirección.

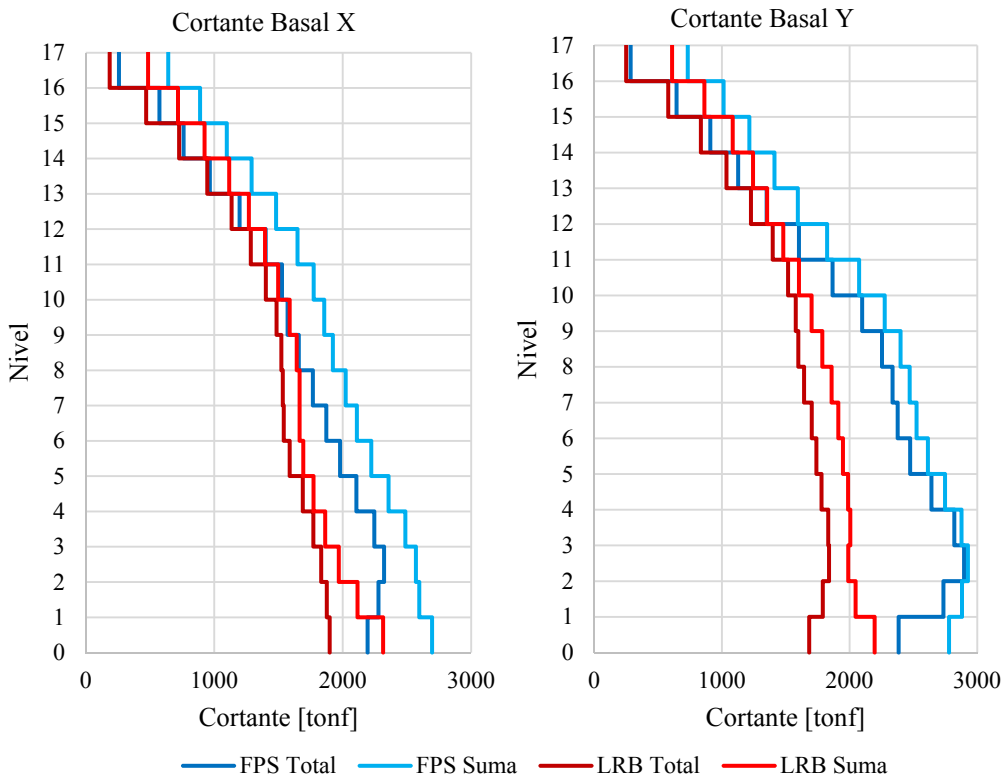


Figura IV- 77: Distribución de cortantes por piso para el modelo 2 con los sistemas FPS y LRB análisis FNA, comparación del cortante total con respecto a la suma de cortante por muro.

IV.10 Diseño final de los aisladores.

El diseño de los aisladores es un proceso iterativo que consiste en definir las propiedades mecánicas del aislador, que luego se comparan con las respuestas del análisis estructural, el proceso iterativo finaliza cuando las propiedades y respuestas coinciden. Debido a que las propiedades del aislador dependen de su geometría, el diseño del aislador se resume en definir sus dimensiones. Las principales propiedades mecánicas a evaluar del aislador son: capacidad axial, rigidez horizontal, rigidez vertical, fuerza cortante y desplazamiento lateral.

IV.10.1 Geometría final del aislador FPS.

El diseño final del aislador FPS se determinó para el modelo 2, se considerarán las respuestas obtenidas en la sección IV.9 entre las principales: fuerza axial máxima sobre el aislador 1180 tonf, cortante máximo en el aislador 140 tonf y el desplazamiento lateral máximo de 32 cm. Una vez finalizado el análisis iterativo se obtuvo una geometría del FPS que se detalla en la figura IV- 78 y sus propiedades mecánicas se detalla en la tabla IV-7.

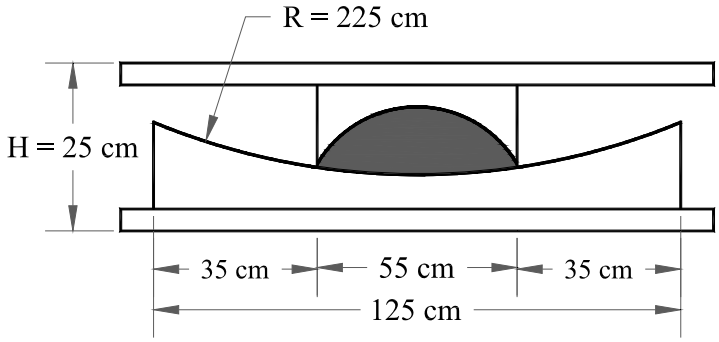


Figura IV- 78 Geometría final del aislador FPS.

Tabla IV- 7 Propiedades mecánicas del aislador FPS.

Capacidad Axial - N_{FPS}	1180	tonf
Desplazamiento lateral máximo	35	cm
Radio del Aislador - R	225	cm
Altura del Aislador – H_{FPS}	25	cm
Diámetro del deslizador	55	cm
Diámetro exterior - D_{FPS}	125	cm
Área del deslizador	2376	cm^2
Rigidez Vertical FPS	99785	tonf/cm
Coeficiente de fricción - rápido	0.05	
Coeficiente de fricción - lento	0.04	

IV.10.2 Geometría final del aislador LRB.

El diseño final del aislador LRB se determinará para el modelo 2, se considerarán las respuestas obtenidas en la sección IV.9, pero al observar la fuerza axial sobre el aislador se concluyó que no puede ser diseñado un aislador LRB con una capacidad axial a tensión de 610 tonf, por lo que se hará un nuevo análisis al modelo 2, se cambiará el periodo objetivo de la base aislada de 3 segundos a 5 segundos, con el fin de disminuir la demanda sísmica y bajar la fuerza axial sobre los aisladores. La figura IV-79 detalla las fuerzas axiales para el nuevo sistema aislado para T = 5 seg, de la figura se observa que las fuerzas axiales a tensión disminuyeron significativamente con respecto al sistema de base aislada para T = 3 seg de 610 tonf a 88 tonf, sin embargo, esta fuerza es mucho mayor para un aislador LRB, por lo que haremos un nuevo análisis omitiendo del modelo matemático los aisladores LRB que presentan fuerza axial a tensión, este sistema lo identificaremos como sistema de base aislada para T = 5 seg modificado, se eliminarán 6 aisladores que se identifican como: 1, 5, 18, 19, 24 y 38. Las fuerzas axiales de este sistema se detallan en la figura IV-79, mostrando una fuerza máxima a compresión de 1095 tonf y de cero las fuerza a tensión.

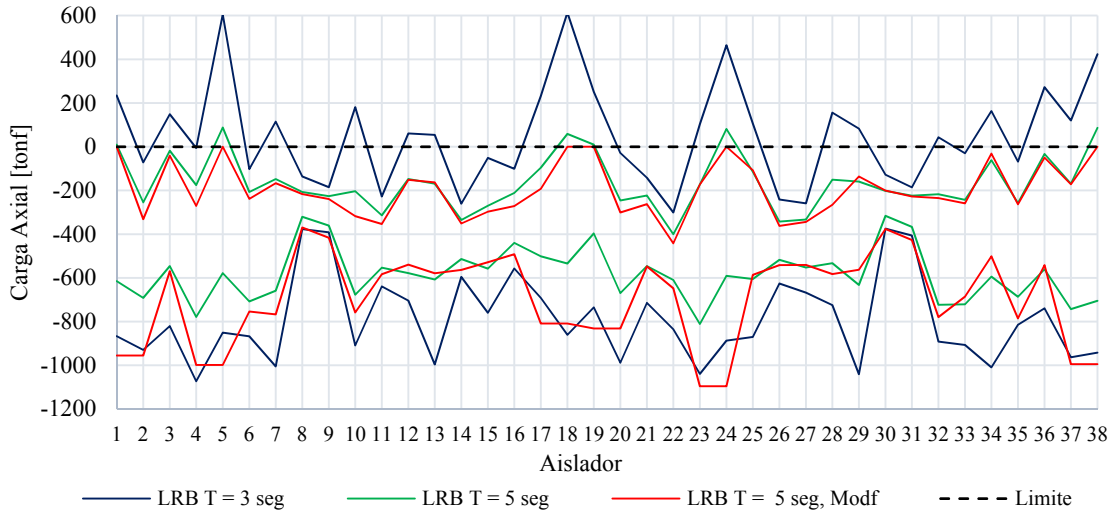


Figura IV- 79: Fuerza axial máxima y mínima en los aisladores LRB, para el modelo 2 con base aislada para T = 3 seg, T = 5 seg y T = 5 seg modificado.

La figura IV- 80 detalla las curvas fuerza deformación del aislador 5 LRB del modelo 2 con base aislada para T = 3 seg, T = 5 seg y T = 5 seg modificado. De la figura se observa que los modelos con periodo objetivo de 5 seg detalla menor valor de cortante, El cortante máximo del sistema T = 5 seg modificado es 18 tonf y el max cortante del sistema T = 3 seg 48 tonf. En cuanto al desplazamiento máximo este es igual para los tres sistemas.

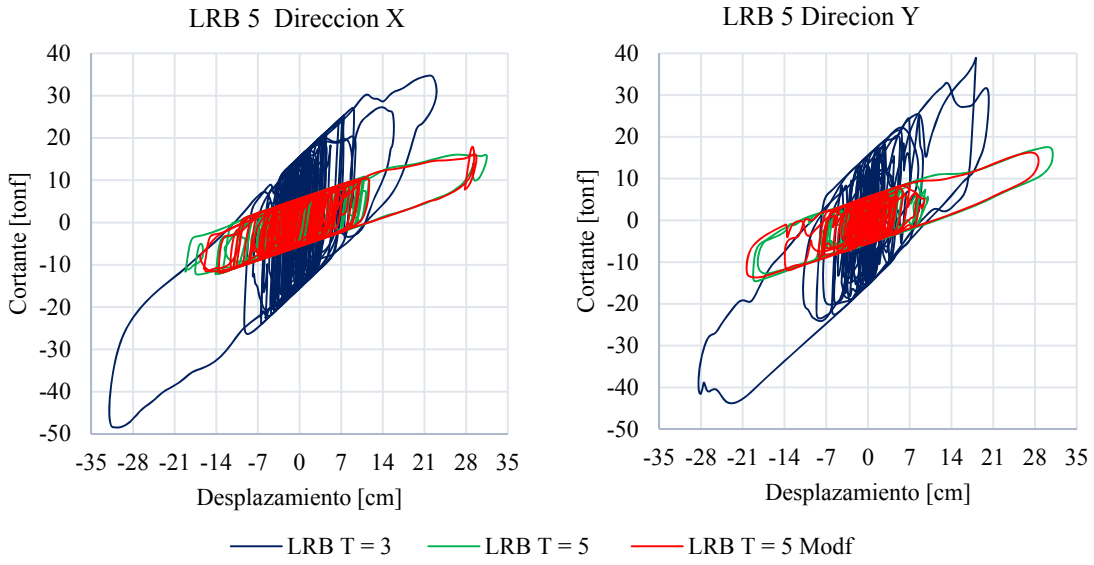


Figura IV- 80: Curvas fuerza deformación del aislador 5 LRB, para el modelo 2 con base aislada para T = 3 seg, T = 5 seg y T = 5 seg modificado.

De análisis anterior definimos: fuerza axial máxima sobre el aislador 1095 tonf, cortante máximo en el aislador 18 tonf y el desplazamiento lateral máximo de 32 cm. Una vez finalizado el análisis iterativo, se obtuvo una geometría del LRB que se detalla en la figura IV- 81 y sus propiedades mecánicas se detalla en la tabla IV-8.

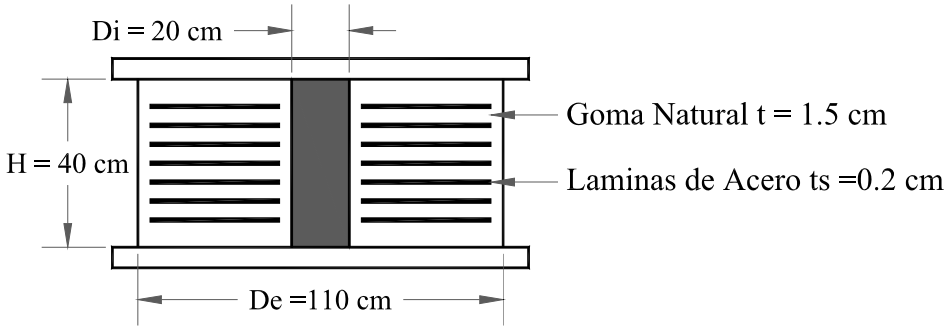


Figura IV- 81 Geometría final del aislador LRB.

.

Tabla IV- 8 Propiedades mecánicas del aislador LRB.

Capacidad Axial – N_{LRB}	1100	tonf
Desplazamiento lateral máximo	33	cm
Diámetro interior aislador – Di	20	cm
Diámetro exterior aislador – De	110	cm
Altura del aislador – H_{LRB}	40	cm
Espesor de la capa de goma - tr	1.5	cm
Espesor de la capa de acero – ts	0.02	cm
Área del aislador – A_{LRB}	9189	cm^2
Rigidez lateral - K_D	0.69	tonf/cm
Rigidez vertical – Kv	620	tonf/cm
Módulo de corte – G	3	Kg/cm^2
Módulo de elasticidad – E	2700	Kg/cm^2
Factor de Forma - S	15	

V. RESULTADO DEL ESTUDIO.

V.1 Resumen de los resultados de los análisis de sensibilidad.

Los resultados de los análisis hechos en el capítulo IV a los modelos aislados se resumen en las siguientes tablas, las respuestas detallan las acciones sobre los aisladores y el desplazamiento de la superestructura, la tabla V-1 muestra los resultados para los modelos aislados con FPS, la tabla V-2 muestra los resultados para los modelos aislados con LRB y la tabla V-3 compara las respuestas de los modelos aislados con FPS y LRB.

Tabla V – 1 Resumen de los resultados de los análisis al sistema con aisladores FPS.

Descripción del Modelo y Análisis.	**Comportamiento del sistema con FPS**
Sensibilidad en el análisis FNA diferentes números de modos, 25 M, 75 M, 150 M, 300M, 600M, para ξ=0%, Modelo 2, Diafragma Flexible.	Hay una variación sobre las fuerzas máximas del aislador, un15% de la fuerza axial y un 10% en el cortante, a menor número de modos mayor la fuerza Y una variación del 6% en desplazamientos laterales del sistema de aislación, a menor número de modos menor el desplazamiento. No hay una variación marcada del desplazamiento de techo, la diferencia es menor al 1%.
Sensibilidad en el modelo matemático para diferentes factores de amortiguamiento en la superestructura ξ=0%, ξ=2%, ξ=5%, análisis FNA 300 Modos, Modelo 2, Diafragma Flexible	Hay una variación sobre las fuerzas máximas del aislador, un 6% de la fuerza axial y un 14% en el cortante, a mayor factor de amortiguamiento menor la fuerza. La diferencia de los desplazamientos laterales del sistema aislado y el techo es leve, esta es menor al 2%, mayor factor de amortiguamiento menor desplazamiento.
Sensibilidad para diferentes métodos de análisis dinámico no lineal, para ID y FNA, para ambos ξ=0%, Modelo 2, Diafragma Rígido.	Hay una variación sobre las fuerzas máximas del aislador, de un 33% en la fuerza axial y cortante, los valores son mayores para el método ID. La diferencia de los desplazamientos laterales del sistema aislado y el techo es leve, esta es menor al 0.1%.

Sensibilidad en el análisis ID para diferentes combinaciones del amortiguamiento tipo Rayleigh en la superestructura, Modelo 2, Diafragma Rígido.	Las respuestas de fuerza y desplazamiento en el aislador son altamente sensible a las combinaciones del amortiguamiento tipo Rayleigh,
Sensibilidad en el modelo matemático para diferentes tipos de modelo del diafragma del entrepiso. Diafragma rígido y flexible, análisis FNA 300 M, ξ=0%, Modelo 2.	Hay una variación sobre las fuerzas máximas del aislador, un 10% de la fuerza axial y un 2% en el cortante, el sistema con diafragma rígido presenta menores valores. No hay una variación marcada del desplazamiento lateral del aislador, la diferencia es menor al 0.2%. Hay un variación del 6% los desplazamientos de la superestructura, marcando una diferencia marcada en los Drift, el sistema con diafragma rígido presenta menores valores.
Sensibilidad para los cuatro modelos matemáticos del sistema aislado. Modelo 1 muro FEM discretizado 0.5x0.5cm, Modelo 2 muro FEM discretizado 1x1m, Modelo 3 muro FEM sin discretizar, Modelo 4 muro FRAME con cachos rígidos, para los cuatro modelos análisis FNA 300 M, ξ=0%, Diafragma Flexible.	El modelo 4 es el que presenta mayores fuerzas sobre el aislador y el modelo 3 es el que detalla menores valores, la variación de las respuestas es hasta del 24 %. El modelo 1 es el que más se acerca a la respuesta del modelo 4, con una diferencia hasta del 10%. En cuanto a los desplazamientos laterales máximos en el aislador, es el modelo 1 el que detalla mayores desplazamientos y el modelo 4 es el que detalla menores valores, la variación de las respuestas es hasta del 3 %, los modelos 2 y 3 presentan igual desplazamientos y estos muestran un diferencia con el modelo 1 de un 1%. Las respuestas de los modelos 1 y 2 detallan un mismo comportamiento de respuesta, pero las respuestas del modelo 2 son siempre menores. Hay una variación en las respuestas de los cortantes distribuidos por piso, el modelo 4 es el que presenta mayores valores, el modelo 3 presenta los menores valores y los modelos 1 y 2 detallan respuestas similares.

Tabla V – 2 Resumen de los resultados de los análisis al sistema con aisladores LRB.

Descripción del Modelo y Análisis.	**Comportamiento del sistema con LRB**
Sensibilidad en el análisis FNA diferentes números de modos, 25 M, 75 M, 150 M, 300M, 600M, para ξ=0%, Modelo 2, Diafragma Flexible.	La variación de la respuesta es casi nula para las fuerza y desplazamientos, esta es menor a 0.5%.
Sensibilidad en el modelo matemático para diferentes factores de amortiguamiento en la superestructura ξ=0%, ξ=2%, ξ=5%, análisis FNA 300 M, Modelo 2, Diafragma Flexible.	Hay una variación sobre las fuerzas máximas del aislador, un 8% de la fuerza axial a compresión y una variación leve del 2% en el cortante, a mayor factor de amortiguamiento menor la fuerza. La diferencia de los desplazamientos laterales del sistema aislado y el techo es leve, esta es menor al 3%, mayor factor de amortiguamiento menor desplazamiento.
Sensibilidad para diferentes métodos de análisis dinámico no lineal, para ID y FNA, para ambos ξ=0%, Modelo 2, Diafragma Flexible.	La variación de la respuesta es casi nula para las fuerzas y desplazamientos, esta es menor a 0.6%.
Sensibilidad para los cuatro modelos matemáticos del sistema aislado. Modelo 1 muro FEM discretizado 0.5x0.5cm, Modelo 2 muro FEM discretizado 1x1m, Modelo 3 muro FEM sin discretizar, Modelo 4 muro FRAME con cachos rígidos, para los cuatro modelos análisis FNA 300 M, ξ=0%, Diafragma Flexible.	El modelo 4 es el que presenta mayores fuerzas sobre el aislador y el modelo 3 es el que detalla menores valores, la variación de las respuestas es hasta del 6 %. El modelo 1 es el que más se acerca a la respuesta del modelo 4, con una diferencia hasta del 2.8%. En cuanto a los desplazamientos laterales máximos en el aislador es el modelo 2 es el que detalla mayores desplazamientos y el modelo 4 es el que detalla menores valores, la variación de las respuestas es hasta del 5.5 %, los modelos 1 y 3 presentan igual desplazamientos y estos muestran un diferencia con el modelo 2 de un 1.5%. Las respuestas de los modelos 1 y 2 detallan un mismo comportamiento de respuesta. Hay una variación en las respuestas de los cortantes distribuidos por piso, el modelo 4 es el que presenta mayores valores, el modelo 3 presenta los menores valores y los modelos 1 y 2 detallan respuestas similares.

Tabla V – 3 Resumen de las respuestas del sistema aislado para distintos aisladores FPS y LRB.

Descripción del Modelo y Análisis.	**Comportamiento del Sistema.**
Sensibilidad en el modelo 2 aislado, para diferentes aisladores FPS y LRB, análisis FNA 300 modos, ξ=0%, Diafragma Flexible.	El modelo aislado con LRB presenta menores valores de: fuerza axial a compresión variación del 9%, cortante sobre el aislador variación del 75%, desplazamiento de techo de la superestructura variación del 16%, cortante en la base variación del 30% y distribución de cortante por piso. Los modelos con FPS y LRB detallan similar respuesta de desplazamiento lateral máximo en el aislador con una del variación del 1%

V.2 Conclusiones del Estudio.

Los resultados de los análisis de sensibilidad detallaron que las respuestas en los modelos de base aislada con FPS son muy sensibles a los cambios en los parámetros del modelo matemático y el método de análisis, específicamente en los valores máximos de cortante y fuerza axial sobre el aislador, esta sensibilidad se asocia al comportamiento no lineal del FPS en el sentido vertical; el estudio detalló que si se desea tener una respuesta acertada del sistema aislado con FPS, éste deberá tener las características del modelo uno, donde los muros y losas son representados por elementos tipo Shell discretizados a 0.5mx05m, el modelo matemático de la superestructura deberá considerar diafragma flexible en los entrepisos, amortiguamiento inherente de cero y el método de análisis deberá ser FNA con un número alto de vectores Ritz; ahora bien, si se desea tener una respuesta aproximada de los desplazamientos en los aisladores, el sistema puede tener las características del modelo 2.

En cuanto a los resultados del modelo aislado con FPS y analizados por el método de ID, se puede decir que no son concluyentes, no se puede establecer con precisión el factor por el cual las respuestas máximas en el aislador son tan diferentes con respecto a las obtenidas por el método FNA, se deberán realizar más análisis de sensibilidad para sacar conclusiones. Lo único que puede concluirse de los resultado del método de análisis ID es que un mal criterio en la selección del amortiguamiento tipo Rayleigh pueden generar respuestas erróneas del sistema.

La insensibilidad en la respuesta mostrada por el sistema con aisladores LRB para diferentes criterios de modelamiento y método de análisis, puede ser aprovechada para un ahorro de los recursos computacionales y tiempo de cálculo al momento de realizar un análisis dinámico no lineal, se puede obtener una respuesta certera del comportamiento sísmico del sistema si se elige un sistema con las características del modelo dos, donde los muros y losas son representado por elementos tipo Shell discretizados a 1mx1m, el modelo matemático de la superestructura deberá considerar diafragma flexible en los entrepisos, amortiguamiento inherente de cero, el método de análisis deberá ser FNA con un número bajo de vectores Ritz.

Al comparar las respuestas del sistema aislado con FPS y LRB para un igual periodo de vibración objetivo de 3 segundos, se observa que las respuestas de la fuerza axial y cortante sobre el aislador así como el cortante basal total y distribución de cortante por piso, el sistema aislado con LRB presenta respuestas mucho menores que el sistema con aislador FPS.

Un resultado importante de los análisis de sensibilidad, fue ver el comportamiento de los modelos para diferentes factores de amortiguamiento inherente de la superestructura, cuando se emplea un análisis FNA se obtienen respuesta sísmicas similares, pero si se emplea el método de análisis ID hay una variación marcada de la respuesta, de esto podemos concluir que si se desea respuesta acertada del sistema aislado se deberá considerar para ambos métodos, el amortiguamiento inherente de la superestructura igual a cero.

Otro aspecto relevante del estudio fue ver las respuestas para un sistema aislado con diferente tipo de diafragma de entrepiso, a pesar de que la fuerza cortante y el desplazamiento máximo en el aislador son similares, las respuestas de la fuerza axial sobre el aislador, los drift y desplazamientos por piso de la superestructura son muy diferentes, las respuestas del modelo con diafragma rígido son mucho menores con respecto a las respuestas del modelo con diafragma flexible.

En cuanto a la distribución del cortante por piso, se observó que la suma de los cortantes por muro es mayor al cortante calculado para el total del sistema, se concluye que la diferencia para ambos cortantes se debe a que los valores máximos del conjunto y los valores máximos por muro, no ocurren al mismo instante de tiempo.

BIBLIOGRAFIA

ANIL K. CHOPRA, *Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering, 4rd Edition, Prentice Hall*.

E. L. WILSON, *Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures, A physical Approach with Emphasis on Earthquake Engineering, 3rd Edition, Computers and Structures, Inc.*

F. NAEIM, J. M. KELLY, *Design of Seismic Isolated Structures, From Theory to Practice, 1999, John Wiley & Sons, Inc.*

J. M. KELLY, D. A. KONSTANTINIDIS, Mechanics of Rubber Bearings for Seismic and Vibration Isolation, 2011, *John Wiley & Sons, Inc.*

J. SCHELLER and M. C. CONSTANTINOU, *Response History Analysis of Structures with Seismic Isolation and Energy Dissipation Systems: Verification Examples for Program SAP2000, Technical Report MCEER-99-0002.*

NCh 2745-2003, *Norma Chilena, Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica requisitos, Versión Final Comité – Abril 2003*

NCh 433-1996, Modificada en 2009, Decreto Supremo 61 Nov. 2011, Norma Chilena Oficial, Diseño sísmica de edificios, Instituto Nacional de Normalización, Segunda Edición 2009.

R. AGUIAR, J. L. ALMAZAZ, P. DECHENT, V. SUAREZ, *Aisladores de Base Elastómeros y FPS, 1ª Edición, Escuela Politécnica del Ejercito.*

R. A. GARCIA, *Análisis no lineal de la estructura de soporte de una caldera de potencia usando FNA, Tesis Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería, Enero 2009.*

SAP2000, *Integrated Software for Structural Analysis and Design, Analysis Reference Manual, Version 8.0 July 2002, Computers and Structures, Inc*.

A N E X O S

Anexo A: Cálculo Demanda Sísmica.

A.1. Definición del Espectro Diseño.

De acuerdo a la norma NCh 2745 el espectro de diseño es calcula de acuerdo al esquema mostrado Figura A-1.

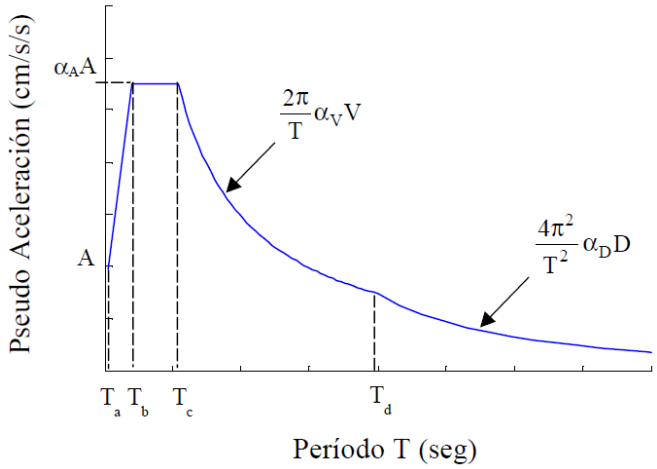


Figura A-1: Espectro norma NCh 2745.

Donde los parámetros A, $\alpha_A A, \alpha_V V, \alpha_D D, T_a, T_b, T_c, T_d, T_e, T_f$ dependen del tipo de suelo, estos se detallan en la siguiente Tabla A-1.

Tabla A-1:Coeficientes espectro de diseño.

Tipo de Suelo	Aceleración cm/seg^2	T_a sec	T_b sec	T_c sec	T_d sec	T_e sec	T_f sec	α_A A cm/seg^2	$\alpha_V V$ cm/seg^2	$\alpha_D D$ cm/seg^2
I	392.4	0.03	0.11	0.29	2.51	10	33	1085	50	20
II	402.21	0.03	0.2	0.54	2	10	33	1100	94	30
III	441.45	0.03	0.375	0.68	1.58	10	33	1212	131	33

Los factores de amplificación sísmica del espectro se definen a partir de la zona sísmica, estos valores se detallan en la Tabla A-2,

Tabla A-2: Coeficientes de Sitio.

Zona Sísmica	Factor Z	Factor M_M
1	0.75	1.2
2	1	1.2
3	1.25	1.2

A.2. Espectro de Diseño para el Modelo Base Fija.

Para el modelo de base fija definimos los siguientes parámetros:

- Zona Sísmica: 3.
- Factor de Amplificación Z 1.25.
- Suelo Tipo III.
- Factor de Reducción R 7.

Los valores del espectro de diseño de la base fija se detallan en la Tabla A-3.

Tabla A-3: Valores del espectro diseño para el espectro de la base fija.

T seg	**Sa** cm/seg^2	**T** seg	**Sa** cm/seg^2	**T** seg	**Sa** cm/seg^2	**T** seg	**Sa** cm/seg^2
0.03	94.60	0.95	185.66	1.95	73.42	3.00	31.02
0.05	104.17	1.00	176.38	2.00	69.79	3.50	22.79
0.10	128.10	1.05	167.98	2.05	66.43	4.00	17.45
0.15	152.03	1.10	160.34	2.10	63.30	4.50	13.79
0.20	175.96	1.15	153.37	2.15	60.39	5.00	11.17
0.25	199.89	1.20	146.98	2.20	57.68	5.50	9.23
0.30	223.82	1.25	141.10	2.25	55.14	6.00	7.75
0.35	247.75	1.30	135.68	2.30	52.77	6.50	6.61
0.38	259.71	1.35	130.65	2.35	50.55	7.00	5.70
0.40	259.71	1.40	125.98	2.40	48.47	7.50	4.96
0.45	259.71	1.45	121.64	2.45	46.51	8.00	4.36
0.50	259.71	1.50	117.59	2.50	44.67	8.50	3.86
0.55	259.71	1.55	113.79	2.55	42.93	9.00	3.45
0.60	259.71	1.58	111.63	2.60	41.30	9.50	3.09
0.65	259.71	1.60	109.05	2.65	39.75	10.00	2.79
0.68	259.71	1.65	102.54	2.70	38.29	15.00	1.24
0.70	251.97	1.70	96.60	2.75	36.91	20.00	0.70
0.75	235.17	1.75	91.16	2.80	35.61	25.00	0.45
0.80	220.47	1.80	86.16	2.85	34.37	30.00	0.31
0.85	207.50	1.85	81.57	2.90	33.19		
0.90	195.98	1.90	77.33	2.95	32.08		

A.3. Espectro de Diseño para el Modelo Base Aislada.

Para el modelo de base aislada definimos los siguientes parámetros:

- Zona Sísmica: 3.
- Factor de Amplificación Z 1.25.
- Suelo Tipo III.
- Factor de Reducción R 1.

Los valores del espectro de diseño de la base aislada se detallan en la Tabla A-4.

Tabla A-4: Valores del espectro diseño para el espectro de la base aislada

T seg	**Sa** cm/seg^2	**T** seg	**Sa** cm/seg^2	**T** seg	**Sa** cm/seg^2	**T** seg	**Sa** cm/seg^2
0.03	551.81	0.95	1083.02	1.95	428.27	3.00	180.94
0.05	607.65	1.00	1028.87	2.00	407.12	3.50	132.94
0.10	747.24	1.05	979.88	2.05	387.50	4.00	101.78
0.15	886.83	1.10	935.34	2.10	369.27	4.50	80.42
0.20	1026.43	1.15	894.67	2.15	352.30	5.00	65.14
0.25	1166.02	1.20	857.39	2.20	336.46	5.50	53.83
0.30	1305.61	1.25	823.10	2.25	321.68	6.00	45.24
0.35	1445.20	1.30	791.44	2.30	307.84	6.50	38.54
0.38	1515.00	1.35	762.13	2.35	294.88	7.00	33.23
0.40	1515.00	1.40	734.91	2.40	282.72	7.50	28.95
0.45	1515.00	1.45	709.57	2.45	271.30	8.00	25.45
0.50	1515.00	1.50	685.91	2.50	260.56	8.50	22.54
0.55	1515.00	1.55	663.79	2.55	250.44	9.00	20.10
0.60	1515.00	1.58	651.18	2.60	240.90	9.50	18.04
0.65	1515.00	1.60	636.13	2.65	231.90	10.00	16.28
0.68	1515.00	1.65	598.16	2.70	223.39	15.00	7.24
0.70	1469.82	1.70	563.49	2.75	215.34	20.00	4.07
0.75	1371.83	1.75	531.75	2.80	207.71	25.00	2.61
0.80	1286.09	1.80	502.62	2.85	200.49	30.00	1.81
0.85	1210.44	1.85	475.82	2.90	193.64		
0.90	1143.19	1.90	451.10	2.95	187.13		

ANEXO B: MARCO TEORICO DE LOS METODOS DE ANALISIS

B-1 Método Análisis Modal Espectral.

El análisis modal espectral consiste en solucionar la ecuación de movimiento en el tiempo de forma aproximada. Esta solución se detalla a continuación: La Ecuación de movimiento para un movimiento en la dirección x:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = -M\iota_x\ddot{u}_g$$

El análisis modal consiste en hacer un cambio de variable $u(t) = \Phi\, q(t)$, sustituyendo en la ecuación de movimiento tenemos:

$$M\,\Phi\,\ddot{q}(t) + C\,\Phi\,\dot{q}(t) + K\,\Phi\,q(t) = -M\iota_x\ddot{u}_g$$

Multiplicando por Φ^T:

$$\Phi^T\,M\,\Phi\,\ddot{q}(t) + \Phi^T\,C\,\Phi\,\dot{q}(t) + \Phi^T\,K\,\Phi\,q(t) = -\Phi^T M\iota_x\ddot{u}_g$$

La ecuación de movimiento puede ser escrita para un modo n:

$$\Phi_{\mathrm{n}}^T\,M\,\Phi_{\mathrm{n}}\,\ddot{q_n}(t) + \Phi_{\mathrm{n}}^T\,C\,\Phi_{\mathrm{n}}\,\dot{q_n}(t) + \Phi_{\mathrm{n}}^T\,K\,\Phi_{\mathrm{n}}\,q_n(t) = -\Phi_{\mathrm{n}}^T M\iota_x\ddot{u}_g$$

Si sustituimos $M_n = \Phi_{\mathrm{n}}^T\,M\,\Phi_{\mathrm{n}}$, $K_n = \Phi_{\mathrm{n}}^T\,K\,\Phi_{\mathrm{n}}$, $C_n = \Phi_{\mathrm{n}}^T\,C\,\Phi_{\mathrm{n}}$, $L_{nx} = \Phi^T M\iota_x$ la ecuación se escribe:

$$M_n\,\ddot{q_n}(t) + C_n\,\dot{q_n}(t) + \mathrm{K_n}\,q_n(t) = -L_{nx}\ddot{u}_g$$

Dividiendo por M_n:

$$\ddot{q_n}(t) + 2\xi\,\omega_n\,\dot{q}_n(t) + \omega_{\mathrm{n}}^2\,q_n(t) = -\Gamma_{nx}\ddot{u}_g$$

Haciendo un nuevo cambio de variable $q_n(t) = \Gamma_{nx}D_n(t)$ la ecuación de movimiento se convierte en un sistema de un grado de libertad con una respuesta $D_n(t)$ que varía en el tiempo:

$$\ddot{D_n}(t) + 2\xi\,\omega_n\,\dot{D_n}(t) + \omega_{\mathrm{n}}^2\,D_n(t) = -\Gamma_{nx}\ddot{u}_g$$

El análisis modal espectral consiste en conocer la respuesta del sistema de un grado de libertada para el Desplazamiento máximo $D_{n\,max} = S_{dn}$, el desplazamiento máximo es obtenido usando el espectro de respuesta de desplazamiento asociado a una frecuencia ω, Para un sistema de un grado de libertad en vibración libre sin amortiguamiento la aceleración máxima se define como ω^2 veces el desplazamiento máximo por lo que se define que el espectro Pesudo aceleración $S_{an} = \omega_n^2\, S_{dn}$, valor que se obtiene del espectro de diseño, por lo que las respuestas máximas se obtienen:

Desplazamiento máximo: $u_n = \phi_n q_n = \phi_n \Gamma_{nx} S_{dn}$

Fuerza lateral máxima: $f_{sn} = K u_n = M \phi_n \Gamma_{nx} \omega_n^2 S_{dn}$

Cortante basal máximo: $V_{bnx} = L_{nx} \Gamma_{nx} \omega_n^2 S_{dn}$

Sin embargo la respuesta máxima para cada modo no ocurre en el mismo tiempo por lo que se emplea diferentes metodologías para estimar la respuesta máxima, entre los métodos más empleados para estimara la respuesta esta: el método SRSS Square root of sum of squares y el método CQC Complete quadratic combination, las respuestas r_o se detallan:

Método SRSS, la respuesta r_o se calcula:

$$r_o = \sqrt{\sum_n r_{no}^2}$$

Método CQC, la respuesta r_o se calcula:

$$r_o = \left(\sum_i^r \sum_j^r \rho_{ij}\, r_{io} r_{jo} \right)^{1/2}$$

$$\rho_{ij} = \frac{8\zeta^2 \beta^{3/2}}{(1+\beta)(1-\beta)^2 + 4\zeta^2 \beta (1+\beta)}; \quad r = \frac{T_i}{T_j}$$

B-2 Método de Análisis FNA.

Este método de análisis modal no lineal fue propuesto por Wilson (2002), método conocido como análisis rápido no lineal o FNA, el método se describe:
La ecuación de movimiento de un sistema para fuerzas no lineales se expresa como:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) - F_{NL}(\dot{u}, u, t) = -M\iota_x\ddot{u}_g$$

Haciendo un análisis modal y haciendo un cambio de variable $u(t) = \Phi\, q(t)$, escribimos por comodidad $q = q(t)$ la ecuación de movimiento se escribe:

$$M\,\Phi\,\ddot{q} + C\,\Phi\,\dot{q} + K\,\Phi\,q - F_{NL}(\Phi\,\dot{q}, \Phi\,q, t) = -M\iota_x\ddot{u}_g$$

Multiplicando por Φ^T:

$$\Phi^T M\,\Phi\,\ddot{q} + \Phi^T C\,\Phi\,\dot{q} + \Phi^T K\,\Phi\,q - \Phi^T F_{NL}(\Phi\,\dot{q}, \Phi\,q, t) = -\Phi^T M\iota_x\ddot{u}_g$$

Considerando no linealidad independiente de la velocidad de los grados de libertad y considerando la rigidez tangente para un tiempo determinado, las fuerzas no lineales pueden expresarse como una perturbación de la matriz de rigidez, rescribiendo la ecuación anterior:

$$\Phi^T M\,\Phi\,\ddot{q} + \Phi^T C\,\Phi\,\dot{q} + (\Phi^T K\,\Phi\,q - \Phi^T \Delta\,K\,\Phi\,q) = -\Phi^T M\iota_x\ddot{u}_g$$

Considerando formas modales basadas en el problema lineal, se definirá como ϕ_s los modos escogidos para representar la respuesta y ϕ_u los modos descartados, de tal forma que $\Phi = [\phi_s, \phi_u]$, $q = [q_s, q_u]$ bajo este esquema escribimos la ecuación de movimiento:

$$\begin{bmatrix} \Phi_s^T M\,\Phi_s & \Phi_s^T M\,\Phi_u \\ \Phi_u^T M\,\Phi_s & \Phi_u^T M\,\Phi_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_s \\ \ddot{q}_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Phi_s^T C\,\Phi_s & \Phi_s^T C\,\Phi_u \\ \Phi_u^T C\,\Phi_s & \Phi_u^T C\,\Phi_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_s \\ \dot{q}_u \end{bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} \Phi_s^T K\,\Phi_s & \Phi_s^T K\,\Phi_u \\ \Phi_u^T K\,\Phi_s & \Phi_u^T K\,\Phi_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_s \\ q_u \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Phi_s^T \Delta K\,\Phi_s & \Phi_s^T \Delta K\,\Phi_u \\ \Phi_u^T \Delta K\,\Phi_s & \Phi_u^T \Delta K\,\Phi_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_s \\ q_u \end{bmatrix} \right) = -\begin{bmatrix} \phi_S^T \\ \phi_u^T \end{bmatrix} M\iota_x\ddot{u}_g$$

Por la ortogonalidad de los modos y suponiendo una matriz de amortiguamiento clásica la ecuación de movimiento puede escribirse:

$$\begin{bmatrix} \Phi_s^T M\ \Phi_s & 0 \\ 0 & \Phi_u^T M\ \Phi_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_s \\ \ddot{q}_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Phi_s^T C\ \Phi_s & 0 \\ 0 & \Phi_u^T C\ \Phi_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_s \\ \dot{q}_u \end{bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} \Phi_s^T K\ \Phi_s & 0 \\ 0 & \Phi_u^T K\ \Phi_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_s \\ q_u \end{bmatrix} - \right.$$

$$\left. \begin{bmatrix} \Phi_s^T \Delta K\ \Phi_s & \Phi_s^T \Delta K\ \Phi_u \\ \Phi_u^T \Delta K\ \Phi_s & \Phi_u^T \Delta K\ \Phi_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_s \\ q_u \end{bmatrix} \right) = - \begin{bmatrix} \phi_S^T \\ \phi_u^T \end{bmatrix} M \iota_x \ddot{u}_g$$

Se observa en esta ecuación que el acoplamiento entre los modos seleccionados y los modos descartados para aproximar la respuesta no lineal vienen dado únicamente por lo términos $\Phi_s^T \Delta K\ \Phi_u$ de la perturbación de la matriz de rigidez. Se deduce de esta condición que una buena elección de formas modales ϕ_s debe ser de tal forma que se satisfaga que $\Phi_u^T \Delta K\ \Phi_u = 0$, $\Phi_s^T \Delta K\ \Phi_u = 0$ y $\Phi_u^T \Delta K\ \Phi_s = 0$ lo que implica que la respuesta de los modos descartados no se ve afectada por el comportamiento no lineal de los elementos que el resto de la ecuación es suficiente para representar la respuesta. Además de lo anterior es importante tener en cuenta que los mismos criterios usados para el caso lineal para estimar una selección de formas modales donde los modos despreciados no influirán de manera significativa en la respuesta. Típicamente se considera que las formas modales son adecuadas si poseen un porcentaje de participación de masas modal acumulada al 100%, por lo que esta metodología es usual determinar los modos usando vectores Ritz.

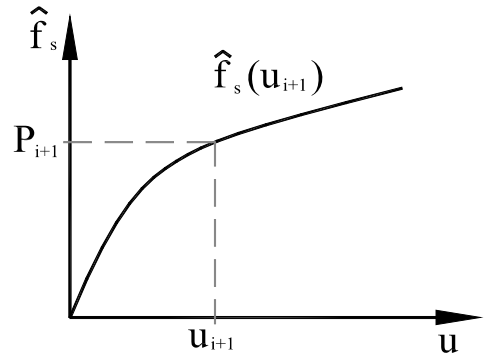
B-3 Método de Análisis Integración Directa.

La solución numérica del análisis tiempo historia no lineal basada en el método de integración de Newmark aceleración constante para $\gamma = \frac{1}{2}$; $\beta = \frac{1}{4}$, con iteraciones Newton Raphson, se detalla en las siguientes ecuaciones:

Para estimar el desplazamiento u_{i+1}, definimos la ecuación de movimiento para un tiempo $i + 1$, dado un vector de fuerzas externas P_{i+1}

$$M\ddot{u}_{i+1} + C\dot{u}_{i+1} + f_s(u_{i+1}) = P_{i+1}$$

Donde las fuerzas resistentes $\hat{f}_s(u_{i+1})$ se definen:



$$\hat{f}_s(u_{i+1}) = P_{i+1}$$

Para conocer las fuerzas resistentes $\hat{f}_s(u_{i+1})$ del sistema, se realiza una aproximación en serie de Taylor en torno al desplazamiento conocido en el tiempo i y primera estimación del desplazamiento para el tiempo $i+1$, $u_{i+1}^{(0)}$,

$$\hat{f}_s(u_{i+1}) \approx (\hat{f}_s)_{i+1}^{(0)} + (\hat{K}_t)_{i+1}^{(0)}(u_{i+1}, - u_{i+1}^{(0)},)$$

Si definimos como: $\Delta u_{i+1}^{(0)} = (u_{i+1}, - u_{i+1}^{(0)},)$ escribimos que:

$$\hat{f}_s(u_{i+1}) = P_{i+1}$$

$$(\hat{f}_s)_{i+1}^{(0)} + (\hat{K}_t)_{i+1}^{(0)} \Delta u_{i+1}^{(0)} = P_{i+1}$$

Que para un incremento de carga, definimos el incremento de desplazamiento $\Delta u_{i+1}^{(0)}$:

$$\Delta u_{i+1}^{(0)} = \left[(\hat{K}_t)_{i+1}^{(0)}\right]^{-1} \left[P_{i+1} - (\hat{f}_s)_{i+1}^{(0)}\right]$$

Donde se define el residual de las fuerzas $\hat{R}^{(0)} = \left[P_{i+1} - (\hat{f}_s)_{i+1}^{(0)}\right]$, los términos se calculan como:

$$(\hat{K}_t)_{i+1}^{(0)} = \frac{\partial \hat{f}_s}{\partial u_{i+1}} = a_1 + (k_i)_{i+1}^{(0)}$$

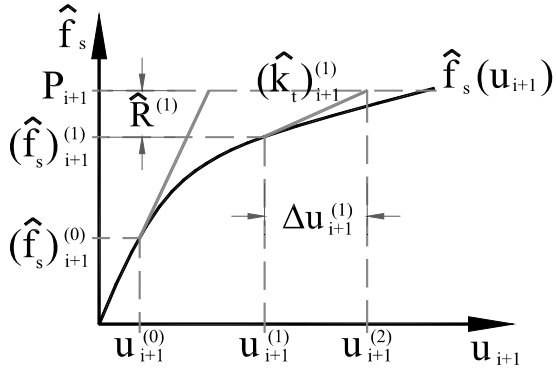
$$\hat{R}^{(0)} = \hat{P}_{i+1} - a_i u_{i+1}^{(0)} - (f_s)_{i+1}^{(0)}$$

Donde:

$$\hat{P}_{i+1} = P_{i+1} + a_1 u_i + a_2 \dot{u}_i + M\ddot{u}_i; \quad a_1 = \frac{4}{\Delta t^2} M + \frac{2}{\Delta t} C; \quad a_2 = \frac{4}{\Delta t} M + C$$

Las fuerzas y rigidez del elemento $(f_s)_{i+1}^{(0)}, (k_i)_{i+1}^{(0)}$, se determinan para cada estado $u_{i+1}^{(0)}$

El objetivo será obtener para cada paso de tiempo un $\hat{R}^{(0)} \approx 0$, por lo es necesario realizar iteraciones de Newton-Raphson, el proceso lo describe la siguiente figura:



Las expresiones se definen:

$$\hat{R}^{(j)} = \hat{P}_{i+1} - a_i u_{i+1}^{(j)} - (f_s)_{i+1}^{(j)}$$

$$\Delta u_{i+1}^{(j)} = \left[(\hat{K}_t)_{i+1}^{(j)}\right]^{-1} \hat{R}^{(j)}$$

$$u_{i+1}^{(j+i)} = u_{i+1}^{(j)} + \Delta u_{i+1}^{(j)}$$

Para cada iteración $u_{i+1}^{(j)}$ se requiere calcular el estado $(f_s)_{i+1}^{(j)}, (k_i)_{i+1}^{(j)}$, cuando $\hat{R}^{(j)} \approx 0$, se deberá calcular la velocidad y aceleración en el siguiente paso de tiempo:

$$\dot{u}_{i+1} = \frac{2}{\Delta t}(u_{i+1} - u_i) - \dot{u}_i$$

$$\ddot{u}_{i+1} = \frac{2}{\Delta t}(u_{i+1} - u_i) - \frac{4}{\Delta t}\dot{u}_i - \ddot{u}_i$$

B-4 Amortiguamiento tipo Rayleigh.

La matriz de amortiguamiento $\boldsymbol{C}$ de tipo clásico puede ser definida a partir del amortiguamiento tipo Rayleigh, tal como se define:

$$C = \alpha M + \beta K$$

Donde las términos αM llamado coeficiente de masa proporcional donde la constante α de unidades sec^{-1}, y el termino βK coeficiente proporcional a la rigidez inicia donde la constante β de unidades sec.

El factor de amortiguamiento modal ζ_n puede ser calculado para una frecuencia ω_n:

$$\zeta_n = \frac{\alpha}{2}\frac{1}{\omega_n} + \frac{\beta}{2}\omega_n$$

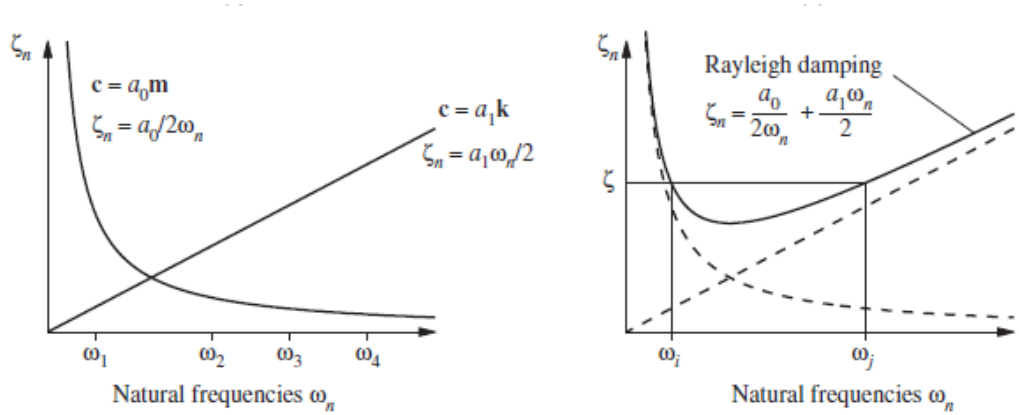
Los coeficientes α y β pueden ser determinados a partir de diferentes factores de amortiguamiento ζ_i y ζ_j para los modos i y j respectivamente. Esto puede ser demostrado en la siguiente expresión:

$$\frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1/\omega_i & \omega_i \\ 1/\omega_j & \omega_j \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \zeta_i \\ \zeta_j \end{Bmatrix}$$

Si se asume un mimo factor amortiguamiento ζ para dos modos las constantes pueden ser calculadas como:

$$\alpha = \zeta\frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j}; \quad \beta = \frac{\zeta 2}{\omega_i + \omega_j}$$

La variación del factor de amortiguamiento en función de la frecuencia natural puede ser representada en la siguiente figura:



ANEXO C: MODOS DE VIBRACION DE LOS MODELOS BASE FIJA.

A continuación se detallan los modos de vibración y factores de participación dinámica correspondientes a los cuatro modelos de base fija.

Tabla C-1: Modos de vibración y factores de participación del modelo 1 base fija.

Modo	Periodo Sec	Factor Part. UX	Factor Part. UY	Suma F. Part. UX	Suma F. Part. UY
1	0.968	0.000	0.677	0.000	0.677
2	0.825	0.003	0.000	0.003	0.677
3	0.688	0.701	0.000	0.704	0.677
4	0.246	0.000	0.167	0.704	0.845
5	0.228	0.001	0.000	0.705	0.845
6	0.196	0.154	0.000	0.859	0.845
7	0.115	0.000	0.004	0.859	0.849
8	0.112	0.000	0.054	0.859	0.902
9	0.109	0.001	0.001	0.860	0.903
10	0.102	0.006	0.000	0.866	0.903
11	0.096	0.044	0.000	0.910	0.903
12	0.092	0.000	0.002	0.910	0.904
13	0.091	0.002	0.000	0.911	0.904
14	0.074	0.000	0.000	0.911	0.905
15	0.069	0.000	0.029	0.912	0.934
16	0.068	0.002	0.001	0.914	0.934
17	0.065	0.009	0.000	0.923	0.934
18	0.064	0.000	0.000	0.923	0.934
19	0.062	0.013	0.000	0.936	0.934
20	0.060	0.000	0.001	0.936	0.935

Tabla C-2: Modos de vibración y factores de participación del modelo 2 base fija.

Modo	Periodo Sec	Factor Part. UX	Factor Part. UY	Suma F. Part. UX	Suma F. Part. UY
1	0.952	0.000	0.679	0.000	0.679
2	0.801	0.002	0.000	0.002	0.679
3	0.678	0.704	0.000	0.706	0.679
4	0.242	0.000	0.168	0.706	0.848
5	0.224	0.001	0.000	0.707	0.848
6	0.194	0.154	0.000	0.862	0.848
7	0.114	0.000	0.002	0.862	0.849
8	0.111	0.000	0.055	0.862	0.905
9	0.108	0.001	0.000	0.862	0.905
10	0.101	0.005	0.000	0.868	0.905
11	0.095	0.044	0.000	0.912	0.905
12	0.091	0.000	0.002	0.912	0.907
13	0.090	0.002	0.000	0.914	0.907

Modo	Periodo Sec	Factor Part. UX	Factor Part. UY	Suma F. Part. UX	Suma F. Part. UY
14	0.073	0.000	0.001	0.914	0.907
15	0.068	0.000	0.029	0.914	0.936
16	0.067	0.002	0.001	0.916	0.936
17	0.064	0.012	0.000	0.928	0.936
18	0.063	0.000	0.000	0.928	0.937
19	0.060	0.011	0.000	0.939	0.937
20	0.058	0.000	0.000	0.939	0.937

Tabla C-3: Modos de vibración y factores de participación del modelo 3 base fija.

Modo	Periodo Sec	Factor Part. UX	Factor Part. UY	Suma F. Part. UX	Suma F. Part. UY
1	0.913	0.000	0.684	0.000	0.684
2	0.749	0.000	0.000	0.000	0.684
3	0.644	0.712	0.000	0.712	0.684
4	0.233	0.000	0.171	0.712	0.855
5	0.213	0.000	0.000	0.712	0.855
6	0.185	0.158	0.000	0.870	0.855
7	0.114	0.000	0.000	0.870	0.855
8	0.107	0.000	0.056	0.870	0.911
9	0.104	0.000	0.000	0.870	0.911
10	0.099	0.004	0.000	0.875	0.911
11	0.091	0.043	0.000	0.918	0.911
12	0.089	0.000	0.002	0.918	0.913
13	0.087	0.003	0.000	0.921	0.913
14	0.071	0.000	0.001	0.921	0.914
15	0.066	0.000	0.028	0.921	0.942
16	0.065	0.001	0.000	0.922	0.943
17	0.061	0.022	0.000	0.944	0.943
18	0.057	0.000	0.000	0.944	0.943
19	0.055	0.002	0.000	0.946	0.943
20	0.054	0.000	0.000	0.946	0.943

Tabla B-4: Modos de vibración y factores de participación del modelo 4 base fija.

Modo	Periodo Sec	Factor Part. UX	Factor Part. UY	Suma F. Part. UX	Suma F. Part. UY
1	1.048	0.000	0.714	0.000	0.714
2	0.860	0.051	0.000	0.051	0.714
3	0.743	0.687	0.000	0.738	0.714
4	0.292	0.000	0.159	0.738	0.873
5	0.253	0.007	0.000	0.746	0.873

Modo	Periodo Sec	Factor Part. UX	Factor Part. UY	Suma F. Part. UX	Suma F. Part. UY
6	0.224	0.140	0.000	0.885	0.873
7	0.143	0.000	0.053	0.885	0.926
8	0.129	0.001	0.000	0.887	0.926
9	0.116	0.045	0.000	0.931	0.926
10	0.115	0.000	0.000	0.931	0.926
11	0.102	0.002	0.000	0.933	0.926
12	0.095	0.000	0.013	0.933	0.938
13	0.093	0.000	0.000	0.933	0.938
14	0.089	0.000	0.015	0.933	0.953
15	0.083	0.001	0.000	0.934	0.953
16	0.077	0.023	0.000	0.956	0.953
17	0.076	0.000	0.000	0.956	0.953
18	0.067	0.000	0.011	0.956	0.964
19	0.065	0.000	0.005	0.956	0.969

ANEXO D: RESUTADOS DEL ANALISIS DEL SISTEMA AISLADO

Anexo D.1 Distribución de la carga gravitacional por apoyo para el sistema aislado.

Tabla D-1: Cargas Gravitacionales sistema aislado en la base.

Aislador	Modelo 1 tonf	Modelo 2 tonf	Modelo 3 tonf	Modelo 4 tonf	Promedio tonf
1	278	284	323	288	293
2	438	439	413	430	430
3	272	272	273	264	270
4	455	457	434	440	446
5	265	269	289	279	276
6	432	436	404	509	445
7	381	374	358	320	358
8	240	237	270	310	264
9	267	265	248	204	246
10	439	434	418	408	425
11	399	399	387	404	397
12	315	321	344	360	335
13	338	343	362	362	351
14	390	391	381	401	391
15	362	355	343	264	331
16	309	303	270	374	314
17	306	298	259	258	280
18	222	224	306	264	254
19	175	179	246	213	203
20	432	428	406	433	425
21	380	374	361	268	346
22	480	483	444	449	464
23	450	453	416	317	409
24	224	223	307	263	254
25	338	342	361	362	351
26	395	397	387	402	395
27	397	396	385	406	396
28	331	339	363	364	349
29	377	369	353	319	354
30	241	238	270	309	264
31	276	274	257	204	253
32	429	423	405	404	415
33	424	426	396	507	438
34	271	277	315	285	287
35	434	435	408	428	426
36	258	258	259	260	259
37	437	437	415	436	431
38	262	267	285	278	273
Peso Total	**13118**	**13118**	**13123**	**13045**	**13101**
Peso Prom	**345**	**345**	**345**	**343**	**345**
Peso Max	**480**	**483**	**444**	**509**	**479**
Peso Min	**175**	**179**	**246**	**204**	**201**

Anexo D.2 Modos de Vibración y factores de participación modal del modelo base aislada tipo lineal.

Tabla D-2: Modos de vibración y factores de participación, Modelo 1 base aislada lineal.

Modo	Periodo Sec	Factor Particip. UX	Factor Particip. UY	Factor Particip. UZ	Suma F. Particp UX	Suma F. Particp UY	Suma F. Particp UZ
1	3.016	0.000	0.997	0.000	0.000	0.997	0.000
2	2.948	0.999	0.000	0.000	0.999	0.997	0.000
3	2.781	0.000	0.000	0.000	0.999	0.997	0.000
4	0.596	0.000	0.003	0.000	0.999	1.000	0.000
5	0.486	0.000	0.000	0.000	0.999	1.000	0.000
6	0.418	0.001	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000
7	0.188	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000
8	0.178	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000
9	0.149	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000
10	0.126	0.000	0.000	0.864	1.000	1.000	0.864
11	0.105	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.864
12	0.101	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.864
13	0.093	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.865
14	0.071	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.865
15	0.061	0.000	0.000	0.006	1.000	1.000	0.871
16	0.052	0.000	0.000	0.037	1.000	1.000	0.907
17	0.042	0.000	0.000	0.041	1.000	1.000	0.948
18	0.037	0.000	0.000	0.012	1.000	1.000	0.960
19	0.023	0.000	0.000	0.032	1.000	1.000	0.992
20	0.019	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.992

Tabla D-3: Modos de vibración y factores de participación, Modelo 2 base aislada lineal.

Modo	Periodo Sec	Factor Particip. UX	Factor Particip. UY	Factor Particip. UZ	Suma F. Particp UX	Suma F. Particp UY	Suma F. Particp UZ
1	3.006	0.000	0.997	0.000	0.000	0.997	0.000
2	2.944	0.999	0.000	0.000	0.999	0.997	0.000
3	2.774	0.000	0.000	0.000	0.999	0.997	0.000
4	0.581	0.000	0.003	0.000	0.999	1.000	0.000
5	0.468	0.000	0.000	0.000	0.999	1.000	0.000
6	0.408	0.001	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000
7	0.184	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000
8	0.174	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000
9	0.146	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000
10	0.124	0.000	0.000	0.852	1.000	1.000	0.853
11	0.101	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.853
12	0.096	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.853
13	0.088	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.853
14	0.065	0.000	0.000	0.002	1.000	1.000	0.855
15	0.053	0.000	0.000	0.031	1.000	1.000	0.886

Modo	Periodo Sec	Factor Particip. UX	Factor Particip. UY	Factor Particip. UZ	Suma F. Particp UX	Suma F. Particp UY	Suma F. Particp UZ
16	0.049	0.000	0.000	0.005	1.000	1.000	0.892
17	0.042	0.000	0.000	0.052	1.000	1.000	0.944
18	0.031	0.000	0.000	0.007	1.000	1.000	0.950
19	0.024	0.000	0.000	0.035	1.000	1.000	0.986
20	0.017	0.000	0.000	0.003	1.000	1.000	0.989

Tabla D-4: Modos de vibración y factores de participación, Modelo 3 base aislada lineal.

Modo	Periodo Sec	Factor Particip. UX	Factor Particip. UY	Factor Particip. UZ	Suma F. Particp UX	Suma F. Particp UY	Suma F. Particp UZ
1	2.987	0.000	0.998	0.000	0.000	0.998	0.000
2	2.936	0.999	0.000	0.000	0.999	0.998	0.000
3	2.772	0.000	0.000	0.000	0.999	0.998	0.000
4	0.549	0.000	0.002	0.000	0.999	1.000	0.000
5	0.435	0.000	0.000	0.000	0.999	1.000	0.000
6	0.387	0.001	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000
7	0.175	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000
8	0.165	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000
9	0.139	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000
10	0.120	0.000	0.000	0.833	1.000	1.000	0.833
11	0.100	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.833
12	0.093	0.000	0.000	0.002	1.000	1.000	0.835
13	0.088	0.000	0.000	0.001	1.000	1.000	0.836
14	0.065	0.000	0.000	0.001	1.000	1.000	0.837
15	0.055	0.000	0.000	0.002	1.000	1.000	0.839
16	0.051	0.000	0.000	0.040	1.000	1.000	0.879
17	0.040	0.000	0.000	0.001	1.000	1.000	0.880
18	0.037	0.000	0.000	0.063	1.000	1.000	0.942
19	0.020	0.000	0.000	0.021	1.000	1.000	0.963
20	0.019	0.000	0.000	0.020	1.000	1.000	0.983

Tabla D-5: Modos de vibración y factores de participación, Modelo 4 base aislada lineal.

Modo	Periodo Sec	Factor Particip. UX	Factor Particip. UY	Factor Particip. UZ	Suma F. Particp UX	Suma F. Particp UY	Suma F. Particp UZ
2	2.961	0.999	0.000	0.000	0.999	0.996	0.000
3	2.784	0.000	0.000	0.000	0.999	0.996	0.000
4	0.617	0.000	0.004	0.000	0.999	1.000	0.000
5	0.491	0.000	0.000	0.000	0.999	1.000	0.000
6	0.462	0.001	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000
7	0.220	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000
8	0.192	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000

Modo	Periodo Sec	Factor Particip. UX	Factor Particip. UY	Factor Particip. UZ	Suma F. Particp UX	Suma F. Particp UY	Suma F. Particp UZ
9	0.175	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000
10	0.126	0.000	0.000	0.820	1.000	1.000	0.820
11	0.123	0.000	0.000	0.033	1.000	1.000	0.853
12	0.109	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.853
13	0.098	0.000	0.000	0.002	1.000	1.000	0.855
14	0.075	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.855
15	0.064	0.000	0.000	0.007	1.000	1.000	0.862
16	0.056	0.000	0.000	0.001	1.000	1.000	0.864
17	0.048	0.000	0.000	0.072	1.000	1.000	0.936
18	0.036	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.936
19	0.027	0.000	0.000	0.047	1.000	1.000	0.982
20	0.019	0.000	0.000	0.001	1.000	1.000	0.983