

**COMPARACIÓN DEL USO DE AISLADORES DE BASE ELASTOMÉRICOS EN
PUENTES CURVOS DE CONCRETO.
CASO DE ESTUDIO: INTERCAMBIADOR VIAL REINA DE LA PAZ.**



DAISY GÓMEZ ORTIZ

WBISLLEY JARAMILLO CASAS



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2013

**COMPARACIÓN DEL USO DE AISLADORES DE BASE ELASTOMÉRICOS EN
PUENTES CURVOS DE CONCRETO.
CASO DE ESTUDIO: INTERCAMBIADOR VIAL REINA DE LA PAZ.**

DAISY GÓMEZ ORTIZ

WBISLLEY JARAMILLO CASAS

Trabajo de grado modalidad Investigativa

Para optar al título de:

Ingeniero civil

DIRECTOR

LEOCADIO RICO PRADILLA

Ingeniero Civil

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2013

A Dios por qué ser mi guía espiritual y mi fortaleza en el transcurso de mi carrera profesional, por brindarme sabiduría, entendimiento y dedicación para culminar esta etapa de mi vida.

A mis padres Luis Fernando y Luz Mila por su apoyo incondicional, por su compañía, sus sacrificios, por darme la oportunidad de formarme profesionalmente y sobre todo por brindarme el empuje para seguir adelante con mis sueños.

A mis hermanos Leidy y Luis Fernando, a mis abuelos Rosalba y Juvenal y a Mayra Alejandra por el cariño y por ser parte importante de mi vida y desarrollo profesional, en especial a mi hermana Leidy por ser mi amiga, mi cómplice y mi compañera.

A mis amigos y compañeros Lina Marcela, Derly Estefanny, Homer Buelvas, Yulieth Aguas y demás compañeros que de alguna u otra manera formaron parte de este ciclo de mi vida, por el aprendizaje y por los buenos momentos vividos.

Daisy Gómez Ortiz

Agradezco a Dios quien ha estado presente en cada aspecto de mi vida

*A mi madre y a mi padre pues por ellos es que me encuentro aquí y ahora gracias a su
esfuerzo y dedicación*

A mi hermana quien ha sido un apoyo incondicional

A mi hermano que es el motor que mueve mis metas

Al profesor Leocadio Rico Pradilla que apostó por nosotros

A mi compañera de proyecto que supo aguantarme hasta el final

*Y a todas aquellas demás personas que de una forma u otra contribuyeron al desarrollo de
de mi persona o han sido fuente de inspiración*

Whisley Jaramillo Casas

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	20
OBJETIVOS.....	21
1. DEFINICIÓN DEL AISLAMIENTO DE BASE	22
1.1. Generalidades	22
1.2. Clasificación.....	24
1.2.1. Aisladores elastoméricos	25
1.2.1.1. Aisladores Elastoméricos de Bajo Amortiguamiento “Low Damping Rubber Bearing” (LDRB).....	26
1.2.1.2. Aisladores Elastoméricos de Alto Amortiguamiento “High Damping Rubber Bearings” (HDRB)	26
1.2.1.3. Aisladores Elastoméricos con Núcleo de Plomo “Lead Rubber Bearings” (New Zeland Bearing System) (LRB).....	27
2. DESCRIPCIÓN Y MODELAMIENTO DEL INTERCAMBIADOR VIAL VIA PALENQUE – FLORIDABLANCA (REINA DE LA PAZ)	29
2.1. Geometría.....	29
2.2. Modelamiento del Puente Vehicular Reina de la Paz en Sap2000.....	32
3. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS Y MODELAMIENTO DE LOS AISLADORES DE BASE	35
3.1. Introducción	35
3.2. Parámetros del modelo bilineal.....	36
3.3. Cargas permanentes sobre los aisladores.....	39
3.4. Modelo Bilineal de los Aisladores Elastoméricos con Núcleo de Plomo (LRB)	40
3.5. Modelo Bilineal de los Aisladores de Alto Amortiguamiento (HDRB).....	41

4.	DEFINICIÓN DE LA ACCIÓN SÍSMICA.....	44
4.1.	Descripción Análisis de historias en el tiempo	44
4.2.	Descripción Análisis Modal Espectral	46
4.3.	Descripción del Espectro Elástico de Respuesta según el CCDSP	46
	Figura 13. Espectro de Diseño para Bucaramanga Según CCDSP-95.	48
4.4.	Zonificación Sismogeotécnica Indicativa	48
4.5.	Descripción Familia de Acelerogramas.....	49
5.	ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	52
5.1.	Generalidades	52
5.2.	Modelo Sin Aislamiento Sísmico.....	53
5.2.1.	Modos de vibración, periodos y frecuencias	53
5.2.2.	Desplazamientos y fuerzas cortantes análisis modal espectral.	54
5.2.3.	Desplazamientos y fuerzas cortantes análisis de historias en el tiempo.....	56
5.3.	Modelo Sin Aislamiento Sísmico vs Modelo Con Aisladores LRB	60
5.3.1.	Periodos y modos de vibración.....	60
5.3.2.	Desplazamientos y Fuerzas cortantes máximos.....	62
5.4.	Modelo Sin Aislamiento Sísmico vs Modelo Con Aisladores HDRB	71
5.4.1.	Periodos y modos de vibración.....	71
5.4.2.	Desplazamientos y Fuerzas cortantes máximos.....	73
5.5.	Modelo con aisladores LBR vs Modelo con aisladores HDRB.....	82
5.5.1.	Modos de vibración, Periodos (LRB vs HDRB).....	82
5.5.2.	Desplazamientos y Fuerzas Cortantes Máximas (LRB vs HDRB)	82
6.	CONCLUSIONES.....	85

7. RECOMENDACIONES	87
8. BIBLIOGRAFÍA	88
9. ANEXOS	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Puente con aislamiento sísmico.	22
Figura 2. Sistema sin aislamiento vs con aislamiento.....	23
Figura 3. Efectos del aislamiento de base, perspectiva desde el espectro de aceleraciones.....	24
Figura 4. Aislador Elastomérico de Goma Laminada.....	26
Figura 5. Aislador Elastomérico de Alto Amortiguamiento (HDRB).....	27
Figura 6. Aislador Elastomérico con Núcleo de Plomo (LRB).....	27
Figura 7. Planta Puente Vial Reina de la Paz y Planta.	30
Figura 8. (a) Alzado y Planta Pila Oriental, (b) Alzado y Planta Pila Occidental. ...	32
Figura 9. Vista tridimensional Puente Reina de la Paz (SAP2000).....	33
Figura 10. Vista en planta Puente Reina de la PAZ (SAP2000).	33
Figura 11. Proyección 3D del Intercambiador Vial Reina De La Paz.	33
Figura 12. Proyección en planta Intercambiador Vial Reina De La Paz.....	34
Figura 13 . Proyección en perfil Intercambiador Vial Reina De La Paz.....	34
Figura 14. (a) Modelo Histerético (b) Modelo Viscoelástico.....	36
Figura 15. Modelo bilineal del aislador.....	37
Figura 16. Espectro de Diseño para Bucaramanga Según CCDSP-95.	48
Figura 17. Acelerogramas de diseño compatibles con el escenario sísmico de la Falla Bucaramanga – Santa Marta.	50
Figura 18. Acelerogramas de diseño compatibles con el escenario sísmico de la Falla Frontal.....	50
Figura 19. Primeros 6 Modos de vibración del modelo sin aislamiento.	54
Figura 20. Desplazamientos para cada pila Modelo Sin Aislamiento análisis modal espectral.	55
Figura 21. Fuerzas Cortantes para cada pila Modelo Sin Aislamiento análisis modal espectral.....	55

Figura 22. Comparación de los desplazamientos máximos en [mm] que produce cada sismo en cada de una de las pilas en dirección longitudinal y transversal del puente sin aisladores.	57
Figura 23. Comparación de las fuerzas cortantes máximos en [KN] que produce cada sismo en cada de una de las pilas en dirección longitudinal y transversal del puente sin aisladores.	59
Figura 24. Modos de vibración 1,2 y 4 del intercambiador Reina de la Paz con aisladores LRB.....	61
Figura 25. Comparación de los desplazamientos máximos en [mm] que produce cada sismo en cada de una de las pilas en dirección longitudinal y transversal del puente con aisladores LRB.	63
Figura 26. Comparación de los cortantes máximos en [KN] que produce cada sismo en cada de una de las pilas en dirección longitudinal y transversal del puente con aisladores LRB.	64
Figura 27. Comparación de desplazamientos longitudinal y transversalmente (Sin aislamiento vs Aisladores LRB).	68
Figura 28. Comparación fuerzas cortantes longitudinal y transversalmente (Sin aislamiento vs Aisladores LRB).	69
Figura 29. Ciclos de histéresis para un aislador LRB en la pila oriental del puente para los sismos en dirección longitudinal.....	70
Figura 30. Modos de vibración 1,2 y 3 del puente con aisladores HDRB.	72
Figura 31. Comparación de los desplazamientos máximos en [mm] que produce cada sismo en cada de una de las pilas en dirección longitudinal y transversal del puente con aisladores HDRB.....	74
Figura 32. Comparación de los cortantes máximos en [KN] que produce cada sismo en cada de una de las pilas en dirección longitudinal y transversal del puente con aisladores HDRB.....	75
Figura 33. Comparación de desplazamientos longitudinal y transversalmente (Sin aislamiento vs Aisladores HDRB).	79

Figura 34. Comparación fuerzas cortantes longitudinal y transversalmente (Sin aislamiento vs Aisladores HDRB).	80
Figura 35. Ciclos de histéresis para un aislador LRB en la pila oriental del puente para los sismos en dirección longitudinal.....	81
Figura 36. Comparación de desplazamientos en dirección longitudinal y transversal (LRB vs HDRB).	83
Figura 37. Comparación de fuerzas cortantes en dirección longitudinal y transversal (LRB vs HDRB).	84
Figura 38. Desplazamientos en dirección longitudinal del puente para las pilas sin aislamiento sísmico.....	91
Figura 39. Comparación de los desplazamientos en dirección longitudinal del puente para las pilas sin aislamiento sísmico vs aisladores LRB.	93
Figura 40. Comparación de los desplazamientos en dirección longitudinal del puente para las pilas sin aislamiento sísmico vs aisladores HDRB.	95

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Longitudes Vigas	31
Tabla 2. Características mecánicas del aislador LRB.....	41
Tabla 3. Características mecánicas del aislador HDRB.....	43
Tabla 4. Modos de vibración, Periodos y Frecuencias Modelo sin aislamiento.	53
Tabla 5. Desplazamientos y Fuerzas Cortantes análisis modal espectral modelo sin aislamiento.	54
Tabla 6. Desplazamientos máximos en dirección longitudinal y transversal del puente sin aisladores en cada pila producida por cada sismo.	56
Tabla 7. Fuerzas Cortantes máximos en dirección longitudinal y transversal del puente sin aisladores en cada pila producida por cada sismo.	58
Tabla 8. Modos de vibración, periodos y frecuencias modelo con aisladores LRB.	60
Tabla 9. Desplazamientos máximos en dirección longitudinal y transversal del puente con aisladores LRB en cada pila producida por cada sismo.	62
Tabla 10. Fuerzas Cortantes máximos en dirección longitudinal y transversal del puente con aisladores LRB en cada pila producida por cada sismo.	63
Tabla 11. Porcentaje de ampliación y/o reducción de los desplazamientos máximos en X (Sin aislamiento vs LRB).	65
Tabla 12. Porcentaje de ampliación y/o reducción de los desplazamientos máximos en dirección transversal en cada pila con aisladores LRB.....	66
Tabla 13. Porcentaje de ampliación y/o reducción de los Cortantes máximos en dirección longitudinal del puente para cada pila con aisladores LRB.	66
Tabla 14. Porcentaje de ampliación y/o reducción de los Cortantes máximos en dirección transversal del puente para cada pila con aisladores LRB.	67
Tabla 15. Comparación de desplazamientos y fuerzas cortantes en dirección longitudinal y transversal del puente (Sin aislamiento vs LRB).....	67

Tabla 16. Modos de vibración, periodos y %de participación de masa del puente con HDRB.....	71
Tabla 17. Desplazamientos máximos en dirección longitudinal y transversal del puente con aisladores HDRB en cada pila producida por cada sismo.....	73
Tabla 18. Fuerzas Cortantes máximos en dirección longitudinal y transversal del puente con aisladores HDRB en cada pila producida por cada sismo.....	74
Tabla 19. Porcentaje de ampliación y/o reducción de los desplazamientos máximos en dirección longitudinal (Sin aislamiento vs HDRB).	76
Tabla 20. Porcentaje de ampliación y/o reducción de los desplazamientos máximos en dirección transversal en cada pila con aisladores HDRB.	77
Tabla 21. Porcentaje de ampliación y/o reducción de los Cortantes máximos en dirección longitudinal del puente para cada pila con aisladores HDRB.	77
Tabla 22. Porcentaje de ampliación y/o reducción de los Cortantes máximos en dirección transversal del puente para cada pila con aisladores HDRB.....	78
Tabla 23. Comparación de desplazamientos y fuerzas cortantes en dirección longitudinal y transversal del puente (Sin aislamiento vs HDRB).....	78
Tabla 24. Comparación modos de vibración y periodos LRB vs HDRB.....	82
Tabla 25. Comparación desplazamientos y fuerzas cortantes máximas en dirección longitudinal y transversal del puente (LRB vs HDRB).	83

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Gráficas de desplazamientos máximos en cada una de las pilas en dirección Longitudinal para cada uno de los sismos.....	91
Anexo B. Gráficas de comparación de desplazamientos máximos en cada una de las pilas con aisladores LRB en dirección Longitudinal para cada uno de los sismos.....	93
Anexo C. Gráficas de comparación de desplazamientos máximos en cada una de las pilas con aisladores HDRB en dirección Longitudinal para cada uno de los sismos.....	95

RESUMEN

TITULO:

COMPARACIÓN DEL USO DE AISLADORES DE BASE ELASTOMÉRICOS EN PUENTES CURVOS DE CONCRETO. CASO DE ESTUDIO: INTERCAMBIADOR VIAL REINA DE LA PAZ.*

AUTORES:

GOMEZ ORTIZ, Daisy
JARAMILLO CASAS, Wbisley**

PALABRAS CLAVES:

AISLAMIENTO SÍSMICO, AISLADORES ELASTOMÉRICOS, MODELO BILINEAL, DEMANDA SÍSMICA.

DESCRIPCIÓN:

El aislamiento de base es un mecanismo que permite reducir la respuesta dinámica de la estructura mediante la separación de la superestructura de los movimientos del suelo o de la subestructura, a través de elementos flexibles que permiten el desplazamiento en dirección horizontal.

Este documento presenta la investigación realizada sobre la reducción de la demanda sísmica en puentes curvos, en este caso para el Intercambiador vial Reina de la Paz, cuando se usan aisladores de base elastoméricos , haciendo una comparación entre sistemas sin aislamiento y sistemas con aislamiento.

Para este caso de estudio se emplearon aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDRB) y aisladores con núcleo plomo (LRB), se definió la geometría del puente y las características mecánicas de cada aislador usando el modelo bilineal y luego se hizo el montaje en el Software SAP2000 del puente sin aislamiento, con aisladores HDRB y con aisladores LRB.

El análisis del Intercambiador vial Reina de la Paz se realizó según el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes de 1995. Se realizó un Análisis Modal Espectral y un Análisis de Historias en el Tiempo para cada modelo del puente.

Los resultados de desplazamientos y fuerzas cortantes en cada modelo se compararon entre sí, evidenciando la importancia de emplear sistemas de aislamiento que mejoren el desempeño de la estructura garantizando la seguridad a la vida y la integridad de la estructura ante cualquier sismo.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Ing. Leocadio Rico Pradilla.

ABSTRACT

TITLE:

COMPARISON OF THE USE OF BASE ELASTOMETRIC ISOLATOR IN CURVED CONCRETE BRIDGES. CASE STUDY: ROAD EXCHANGER "REINA DE LA PAZ"*

AUTHORS:

GOMEZ ORTIZ, Daisy
JARAMILLO CASAS, Wbisley**

KEY WORDS:

SEISMIC ISOLATION, ELASTOMERIC ISOLATORS, BILINEAR MODEL, SEISMIC DEMAND.

DESCRIPTION:

The base isolation is a mechanism that reduces the dynamic response of a structure by separating its superstructure from the movements of the ground or substructure, through flexible elements, which allow a horizontal displacement.

This paper presents the research on reducing seismic demand in curved bridges, in this case for the road exchanger "Reina de la Paz", when using base elastomeric isolators, making a comparison between systems without isolation and with isolation.

For this case study, High Damping Rubber Bearing (HDRB) and Lead Rubber Bearing (LRB), isolators were used. Secondly the bridge geometry and the mechanical properties of each isolator were defined using the bilinear model and finally, the bridge's model without isolation was introduced into the Software SAP2000 with the isolators HDRB and LRB.

The analysis of the road exchanger Reina de la Paz was made according to "Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes de 1995". Moreover, a Modal Spectral Analysis and Time-History Analysis were performed for each model of the bridge.

The results of displacements and shear forces in each model were compared with each other, showing the importance of isolator systems used to improve the performance of the structure to ensure life's safety and the integrity of the structure before any earthquake.

* Research work

** Physical Mechanical Engineering Faculty. School of Civil Engineering. Director: Civil Engineer Leocadio Rico Pradilla.

INTRODUCCIÓN

Es sabido que durante mucho tiempo se ha tratado de encontrar un mecanismo de protección de las construcciones ante la fuerza destructiva de los sismos y/o temblores. Actualmente en Colombia algunas estructuras ya tienen mecanismos para disipar la energía producida por los sismos y/o temblores reduciendo el impacto de los movimientos en las estructuras. No obstante las alternativas de mejoramiento de las estructuras todavía se encuentran en estudio, enfocadas hacia su optimización, cuyo resultado finalmente contribuirá al mejoramiento de las obras de edificación y disminuir al mínimo los daños causados por los temblores.

El propósito de un aislador de base es desacoplar el puente del movimiento del suelo disminuyendo la respuesta estructural, es decir disminuyen las fuerzas que actúan sobre la estructura, los aisladores están ubicados sobre la cimentación y están soportando la estructura, interponiendo un estrato de baja rigidez horizontal que da mayor flexibilidad, amortiguamiento y disipación de la energía. Los aisladores de base constituyen una solución a los problemas de resistencia sísmica para cualquier estructura; hay que tener en cuenta que el tipo de aislador que se use en una estructura también repercute en su respuesta estructural.

Para establecer un estudio detallado sobre los aisladores de base en puentes estructurales, se pretende realizar una investigación y comprobar por medios tecnológicos el comportamiento de un puente curvo ante un sismo cualquiera con dos aisladores diferentes.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Realizar un estudio sobre el comportamiento y respuesta de un puente curvo con aisladores LRB (Aislador Elastomérico con Núcleo de Plomo) y HDRB (Aislador Elastomérico de alto Amortiguamiento) ante un sismo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir la geometría del puente del caso de estudio.
- Definir las propiedades mecánicas y modelos matemáticos de los aisladores LRB y HDRB.
- Realizar un modelo de elementos finitos en el software SAP 2000 del puente.
- Comparar los resultados entre el modelo con aisladores y sin aisladores ante la acción de sismos obtenidos de la “zonificación sismo geotectónica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga”

1. DEFINICIÓN DEL AISLAMIENTO DE BASE

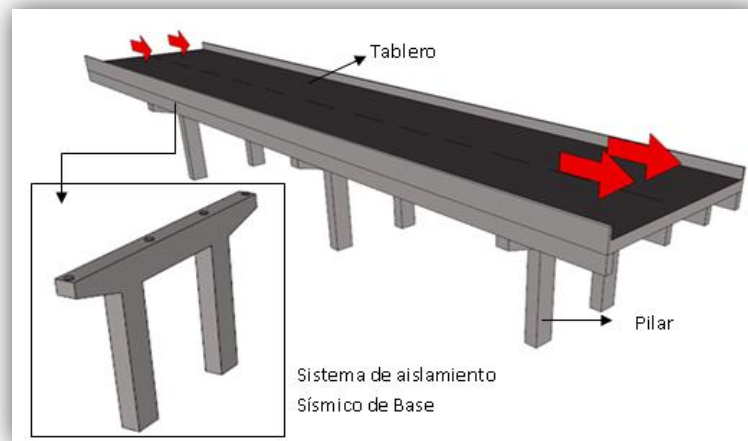
1.1. Generalidades

Un movimiento sísmico genera que cualquier estructura que se encuentre bien diseñada y que cumpla con los requerimientos de la norma sismo resistente puede llegar a sufrir daños, debido a la fuerza ejercida por el movimiento del suelo. Es por ello que se requiere de un sistema de protección sísmica, para reducir el impacto producido por el movimiento sobre la estructura.

El aislamiento de base es uno de los tres sistemas de control pasivo de protección sísmica, este mecanismo se caracteriza por el desacoplamiento de la estructura de sus cimientos o fundiciones para protegerla de los efectos producidos por un movimiento sísmico. En puentes, los aisladores se colocan entre la subestructura y la superestructura. (HURTADO, Jose C; SUÁREZ, Vinicio A.)

La Figura 1 se muestra la ubicación exacta de los aisladores de base en un puente de luces continuas. Estos actúan restringiendo la transmisión horizontal y absorbiendo la energía producida por un movimiento sísmico a través del amortiguamiento.

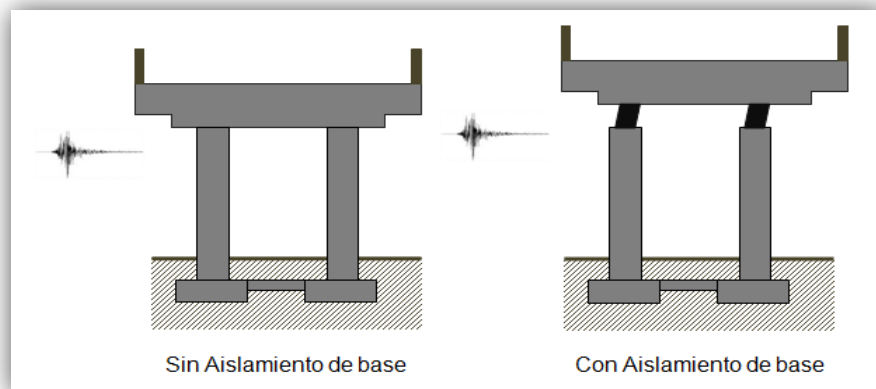
Figura 1. Puente con aislamiento sísmico.



Fuente: Autor.

Los aisladores son dispositivos que absorben mediante deformaciones elevadas la energía transmitida por un sismo a la estructura, y de esta manera evitar los daños causados por el movimiento del suelo (KUNDE, M.C). De acuerdo con esto, la función principal de los aisladores es modificar la respuesta de la estructura para que no se transmitan las fuerzas producidas por el sismo. En la Figura 2 se puede observar las diferencias entre un sistema aislado y un sistema sin aislamiento, entonces en un sistema sin aislamiento la estructura es muy rígida, tiene un periodo muy bajo y los desplazamientos son pequeños es decir la estructura se mueve lo mismo que el suelo, mientras que el sistema con aislamiento es más flexible, tiene un periodo y desplazamiento más grande respecto del movimiento del suelo.

Figura 2. Sistema sin aislamiento vs con aislamiento.

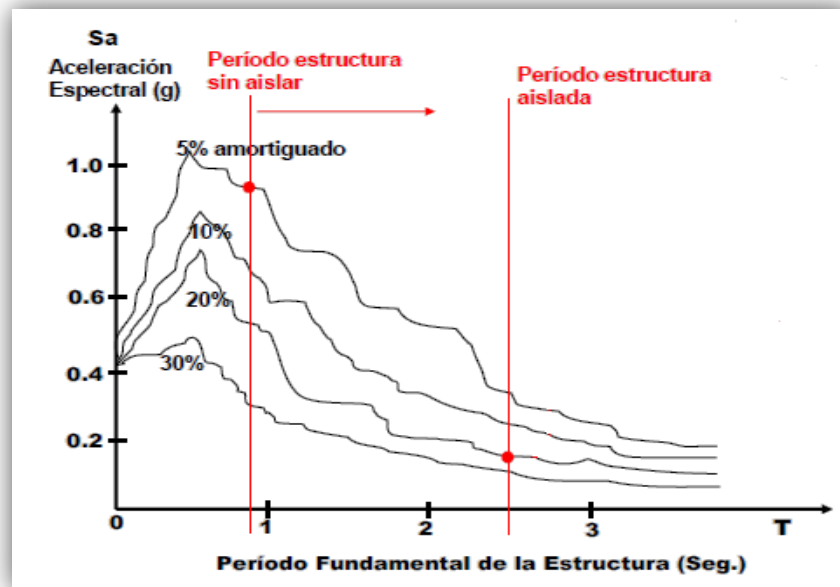


Fuente: Autor.

Las componentes fundamentales de un sistema de aislación son la flexibilidad y el amortiguamiento, la combinación de estos dos genera cambios en la respuesta de la estructura, especialmente en estructuras que tienen periodos muy bajos (AASHTO). La flexibilidad es un efecto que tiende a incrementar el periodo en una estructura generando aumento en los desplazamientos, en la Figura 3 se observa que el periodo de una estructura sin aislar es mucho más grande que el periodo de

una estructura con aislamiento debido al amortiguamiento y la flexibilidad proporcionado por los aisladores.

Figura 3. Efectos del aislamiento de base, perspectiva desde el espectro de aceleraciones.



Fuente: RENDON, Ing. Jorge.

1.2. Clasificación

Los aisladores se encuentran dentro de los sistemas de control pasivo; los sistemas de control pasivo se basan en elementos que responden de forma inercial a la acción sísmica y, a diferencia del resto de sistemas, no precisan de aporte energético para su funcionamiento. (CAHIS CAROLA, 2000)

Los sistemas pasivos se clasifican en sistemas de aislamiento de base, de disipación de energía y osciladores resonantes (MONTANARO). En esta tesis nos enfocaremos en los sistemas de aislamiento de base, que como se había especificado permiten el desacoplamiento de la estructura del terreno, disminuyendo de esta forma el impacto energético transmitido a la estructura.

Aislamiento de Base

Básicamente existen dos tipos de sistema de aislamiento

- a) Apoyos elastoméricos.
- b) Apoyos deslizantes o friccionantes.

Los apoyos elastoméricos para puentes son mecanismos construidos parcial o totalmente de elastómeros, puede ser sencillos (Una sola capa de elastómeros) o laminados (Varias capas de elastómero restringidas mediante láminas de acero). Los apoyos deslizantes están basados en el concepto de fricción deslizante, es decir, rozamiento entre dos superficies en contacto bajo presión y en el deslizamiento de una de ellas. En general, el aislamiento de base debe ser capaz de soportar la estructura mientras provee flexibilidad horizontal y disipación de energía.

1.2.1. Aisladores elastoméricos

Los aisladores de elastómeros están compuestos por láminas de caucho adheridas entre sí, que pueden o no estar intercaladas por láminas metálicas, con el fin de proveer capacidad para soportar cargas verticales y confinar el núcleo, que por lo general, es de plomo (OVIEDO, Juan Andrés). Por lo general, los aisladores presentan una sección circular o cuadrada.

Algunas de las propiedades que se debe tener en cuenta en este tipo de aisladores son la alta rigidez vertical, la flexibilidad horizontal, la rigidez torsional, la durabilidad, la resistencia a cambios de temperatura y la resistencia a fuerzas cortantes.

Los aisladores elastoméricos se clasifican en:

- a) Aisladores Elastoméricos De Bajo Amortiguamiento (LDRB).
- b) Aisladores Elastoméricos con Núcleo de Plomo (LRB).
- c) Aisladores Elastoméricos de Alto Amortiguamiento (HDRB).

1.2.1.1. Aisladores Elastoméricos de Bajo Amortiguamiento “Low Damping Rubber Bearing” (LDRB)

Este tipo de dispositivos son los más simples dentro de los aisladores elastoméricos. Presentan bajo amortiguamiento entre 2 y 5 % como máximo, por lo general se usan en conjunto con disipadores de energía que proveen amortiguamiento adicional al sistema (Corporación de Desarrollo Tecnológico 2011). La relación fuerza – Deformación de estos aisladores es lineal debido a su bajo amortiguamiento. En la Figura 4 se puede apreciar una vista de este aislador.

Figura 4. Aislador Elastomérico de Goma Laminada.



Fuente: Corporación De Desarrollo Tecnológico (2011).

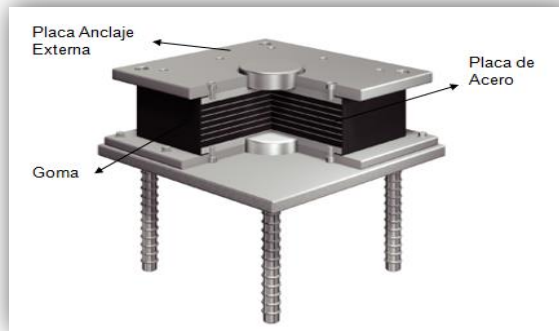
1.2.1.2. Aisladores Elastoméricos de Alto Amortiguamiento “High Damping Rubber Bearings” (HDRB)

Los aisladores de alto amortiguamiento alcanzan niveles cercanos al 10-15%. En la Figura 5 se puede observar una imagen del mismo.

Estos aisladores presentan una gran sensibilidad a cambios de temperatura y frecuencia que los aisladores LRB. Pero así mismo presentan una mayor rigidez para los primeros ciclos de carga, combinan la flexibilidad y disipación de energía en un solo elemento. Una de la desventaja que presentan estos aisladores es el

deterioro por el paso del tiempo y por el clima (Corporación de Desarrollo Tecnológico).

Figura 5. Aislador Elastomérico de Alto Amortiguamiento (HDRB).

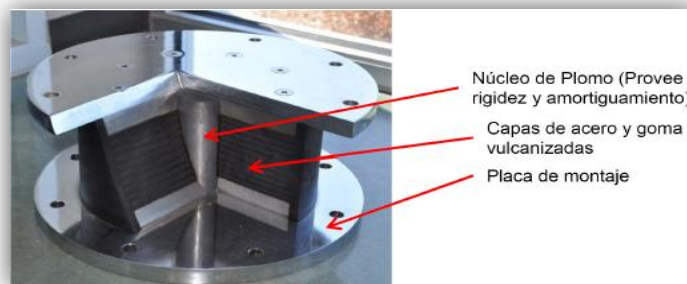


Fuente: Kawakin Core-Tech Co., LTD.

1.2.1.3. Aisladores Elastoméricos con Núcleo de Plomo “Lead Rubber Bearings” (New Zeland Bearing System) (LRB)

La diferencia de este sistema con el de aisladores LDRB o HDRB recae en que estos tienen un bloque cilíndrico o cúbico de plomo que proporciona mayor rigidez vertical, manteniendo la flexibilidad lateral y permite aumentar el nivel de amortiguamiento del sistema hasta niveles cercanos al 15 – 35% (CHENG, Franklyn Y.). En la Figura 6 se observa un esquema del mismo.

Figura 6. Aislador Elastomérico con Núcleo de Plomo (LRB).



Fuente: Corporación Desarrollo Tecnológico (2011).

El funcionamiento de este sistema es muy sencillo, durante la acción de un sismo éste se deforma lateralmente y el núcleo de plomo fluye, ocasionando deformaciones plásticas y liberando energía en forma de calor. Cuando la acción sísmica finaliza, la goma del aislador vuelve la estructura a su posición original, mientras el núcleo de plomo recristaliza. De esta forma el sistema queda listo para un nuevo evento.

2. DESCRIPCIÓN Y MODELAMIENTO DEL INTERCAMBIADOR VIAL VIA PALENQUE – FLORIDABLANCA (REINA DE LA PAZ)

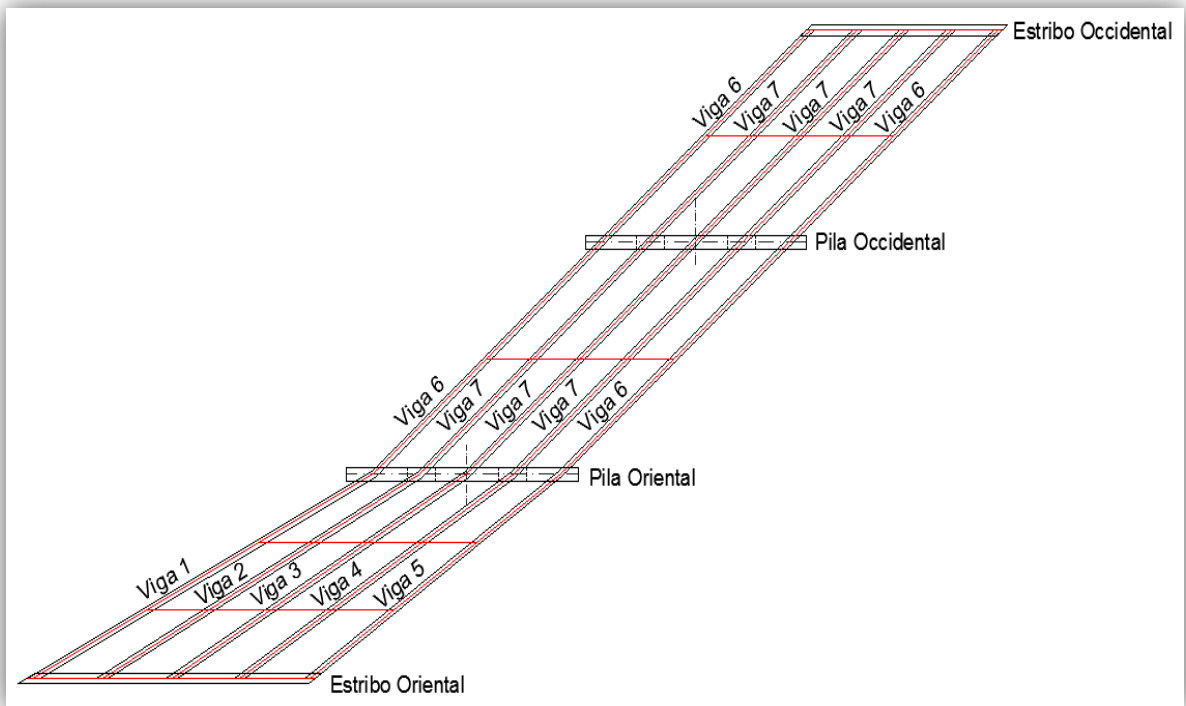
El Intercambiador Vial Reina de la Paz representa una solución para el flujo vehicular entre los municipios de Floridablanca y Girón. El puente tiene un solo sentido que va desde el Oriente hacia el Occidente en sentido Floridablanca - Girón.

2.1. Geometría

La estructura del puente para la intersección vial Reina de la Paz es una estructura en concreto reforzado, construido con un sistema de pila y losa, con una longitud total de 62 metros aproximadamente. Consta de tres luces soportadas por dos estribos (Estribo Oriental y Estribo Occidental) y 2 pilas intermedias (Pila Oriental y Pila Occidental).

La luz No.1 va desde el estribo oriental hasta la pila oriental. Consta de cinco vigas simplemente apoyadas dispuestas en abanico. Las luces No.2 y No.3 apoyadas sobre la pila oriental, pila occidental y estribo occidental, constan también de cinco vigas simplemente apoyadas y como luces continuas. En la Figura 7 se puede apreciar una vista en planta del Puente Vehicular Reina de la Paz.

Figura 7. Planta Puente Vial Reina de la Paz y Planta.



Fuente: Autor.

La pila occidental tiene una altura de 8.80 metros y la pila oriental 8.50 metros, y la luz más grande está entre el estribo oriental y la pila oriental de 24.20 metros. El puente tiene un ancho total de 10.50 metros y consta de dos carriles y sendero peatonal en cada extremo del puente.

La estructura está conformada por 15 vigas de 0.40 metros de base y de 1.55 metros de altura (Sección Rectangular) y 4 riostras de 0.30 metros de base por 1.50 metros de altura (Sección Rectangular). En la Tabla 1 se muestran las longitudes de las vigas.

Tabla 1. Longitudes Vigas

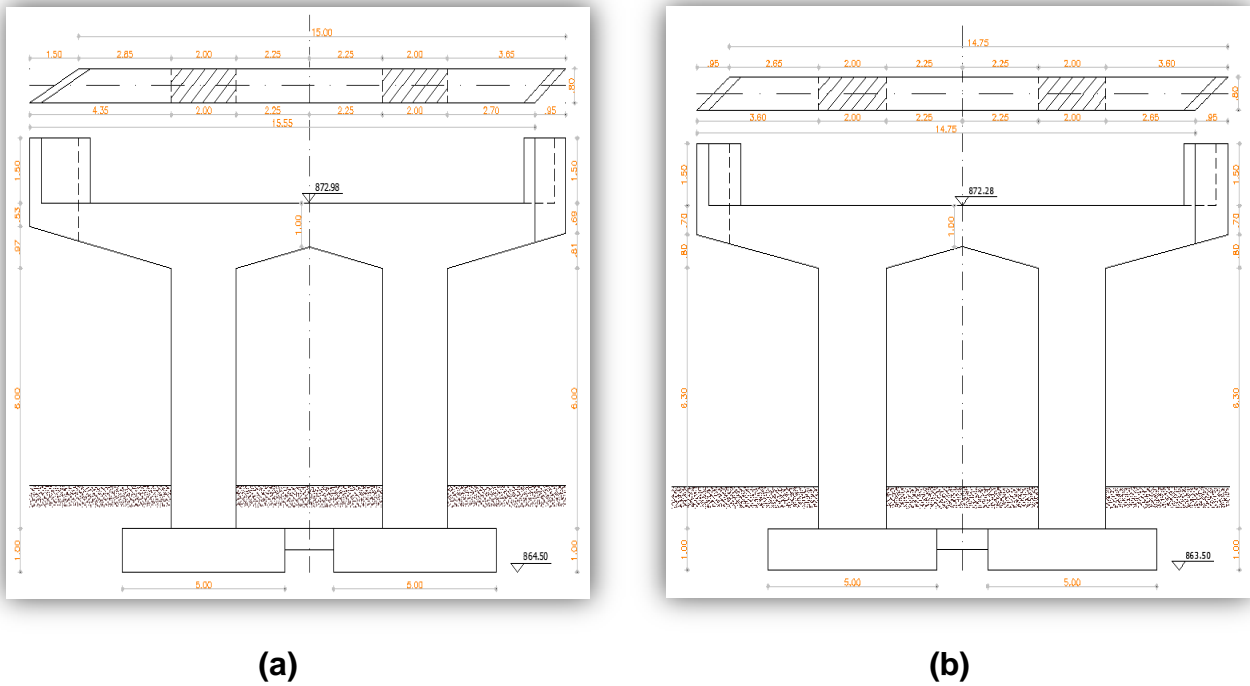
Longitud [m]				
Viga	Estr. Oriental – Pila Oriental	Viga	Pila Oriental – Pila Occidental	Pila Occidental – Estr. Occidental
1	27.06	6	21.29	19.43
2	25.63	7	21.29	19.43
3	24.20			
4	22.92			
5	21.52			

La cimentación de la estructura, se encuentra conformada por un par de zapatas en cada eje de cimentación, cada zapata tiene una dimensión de 5 metros por 2 metros y una altura de 1 metro.

De cada zapata emerge una pila la cual es maciza de sección rectangular de 2 metros por 0.8 metros, con una altura variable entre 8.50 y 8.80 metros y rematadas en una viga cabezal maciza de sección variable, en la Figura 8 se aprecian las proyecciones principales de cada pila.

Se usó un concreto de $f'c = 3000$ psi para los estribos y aletas; $f'c = 4000$ psi para la Losa, Vigas y riostras. El acero de refuerzo de $Fy = 60000$ psi fue usado para diámetros mayores o iguales a $\frac{1}{2}$ " y el de $Fy = 37000$ psi para diámetros menores a $\frac{1}{2}$ ".

Figura 8. (a) Alzado y Planta Pila Oriental, (b) Alzado y Planta Pila Occidental.



Fuente: Autor.

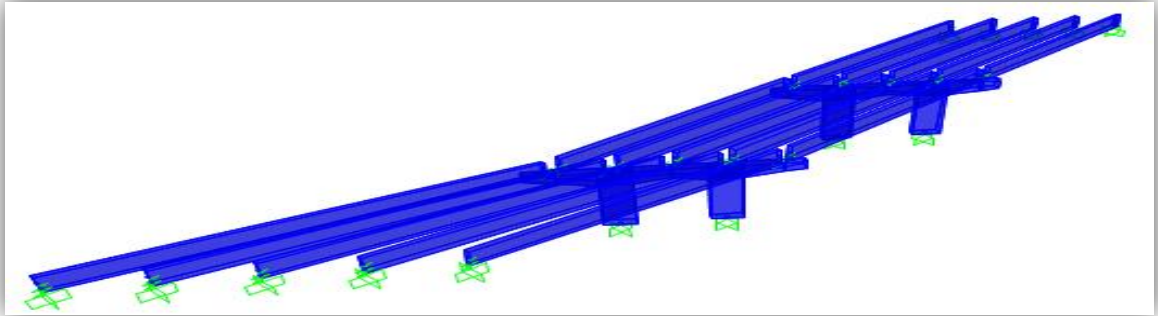
2.2. Modelamiento del Puente Vehicular Reina de la Paz en Sap2000

El modelo de la estructura del puente vial Reina de la Paz se realizó en el software SAP2000. Se tomó como Eje X (Eje Longitudinal) la dirección que sigue la cuerda que une los dos estribos del puente y como Eje Y (Eje Transversal) la dirección perpendicular a la cuerda que une los dos estribos, según el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes.

Primero se definieron los materiales a usar, se utilizó un concreto de $f'c = 4000$ psi o 28 Mpa en vigas y pilas. Luego se definió las secciones de las vigas, columnas y viga cabezal, para la viga cabezal tanto de la pila occidental como de la oriental se definieron 4 secciones rectangulares y luego se unieron por medio de una sección no prismática. Después se creó la grilla, los elementos del puente y los apoyos, tanto para los apoyos fijos como para los aisladores se utilizó la herramienta Link. En la Figura 9 y Figura 10 se observa como quedó el modelo del Puente vial Reina

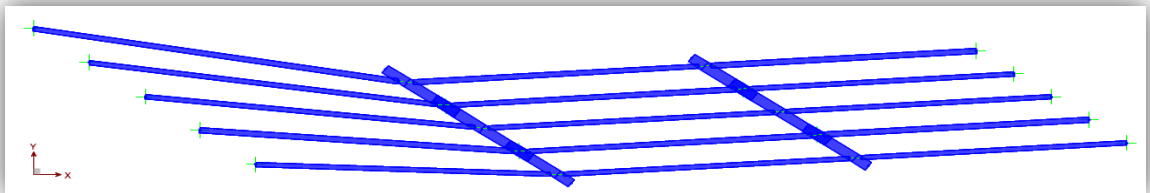
de la Paz en SAP2000 y en la Figura 11, Figura 12 y Figura 13 se pueden observar las vistas tridimensionales y en planta del intercambiador.

Figura 9. Vista tridimensional Puente Reina de la Paz (SAP2000).



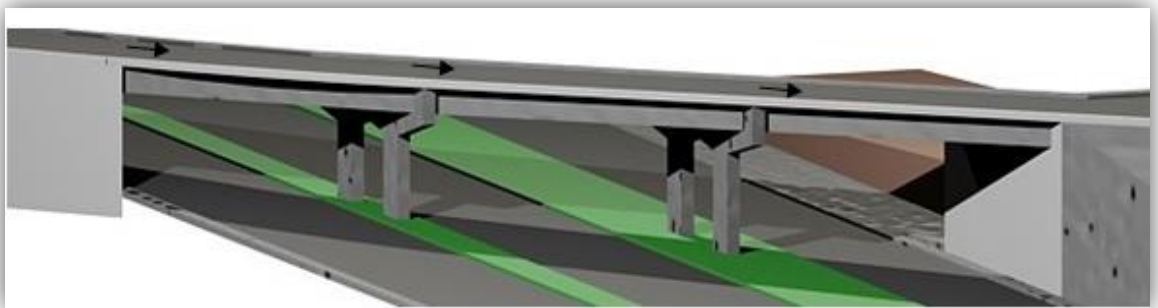
Fuente: Autor.

Figura 10. Vista en planta Puente Reina de la PAZ (SAP2000).



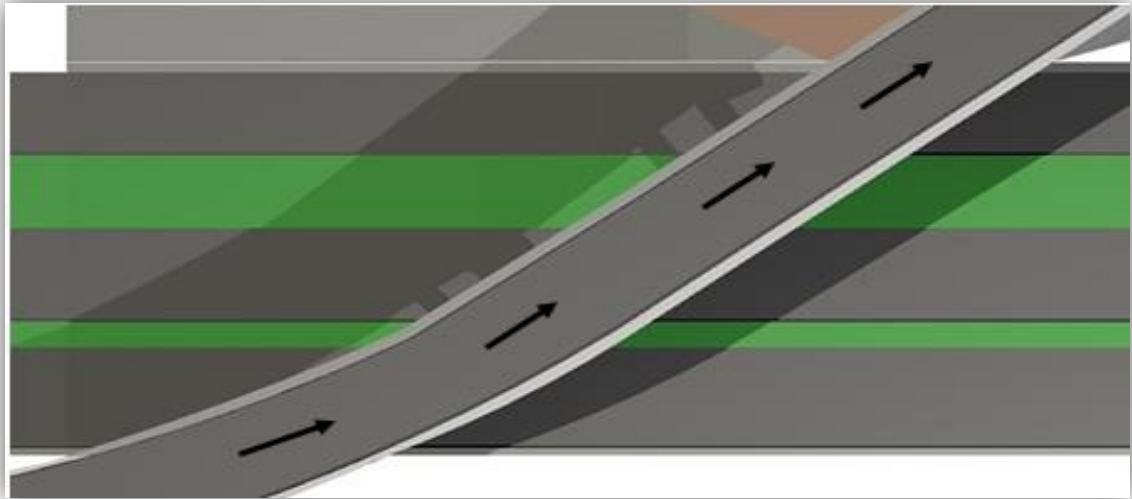
Fuente: Autor.

Figura 11. Proyección 3D del Intercambiador Vial Reina De La Paz.



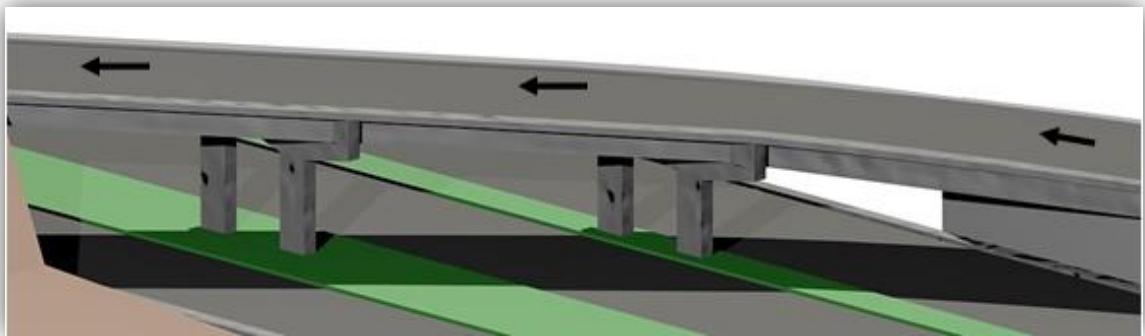
Fuente: Autor.

Figura 12. Proyección en planta Intercambiador Vial Reina De La Paz.



Fuente: Autor.

Figura 13 . Proyección en perfil Intercambiador Vial Reina De La Paz.



Fuente: Autor.

3. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS Y MODELAMIENTO DE LOS AISLADORES DE BASE

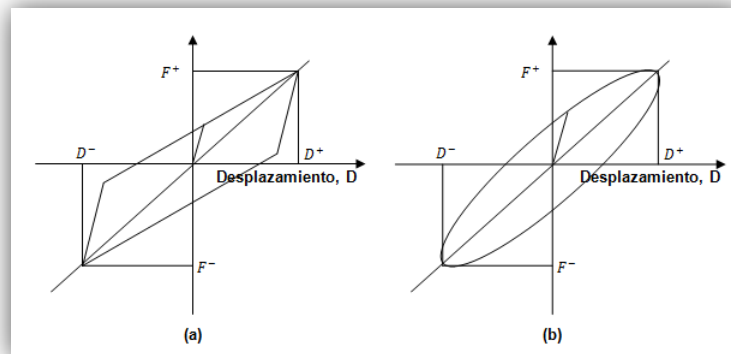
3.1. Introducción

El desempeño de la estructura está definido por la rigidez y amortiguamiento en el sistema de aislamiento, entonces suponiendo una rigidez lineal de la estructura soportada por los aisladores podemos encontrar una relación lineal ante una fuerza sísmica que afecte el sistema. No obstante, esta situación de linealidad no representa la realidad de las condiciones en las que se encuentra la estructura, condiciones como suelo suave y fallas activas en las cercanías.

Para poder representar estas condiciones se ha incorporado las propiedades mecánicas de los aisladores en el procedimiento analítico del análisis lineal lo cual ha generado un análisis no lineal. La no linealidad en la estructura está definida por la deformación inelástica de la superestructura y por las altas deformaciones en el sistema de aislamiento (MEZA BLANDON). Sin embargo, como la superestructura es más rígida que el sistema de aislamiento, las deformaciones se dan mayormente en el sistema de aislamiento y la superestructura tendrá una respuesta lineal. Con esta suposición, en el análisis se consideran las propiedades no lineales de los aisladores las cuales representan el comportamiento de la estructura aislada.

Los aisladores tienen un comportamiento histerético y viscoelástico, los cuales están representados en algunos modelos matemáticos como los mostrados en la Figura 14.

Figura 14. (a) Modelo Histerético (b) Modelo Viscoelástico.



Fuente: CHENG, Franklin Y & JIANG.

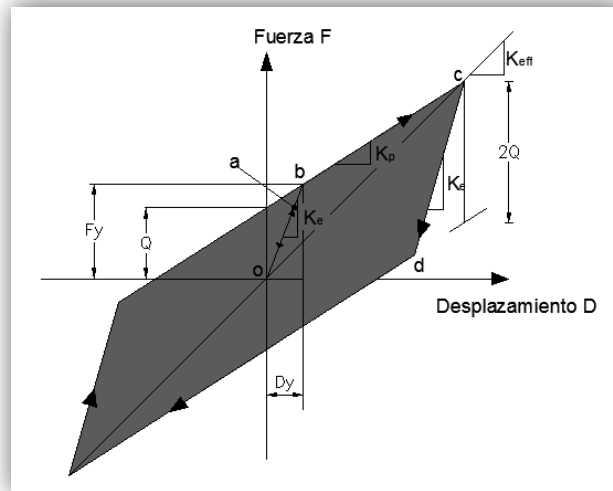
Para el modelo histerético las propiedades de los aisladores son independientes de la velocidad; Los desplazamientos máximos y mínimos ocurren al cortante máximo y mínimo respectivamente. Para el modelo viscoelástico las propiedades son dependientes de la velocidad; y los cortantes máximos y mínimos ocurren antes de los desplazamientos máximos y mínimos respectivamente.

Sin embargo, el modelo que ha sido más aceptado es el modelo bilineal, ya que caracteriza las propiedades mecánicas de los aisladores y además es válido para aisladores elastoméricos.

3.2. Parámetros del modelo bilineal

El modelo bilineal, usado para expresar la relación entre la fuerza cortante y el desplazamiento lateral, puede definirse por tres parámetros, la Rigidez Elástica K_e , Rigidez Postfluencia K_p y la Fuerza Característica Q los cuales reflejan las características mecánicas de los aisladores y los podemos observar en la Figura 15.

Figura 15. Modelo bilineal del aislador.



Fuente: CHENG, Franklin Y & JIANG.

Cuando una fuerza cortante se aplica al aislador, se da una relación lineal entre el cortante y el desplazamiento lateral, expresada por \overline{oa} , una vez que el cortante llega al punto b comienza la fluencia en el aislador, más allá del punto b se dan grandes desplazamientos con pequeños incrementos en el cortante, su rigidez está definida como Rigidez Postfluencia K_p . Si la descarga inicia en el punto c , la trayectoria de descarga no es la previa sino sigue la trayectoria \overline{cd} que tiene la misma rigidez inicial de \overline{oa} . El valor de cortante \overline{cd} es igual a $2F_y$, donde F_y es la fuerza de fluencia. Más allá del punto d , la trayectoria de descarga es paralela a \overline{bc} con la misma magnitud de K_p (FEMA 274).

La Rigidez Efectiva K_{eff} , en la región de Postfluencia puede ser expresada en términos de la rigidez Postfluencia K_p y la fuerza característica Q con el correspondiente desplazamiento lateral D de esta manera tenemos

$$K_{eff} = K_p + \frac{Q}{D} \quad (1)$$

El Desplazamiento de Fluencia D_y , el cual es convenientemente usado en algunos programas de computadoras para definir el modelo bilineal, también se deriva de K_e, K_p y Q

$$D_y = \frac{Q}{K_e - K_p} \quad (2)$$

La Fuerza de Fluencia F_y , en el desplazamiento de fluencia D_y se determina a través de la siguiente ecuación.

$$F_y = Q + K_p D_y \quad (3)$$

El amortiguamiento efectivo β_{eff} se define como

$$\beta_{eff} = \frac{E_D}{2\pi K_{eff} D^2} \quad (4)$$

Se Define E_D como la energía disipada por ciclo, y se considera como el área del ciclo de histéresis, limitada por el desplazamiento lateral $-D$ y $+D$ en cada ciclo. Así, $E_D = 4Q(D - D_y)$ y reemplazando en la ecuación (4)

$$\beta_{eff} = \frac{2Q(D - D_y)}{\pi K_{eff} D^2} \quad (5)$$

En el diseño, la rigidez efectiva y el amortiguamiento efectivo son determinados en el desplazamiento de diseño D_D y el desplazamiento Máximo D_M , los cuales se definen para un periodo fundamental.

A continuación se definirán las cargas permanentes sobre los aisladores y las características mecánicas de los aisladores con núcleo de plomo (LRB) y los aisladores de alto amortiguamiento (HDRB) usando el modelo bilineal.

3.3. Cargas permanentes sobre los aisladores

Entre las cargas que actúan sobre los sistemas de aislamiento sísmico están el peso propio de las vigas y una carga sobre impuesta debida al peso del tablero, la capa de rodadura, los andenes, barandas y separadores.

- Área de la sección transversal de las vigas

$$A = 1,55 \times 0,4 = 0,62 \text{ [m}^2\text{]}$$

- Longitud total de las vigas

$$L = 321,65 \text{ m}$$

- Peso propio de las vigas en total

$$W = 24 \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right] \times 0,62 \text{ [m}^2\text{]} \times 321,65 \text{ [m]} = 4786,152 \text{ [kN]}$$

- Carga sobre – impuesta

✓ Peso del tablero

$$W = 34,66 \text{ [kN]} \times \text{vigas tipo (1,2,3,4,6,7) [m]} + 42,2 \text{ [kN]} \times \text{viga tipo (5) [m]}$$

$$W = 34,66 \text{ [kN/m]} \times 300,11 \text{ [m]} + 42,2 \text{ [kN/m]} \times 21,54 \text{ [m]} = 11310,801 \text{ [kN]}$$

✓ Peso de las riostras

$$W = 24 \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right] \times 0,45 \text{ [m}^2\text{]} \times 60 \text{ [m]} = 648 \text{ [kN]}$$

- Carga total sobre todos los aisladores

$$W_{ta} = 4786,152 \text{ [kN]} + 11310,801 \text{ [kN]} + 648 \text{ [kN]} = 16744,953 \text{ [kN]}$$

$$W_{ta} \approx 16745 \text{ [kN]}$$

En total son 30 aisladores, porque se va a colocar un aislador en cada extremo de cada viga.

- Carga vertical sobre un aislador

$$W_a = 16745 \text{ [kN]} \div 30 = 558,17 \text{ [kN]} \approx 558,2 \text{ [kN]}$$

Las dimensiones de los aisladores se asumirán de 40 cm de ancho por 40 cm de largo por 20 cm de alto, considerando las dimensiones de las vigas y la carga vertical que soporta cada aislador.

3.4. Modelo Bilineal de los Aisladores Elastoméricos con Núcleo de Plomo (LRB)

La fuerza característica Q de los aisladores con núcleo de plomo es controlada principalmente por la fuerza cortante generada por el núcleo de plomo. El cortante de fluencia ocurre en el núcleo a bajos niveles de esfuerzo cortante. Sin embargo, el comportamiento histerético del aislador es bastante estable incluso cuando éste es sometido a muchos ciclos de carga (FEMA 274).

A continuación se muestra la relación que existe entre la fuerza característica Q y el esfuerzo de fluencia f_{y1} del plomo y el área del plomo A_1 .

$$Q = A_1 f_{y1} \quad (6)$$

La rigidez Postfluencia K_p puede describirse a través de la siguiente ecuación

$$K_p = \frac{A_b G f_L}{t} \quad (7)$$

Donde A_b es el área del caucho, G es el modulo de cortante tangente del caucho, t es el grosor total del caucho y f_L es igual a 1,5.

La rigidez elástica K_e se puede obtener a partir de la siguiente ecuación empírica, la cual se puede escribir de la siguiente manera $K_e = xK_p$, siendo x un valor entre 6,5 y 10 (FEMA 274):

$$6,5K_p < K_e < 10K_p \quad (8)$$

Con base a lo anterior en Tabla 2 se muestran todas y cada una de las características requeridas para el Modelamiento del aislador LRB, las casillas que se encuentran sombreadas son valores calculados y las demás son valores

definidos de acuerdo a las propiedades de los materiales y geometría del aislador. Para determinar la rigidez vertical del aislador se tomará como 500 veces la rigidez efectiva horizontal.

Tabla 2. Características mecánicas del aislador LRB.

AISLADOR LRB 400X400		
Ancho	300	mm
Largo	300	mm
Alto	200	mm
Espesor de la lámina de caucho	8	mm
Láminas de caucho	20	
Espesor de la lámina de acero	2	mm
Diámetro de núcleo de plomo	100	mm
Esfuerzo de fluencia del plomo f_{y1}	10	Mpa
Módulo de cortante del caucho G	0,9	Mpa
Área de plomo A_1	7853,98	mm ²
Fuerza característica Q	78539,82	N
Área del caucho AB	82146,02	mm ²
Grosor total del caucho t	160	mm
Rigidez post-fluencia K_p	693,11	N/mm
Rigidez elástica K_e	6931,07	N/mm
Desplazamiento de diseño D	150	Mm
Rigidez efectiva K_{eff}	1216,71	N/mm
Desplazamiento de fluencia D_y	12,59	Mm
Fuerza de fluencia F_y	87266,46	N
Amortiguamiento efectivo β_{eff}	25,10%	
Rigidez vertical del aislador	608352,90	N/mm
Relación (K_p/K_e)	0,100	

3.5. Modelo Bilineal de los Aisladores de Alto Amortiguamiento (HDRB)

Para este modelo se emplean 3 parámetros esenciales que se derivan el módulo de cortante G y el amortiguamiento efectivo β_{eff} . El modulo de cortante es determinado con precisión a partir de una prueba dinámica de cortante y el amortiguamiento efectivo es determinado a partir de las pruebas de prototipos de aisladores el cual varía entre el 10% y 20% del amortiguamiento crítico (FEMA 274).

Entonces se parte definiendo la rigidez Postfluencia K_p para los aisladores de alto amortiguamiento como sigue

$$K_p = \frac{GA_b}{t} \quad (9)$$

Donde A_b es el área del caucho, t es el espesor del caucho y G es el modulo de cortante tangente del caucho.

La fuerza característica está definida por

$$Q = \frac{\pi\beta_{eff}K_pD_D^2}{(2 - \pi\beta_{eff})D_D - 2D_y} \quad (10)$$

Donde D_D es el desplazamiento de diseño.y D_y es el desplazamiento de fluencia. Una aproximación de D_y es expresado en términos del espesor total del caucho t , luego entonces $D_y = \lambda t$, donde $0,05 \leq \lambda \leq 0,1$ (FEMA 274). De esta forma se puede definir la fuerza de fluencia F_y del aislador mediante la siguiente ecuación

$$F_y = Q + K_pD_y \quad (11)$$

La rigidez elástica del aislador de alto amortiguamiento está dada por

$$K_e = \frac{F_y}{D_y} \quad (12)$$

Si sustituimos $D_y = \lambda t$ en la ecuación 5, la rigidez efectiva en el desplazamiento de diseño puede ser calculado a través de la siguiente ecuación

$$K_{eff} = \frac{2Q(D_D - \lambda t)}{\pi\beta_{eff}D_D^2} \quad (13)$$

En la Tabla 3 se muestran las características requeridas para el Modelamiento del aislador HDRB. Para determinar la rigidez vertical del aislador se tomara como 500 veces la rigidez efectiva horizontal.

Tabla 3. Características mecánicas del aislador HDRB.

AISLADOR HDRB 400X400		
Ancho	300	mm
Largo	300	mm
Alto	200	mm
Espesor de la lámina de caucho	8	mm
Espesor de la lámina de acero	2	mm
Capas de caucho	20	
Módulo cortante del caucho G	0,9	Mpa
Área del caucho AB	90000	mm ²
Grosor total del caucho t	160	mm
Rigidez post-fluencia Kp	506,25	N/mm
Amortiguamiento efectivo β_{eff}	15%	
Desplazamiento de diseño Dd	150	mm
λ parámetro que varía entre 0,05 y 0,1	0,07	
Desplazamiento de fluencia Dy	11,20	mm
Fuerza característica Q	25941,70	N
Fuerza de fluencia Fy	31611,70	N
Rigidez elástica Ke	2822,47	N/mm
Rigidez efectiva Keff	679,19	N/mm
Rigidez vertical del aislador	339597,34	N/mm
Relación (Kp/Ke)	0,179	

4. DEFINICIÓN DE LA ACCIÓN SÍSMICA

El análisis sísmico comprende el comportamiento de una estructura bajo cargas y ofrece información sobre fuerzas internas y deformaciones. Se pueden realizar dos clases de análisis, un análisis estático en el cual las cargas no se ven afectadas por el paso del tiempo y un análisis dinámico el cual considera el paso del tiempo.

Para el análisis los parámetros más importantes a tener en cuenta son la máxima aceleración horizontal, la duración y la frecuencia. El análisis dinámico tiene en cuenta estos parámetros, los métodos usados en este análisis son: el Método de Historias en el Tiempo y el Método de Análisis Modal Espectral.

El Método de respuesta contra el tiempo con familias de acelerogramas es un análisis realizado integrando paso a paso ecuaciones de movimiento de la estructura. Generalmente es usado en puentes con una geometría irregular. Para el Método de Análisis Modal Espectral la respuesta corresponderá a los valores máximos de desplazamientos y aceleraciones en cada modo usando el espectro de diseño (GARCIA REYES).

4.1. Descripción Análisis de historias en el tiempo

Este es un análisis paso a paso de la respuesta dinámica de una estructura bajo una carga específica que puede variar con el tiempo, el análisis puede ser lineal o no lineal. Este método permite obtener resultados sobre una estructura que entra en el rango no lineal, en donde un análisis modal no puede ser utilizado.

El análisis tiempo historia se podrá realizar suponiendo comportamiento no lineal e inelástico y deberán utilizarse no menos de cinco registros de aceleraciones horizontales, correspondientes a sismos reales o artificiales. Estos registros

deberán normalizarse de manera que la aceleración máxima corresponda al valor máximo esperado en el sitio.

El análisis de historias en el tiempo es usado para determinar la respuesta dinámica de una estructura de varios grados de libertad que está sometida a unas fuerzas que varían en el tiempo, más exactamente la respuesta ante una excitación en la base, el cual corresponde a la respuesta de una estructura que se ve sometida a un sismo (MALDONADO RONDÓN & CHIO CHO). La ecuación de movimiento para un sistema sometido a una excitación en su base sin tener en cuenta el amortiguamiento, está dada de la siguiente forma:

$$[K]\{U\} + [M]\{\ddot{U}\} = -[M][\gamma]\{\ddot{x}_0\} \quad (14)$$

Donde

- $[K]$ es la matriz de rigidez
- $[M]$ es la matriz de masa
- $\{U\}$ es el desplazamiento
- $\{\dot{U}\}$ es la velocidad
- $\{\ddot{U}\}$ es la aceleración
- $\{\ddot{x}_0\}$ es la aceleración del terreno, representada por un acelerograma
- $[\gamma]$ vector de elementos unitarios, dado que todos los grados de libertad de la estructura actúan colinealmente con la aceleración en la base $\{\ddot{x}_0\}$

La solución a la ecuación (14) se muestra a continuación e implica que se tienen n ecuaciones independientes de un grado de libertad del tipo:

$$\ddot{\eta}_i + \omega_i^2 \eta_i = \Gamma_i \{\ddot{x}_0\} \quad (15)$$

Y si se aplica amortiguamiento modal

$$\ddot{\eta}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{\eta}_i + \omega_i^2 \eta_i = \Gamma_i \{\ddot{x}_0\} \quad (16)$$

Donde Γ_i es el factor de participación del modo i , y corresponde a la fila i de la matriz $[\Gamma]$.

4.2. Descripción Análisis Modal Espectral

Como ya se mencionó anteriormente en un análisis de historias en el tiempo la acción está representada por el acelerograma o registro del movimiento en aceleración a lo largo del tiempo, y en un análisis espectral la acción está representada por un espectro de respuesta, bien sea de desplazamiento o aceleración. De esta forma, en un análisis espectral los resultados obtenidos son valores máximos.

4.3. Descripción del Espectro Elástico de Respuesta según el CCDSP

El espectro elástico de respuesta se define según el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes de 1995 (CCDSP-95). Los datos recopilados según la norma son:

- Amenaza sísmica Alta
- Zona 2
- Coeficiente de Aceleración $A_a = 0,25$
- Clasificación Importancia *Grupo II – Importantes*
- Tipo de Perfil de Suelo S_2
- Coeficiente de Sitio $S = 1,2$
- Coeficiente de Amortiguamiento $\xi = 5\%$

El tipo de perfil de suelo se escogió en base a la zona en la que está ubicada en el puente, según el estudio de zonificación sismogeotécnica del área metropolitana de Bucaramanga 2001. Más adelante se especifica más detalladamente estas zonas.

Luego aplicando las ecuaciones de Máxima Aceleración Horizontal S_{am} obtenemos el Espectro de Diseño como se muestra en la Figura 16, el espectro se

definió en SAP2000 mediante la herramienta Functions y se definieron dos casos de carga en dirección longitudinal y transversal. Los casos de carga evaluados se definieron según el Código Colombiano de Diseño Sísmico de puentes 1995. El espectro de diseño suavizado de diseño, expresado como fracción de la gravedad está dado por la siguiente ecuación:

$$S_{am} = \frac{1,2 \times A \times S}{T_m^{2/3}} \leq 2,5 \times A$$

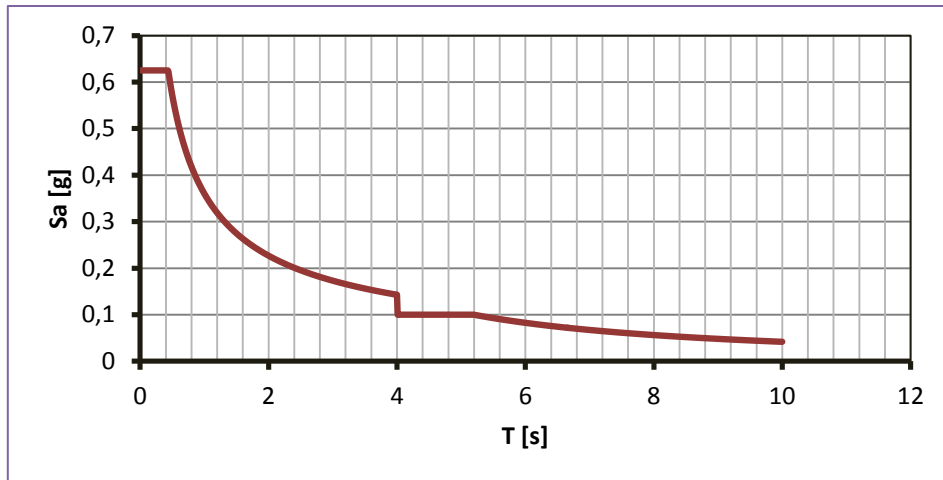
Dónde:

- S_{am} es la máxima aceleración horizontal, expresada como una fracción de la aceleración de la gravedad, a que se ve sometido un sistema de libertad con un periodo de vibración T_m .
- A es el coeficiente de aceleración, expresado como fracción de la gravedad.
- S es el coeficiente adimensional que representa las características del perfil de suelo.
- T_m es el periodo correspondiente al modo "m" en segundos.

Para estructuras en las cuales cualquier periodo de vibración T_m excede 4.0 segundos, el valor de S_{am} puede obtenerse de:

$$S_{am} = \frac{3 \times A \times S}{T_m^{4/3}} \leq \frac{A \times S}{3}$$

Figura 16. Espectro de Diseño para Bucaramanga Según CCDSP-95.



Fuente: CCDSP – 95.

4.4. Zonificación Sismogeotécnica Indicativa

Según el estudio de zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga realizado por el INGEOMINAS en el 2001 y basados en las características geológicas, geofísicas y geotécnicas de la ciudad, típico 7 zonas representativas para el cálculo de la respuesta dinámica.

Dentro de las 7 zonas propuestas, desde el punto de vista de respuesta dinámica se apreció que existen tres grupos de respuesta espectral similar, tanto en amplitud y forma.

- Zona 1: Roca
Depósitos de roca correspondientes a la Formación Girón; roca blanda y/o suelos residuales competentes sobre monto rocoso (Formación Neis, Bad Lands y Cañaveral).
- Zona 2: Suelo Rígido
Depósitos de suelo rígido. Reúne las zonas del Abanico de Bucaramanga, Flujos de escombros y Terrazas bajas y medias. Corresponde a las zonas

donde se encuentra la mayor parte de la población de Área Metropolitana de Bucaramanga (Bucaramanga, Florida, Piedecuesta y Girón).

- Zona 3: Llenos
Llenos antrópicos y mecánicos.

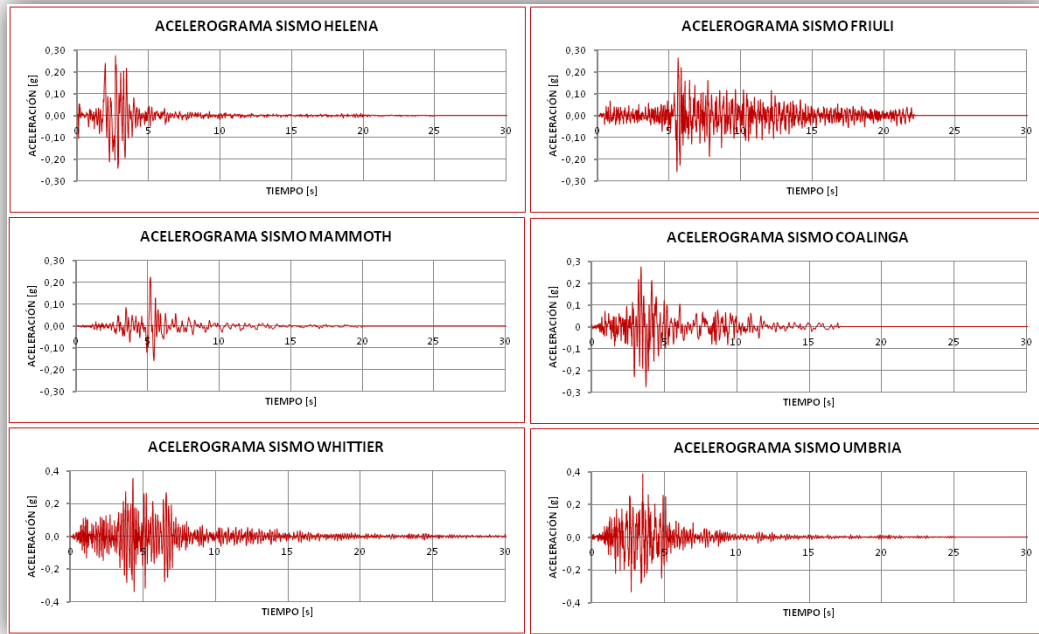
De acuerdo al mapa de zonificación sismogeotécnica el Intercambiador Vial Reina De La Paz se encuentra ubicado en la Zona 2.

4.5. Descripción Familia de Acelerogramas

Para el análisis de historias en el tiempo o análisis dinámico cronológico se emplearon los acelerogramas correspondientes a la microzonificación sísmica del área metropolitana de Bucaramanga, cuatro correspondientes a la falla frontal de los llanos orientales y seis correspondientes a la falla Bucaramanga – Santa Marta, estos registros son reales obtenidos en superficie gracias al estudio realizado por Gélvez y Ortiz (2009), los cuales realizaron el filtro de los registros de los acelerogramas teniendo en cuenta la zonificación sismogeotécnica hecho por INGEOMINAS (2001) la cual depende de las características del suelo y la respuesta dinámica de cada zona de la región generando estos acelerogramas en superficie para la Zona 2. En la Figura 17 y Figura 18 se muestran los acelerogramas escogidos.

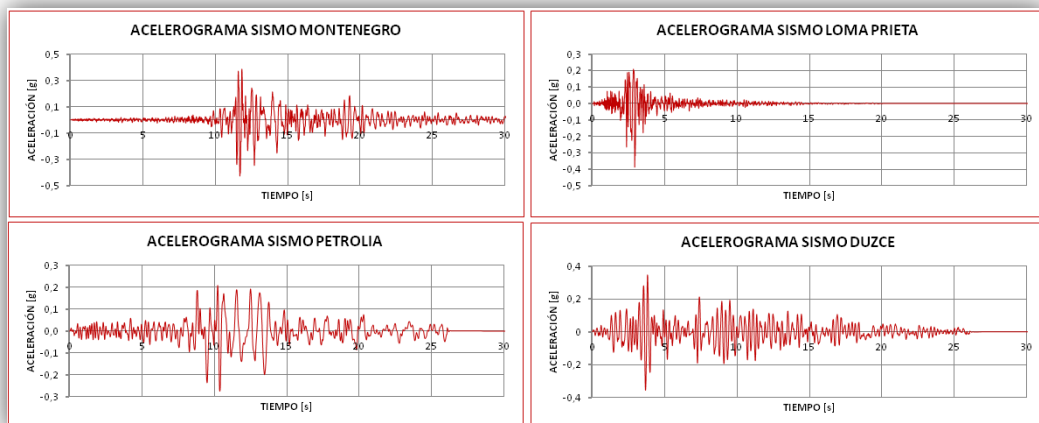
Los acelerogramas de diseño compatibles con el escenario sísmico de la Falla Bucaramanga – Santa Marta son Sismo Helena [Helena], Sismo Friuli [Friuli], Sismo Man. Lak. (As) [Mammoth], Sismo Coalinga (As) [Coalinga], Sismo Whittier Narr. [Whittier] y Sismo Umbria – Marche [Umbria]. Los acelerogramas de diseño compatibles con el escenario sísmico de la Falla Frontal de los llanos orientales son Sismo Montenegro [Montenegro], Sismo Loma Piedra [Loma Piedra], Sismo C. Mendocino [Petrolia] y Sismo Duzce [Duzce].

Figura 17. Acelerogramas de diseño compatibles con el escenario sísmico de la Falla Bucaramanga – Santa Marta.



Fuente: Autor.

Figura 18. Acelerogramas de diseño compatibles con el escenario sísmico de la Falla Frontal.



Fuente: Autor.

Los acelerogramas compatibles con la Falla de Bucaramanga son escalados a una aceleración de 0,16g y de igual forma los acelerogramas que simulan un evento de la Falla Frontal de los Llanos Orientales son escalados a 0,21g.

Los casos de carga se definieron para cada uno de los sismos en la dirección longitudinal y transversal mediante la herramienta Functions.

Con esto quedó definida la acción sísmica que se utilizó en el presente estudio, la cual corresponde a 10 acelerogramas compatibles, escalados y filtrados de acuerdo a las condiciones sísmicas, geológicas y geotecnicas respectivas a la zona de ubicación del Intercambiador Vial Reina De La Paz.

5. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

5.1. Generalidades

Para el presente trabajo se realizaron tres modelos en SAP2000 del Puente Vial Reina de la Paz, los cuales son:

- Modelo sin aislamiento de base
- Modelo con aisladores LRB
- Modelo con aisladores HDRB

Para cada modelo se realizó un análisis modal espectral usando el espectro de diseño según el CCDSP-95 y un análisis cronológico o de historias en el tiempo usando los diez acelerogramas obtenidos del estudio de zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga.

Primero se analizarán los resultados obtenidos del modelo sin aisladores de base, modos de vibración, periodos, desplazamientos y fuerzas cortantes en las pilas para cada uno de los análisis ya mencionados anteriormente.

Luego se realizará una comparación entre los resultados del modelo sin aisladores con los resultados del modelo LRB y del modelo HDRB, se compararán modos de vibración, periodos, desplazamientos y fuerzas cortantes en las pilas determinando la reducción de la demanda sísmica para cada caso.

Por último, se compararán los resultados obtenidos del modelo LRB con los resultados del modelo HDRB, desplazamientos y fuerzas cortantes para determinar cuál de los dos es la mejor opción, en cuanto a la reducción de la demanda sísmica.

5.2. Modelo Sin Aislamiento Sísmico

Como se mencionó anteriormente, para el modelo se realizó un análisis modal espectral y un análisis cronológico o de historias en el tiempo. A continuación se muestran los resultados.

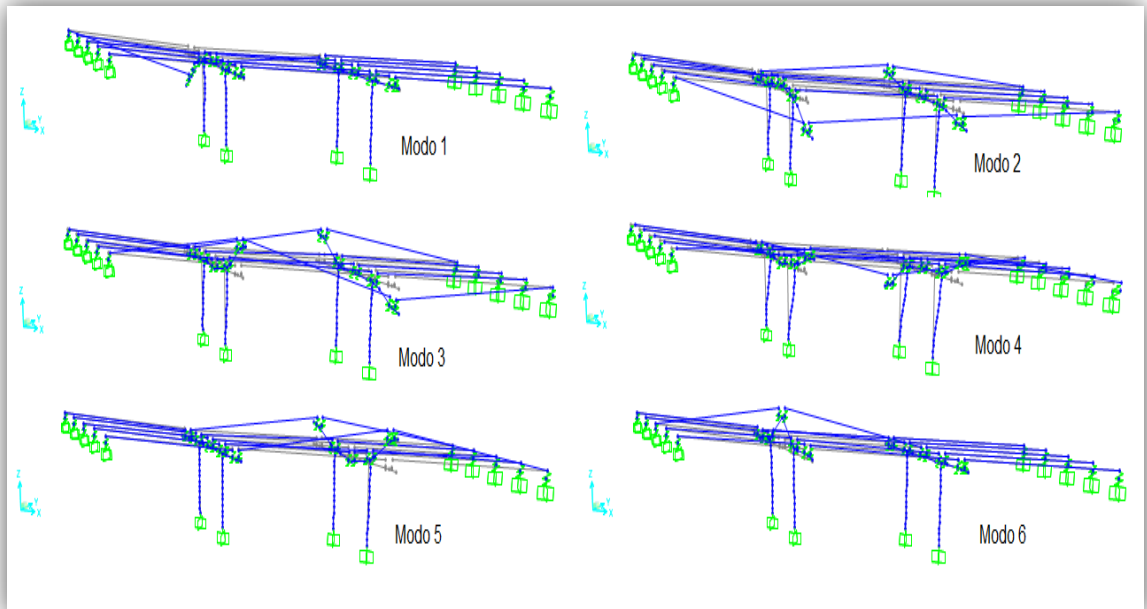
5.2.1. Modos de vibración, periodos y frecuencias

Los periodos, frecuencias y modos de vibración se calcularon en la dirección X (Longitudinal) y dirección Y (Transversal). Se corrieron un total de 70 modos de vibración, a continuación se tabulan los resultados de los primeros 10 modos y en la Figura 19 se muestran estos modos.

Tabla 4. Modos de vibración, Periodos y Frecuencias Modelo sin aislamiento.

Modo	Periodo [Seg]	Frecuencia [Ciclos/Seg]	% Participación de Masa	
			Ux	Uy
1	0,152	6,601	0,003	0,000
2	0,102	9,794	0,250	0,003
3	0,099	10,116	0,095	0,000
4	0,091	10,964	0,616	0,001
5	0,088	11,388	0,006	0,000
6	0,064	15,619	0,003	0,000
7	0,060	16,733	0,000	0,000
8	0,041	24,303	0,000	0,054
9	0,037	26,778	0,000	0,011
10	0,033	30,290	0,003	0,192

Figura 19. Primeros 6 Modos de vibración del modelo sin aislamiento.



Fuente: Autor.

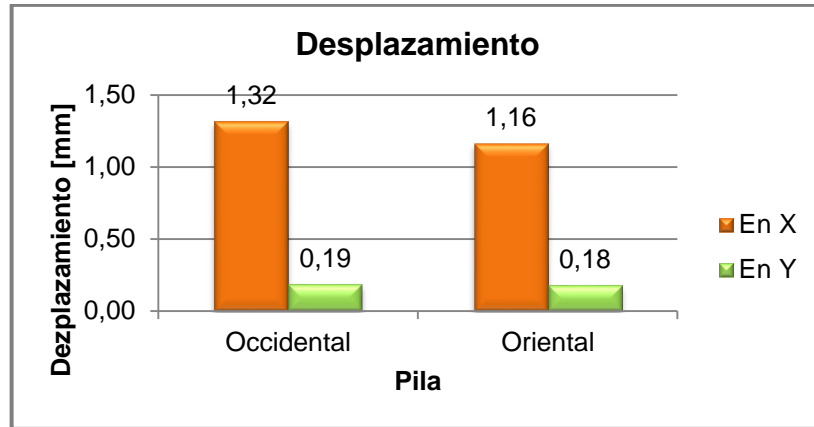
5.2.2. Desplazamientos y fuerzas cortantes análisis modal espectral.

A continuación se muestran tabulados los resultados obtenidos de análisis modal espectral, fuerzas cortantes y desplazamientos en la parte superior de cada pila en la dirección longitudinal y transversal. En la Figura 20 y Figura 21 se muestran las comparaciones de los desplazamientos y fuerzas cortantes en la dirección longitudinal y transversal de cada una de las pilas.

Tabla 5. Desplazamientos y Fuerzas Cortantes análisis modal espectral modelo sin aislamiento.

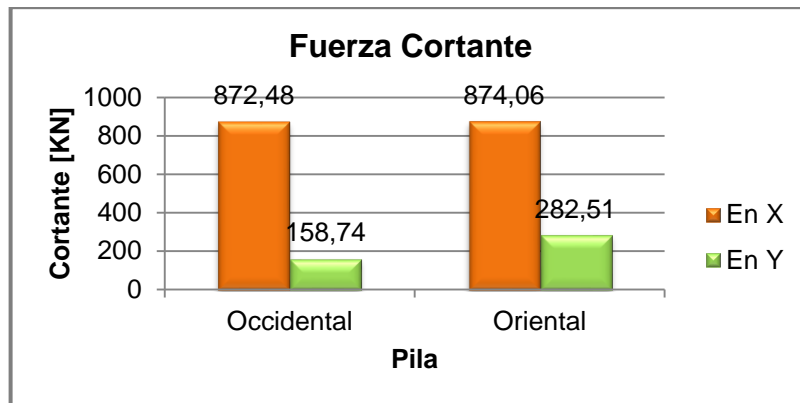
Pila	Desplazamiento [mm]		Cortante [KN]	
	En X	En Y	En X	En Y
Occidental	1,32	0,19	872,48	158,74
Oriental	1,16	0,18	874,06	282,51

Figura 20. Desplazamientos para cada pila Modelo Sin Aislamiento análisis modal espectral.



Fuente: Autor.

Figura 21. Fuerzas Cortantes para cada pila Modelo Sin Aislamiento análisis modal espectral.



Fuente: Autor.

De la Figura 20 y Figura 21 se puede concluir que, para el análisis modal espectral en cuanto a los desplazamientos en las pilas, los más relevantes y grandes se originaron en la dirección longitudinal con 1,32 y 1,16 mm, siendo estos los que se tienen en cuenta para el diseño de la estructura, además la pila con mayor desplazamiento fue la pila Occidental con 1,32 mm. En cuanto a las fuerzas

cortantes, las más relevantes son en dirección longitudinal para ambas pilas con valores de 872,48 y 874,06 KN. Luego entonces, se puede concluir que para este caso y según los resultados mostrados anteriormente, a mayor altura en las pilas mayor desplazamiento y menor fuerzas cortantes.

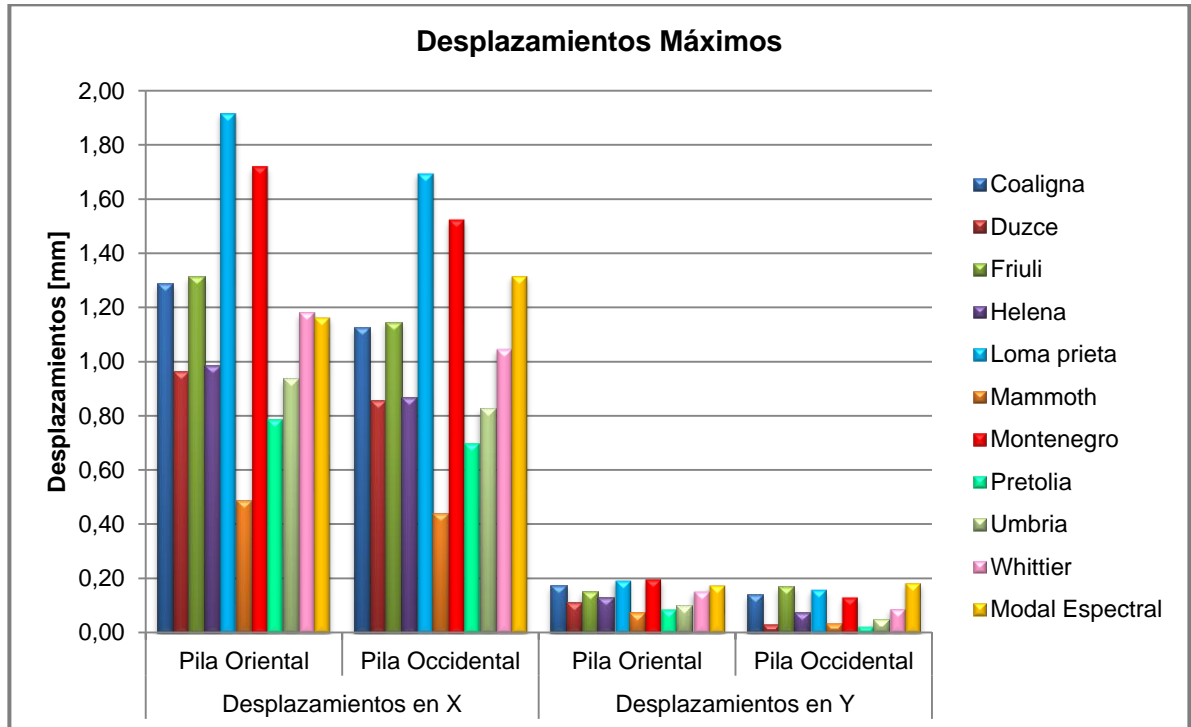
5.2.3. Desplazamientos y fuerzas cortantes análisis de historias en el tiempo.

En el ANEXO A se mostrarán los desplazamientos y fuerzas cortantes de cada una de las pilas para cuando los sismos actúan en dirección longitudinal, para los diez acelerogramas a nivel de superficie que se definieron en el Capítulo 4 del presente trabajo. En la Tabla 6 Se muestran los desplazamientos máximos en dirección longitudinal y transversal del puente para cada uno de los sismos en cada una de las pilas sin aislador y en la Figura 22 se comparan los desplazamientos.

Tabla 6. Desplazamientos máximos en dirección longitudinal y transversal del puente sin aisladores en cada pila producida por cada sismo.

SISMO	Desplazamientos Máximos en X [mm]		Desplazamientos Máximos en Y [mm]	
	Pila Oriental	Pila Occidental	Pila Oriental	Pila Occidental
Coaligna	1,29	1,13	0,17	0,14
Duzce	0,96	0,86	0,11	0,03
Friuli	1,32	1,15	0,15	0,17
Helena	0,99	0,87	0,13	0,08
Loma prieta	1,92	1,70	0,20	0,16
Mammoth	0,49	0,44	0,07	0,03
Montenegro	1,72	1,53	0,20	0,13
Pretolia	0,79	0,70	0,09	0,03
Umbria	0,94	0,83	0,10	0,05
Whittier	1,18	1,05	0,16	0,09
Modal Espectral	1,16	1,32	0,18	0,19
Máximo	1,92	1,70	0,20	0,17

Figura 22. Comparación de los desplazamientos máximos en [mm] que produce cada sismo en cada de una de las pilas en dirección longitudinal y transversal del puente sin aisladores.



Fuente: Autor.

Si observamos la Tabla 6 y la Figura 22 se puede ver que los desplazamientos máximos más relevantes se dieron en la dirección Longitudinal siendo estos de 1,92 y 1,70 mm para la pila oriental y occidental respectivamente, y que los sismos que producen mayores desplazamientos sobre las pilas del puente son los sismos de Montenegro y Loma Prieta. La pila oriental presento mayores desplazamientos para el análisis de historias en el tiempo con 1,92 mm, mientras que para el modal espectral fue la pila occidental la que presento mayor desplazamiento con 1,32 mm.

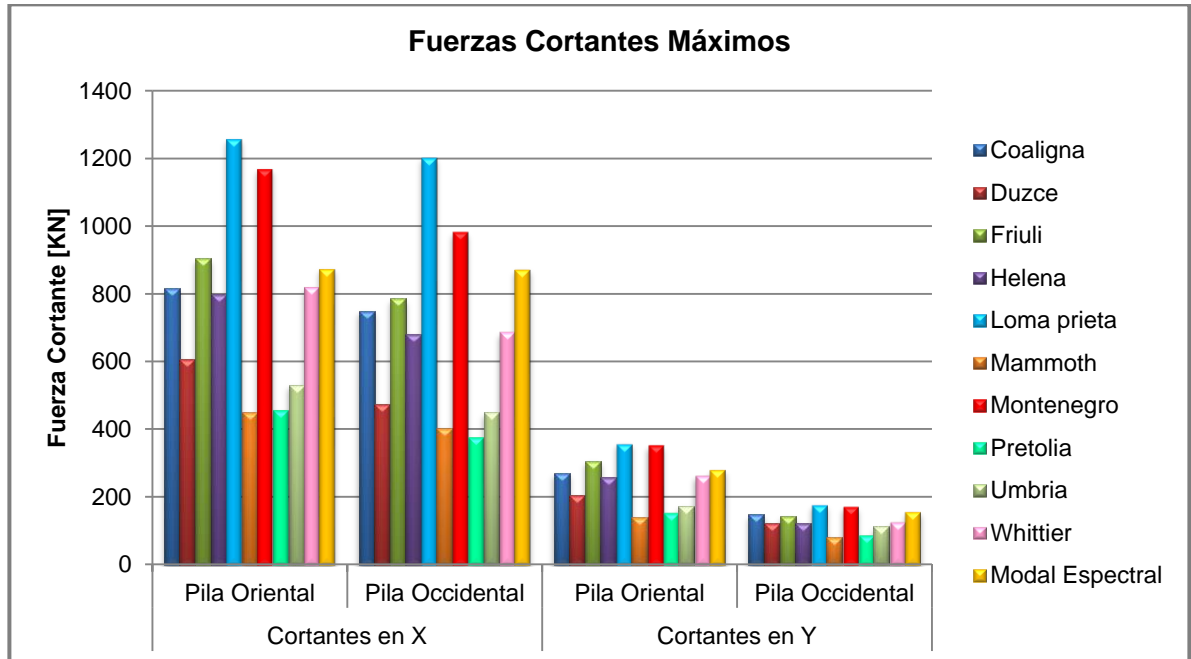
En la Tabla 7 se muestran las fuerzas cortantes máximas en dirección longitudinal en cada una de las pilas del puente sin aislamiento sísmico para cada uno de los

sismos aplicados, de igual manera en la figura 48 se muestran las comparaciones de las fuerzas cortantes.

Tabla 7. Fuerzas Cortantes máximos en dirección longitudinal y transversal del puente sin aisladores en cada pila producida por cada sismo.

SISMO	Fuerzas Cortantes Máximos en X [KN]		Fuerzas Cortantes Máximos en Y [KN]	
	Pila Oriental	Pila Occidental	Pila Oriental	Pila Occidental
Coaligna	815,29	749,44	270,00	147,43
Duzce	607,27	475,25	204,44	123,36
Friuli	904,84	786,81	305,76	143,99
Helena	798,09	681,15	257,47	120,70
Loma prieta	1258,63	1203,60	361,76	179,80
Mammoth	449,68	404,38	138,83	81,21
Montenegro	1169,47	983,78	354,75	173,03
Pretolia	455,00	375,35	154,91	89,33
Umbria	530,51	449,98	173,46	112,71
Whittier	819,27	687,77	265,22	128,07
Modal Espectral	874,06	872,48	282,51	158,74
Máximo	1258,63	1203,60	361,76	179,80

Figura 23. Comparación de las fuerzas cortantes máximas en [KN] que produce cada sismo en cada de una de las pilas en dirección longitudinal y transversal del puente sin aisladores.



Fuente: Autor.

En la Tabla 7 y Figura 23 se puede observar que los sismos Loma Prieta y Montenegro producen las mayores fuerzas cortantes en las pilas con valores de 1258,63 y 1203,60 KN en la pila oriental y occidental respectivamente. También se puede apreciar al igual que con los desplazamientos, las fuerzas cortantes más grandes se generan en la pila oriental. Los cortantes en dirección transversal al igual que los desplazamientos son muy inferiores comparados con los obtenidos con los sismos en dirección longitudinal siendo los máximos de 361,76 y 179,80 KN en la pila oriental y occidental respectivamente.

Comparando las fuerzas cortantes obtenidas mediante el análisis de historias en el tiempo con las obtenidas mediante el análisis espectral modal, se puede ver que

son mayores las fuerzas cortantes obtenidas por el análisis de historias en el tiempo en la pila oriental.

5.3. Modelo Sin Aislamiento Sísmico vs Modelo Con Aisladores LRB

Para el modelo del Intercambiador Reina de la Paz con aisladores LRB se realizó un análisis modal espectral y un análisis de historias en el tiempo. A continuación se muestran los resultados obtenidos y se comparan con el modelo sin aislamiento.

5.3.1. Periodos y modos de vibración

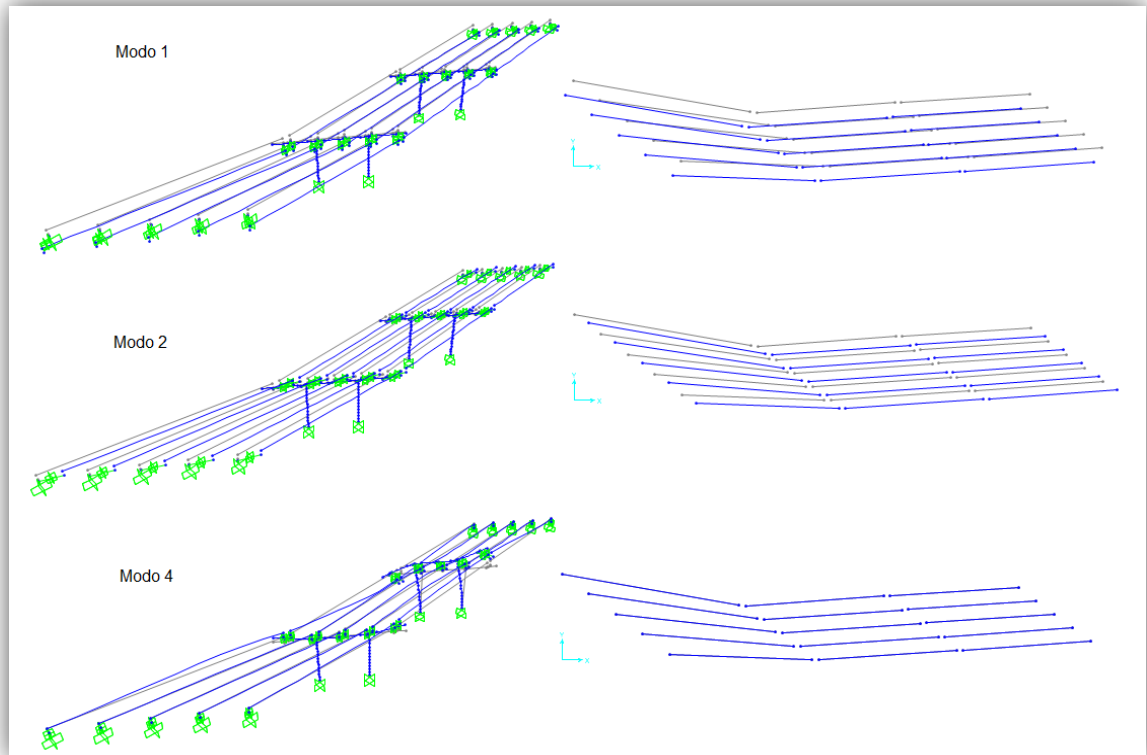
El eje longitudinal o eje X del puente se trazó siguiendo la dirección de la cuerda que une los dos estribos del puente, y el eje transversal o eje Y se trazó perpendicular a la cuerda que une los dos estribos.

En la Tabla 8 se muestran los primeros 5 modos de vibración, periodos y frecuencias del puente.

Tabla 8. Modos de vibración, periodos y frecuencias modelo con aisladores LRB.

Modo	Periodo [Seg]	Frecuencia [Ciclos/Seg]	% Participación de Masa	
			Ux	Uy
1	1,409	0,709	0,232	0,688
2	1,355	0,738	0,679	0,228
3	0,168	5,937	0,000	0,004
4	0,159	6,290	0,002	0,009
5	0,155	6,434	0,000	0,000

Figura 24. Modos de vibración 1,2 y 4 del intercambiador Reina de la Paz con aisladores LRB.



Fuente: Autor.

Al observar los modos de vibración del puente con aisladores LRB se observa que los modos de vibración son longitudinales y transversales mientras que si observamos los modos de vibración del modelo sin aislamiento se puede notar que estos son todos longitudinales.

El periodo fundamental para el Intercambiador Reina de la Paz sin aislamiento sísmico es de 0,091 segundos mientras que para el intercambiador con aisladores LRB es de 1,355 segundos, esto nos demuestra que al colocar los aisladores LRB producen un aumento en el periodo fundamental de la estructura, es decir tiene un periodo más largo generando desplazamientos más grandes, además también

modifican la forma de vibrar de la estructura generando modos de vibración tanto longitudinales como transversales.

5.3.2. Desplazamientos y Fuerzas cortantes máximos.

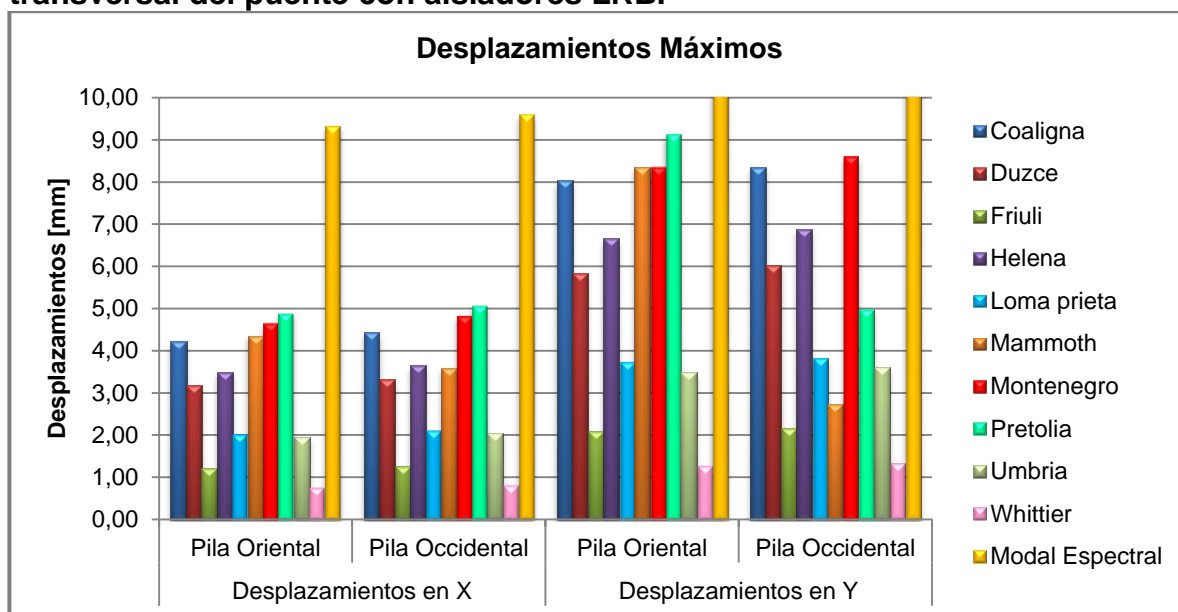
En el Anexo B se muestran las gráficas en donde se comparan los desplazamientos en dirección longitudinal del puente para las pilas sin aislamiento versus el desplazamiento de las mismas con aisladores LRB para los diferentes sismos.

En la Tabla 9 y Tabla 10 se muestran los desplazamientos máximos y fuerzas cortantes máximas en dirección longitudinal y transversal del puente para cada uno de los sismos en cada una de las pilas con aisladores LRB y en Figura 25 y Figura 26 se comparan estos desplazamientos máximos y fuerzas cortantes máximas para cada pila por cada sismo.

Tabla 9. Desplazamientos máximos en dirección longitudinal y transversal del puente con aisladores LRB en cada pila producida por cada sismo.

SISMO	Desplazamientos Máximos en X [mm]		Desplazamientos Máximos en Y [mm]	
	Pila Oriental	Pila Occidental	Pila Oriental	Pila Occidental
Coaligna	4,22	4,42	8,04	8,36
Duzce	3,18	3,31	5,85	6,02
Friuli	1,21	1,27	2,09	2,16
Helena	3,49	3,65	6,66	6,87
Loma prieta	2,02	2,11	3,72	3,81
Mammoth	4,35	3,59	8,35	2,72
Montenegro	4,67	4,84	8,35	8,61
Pretolia	4,91	5,10	9,14	5,02
Umbria	1,95	2,05	3,49	3,61
Whittier	0,76	0,81	1,26	1,32
Modal Espectral	5,45	5,61	9,33	9,61
Máximos	4,91	5,10	9,14	8,61

Figura 25. Comparación de los desplazamientos máximos en [mm] que produce cada sismo en cada de una de las pilas en dirección longitudinal y transversal del puente con aisladores LRB.

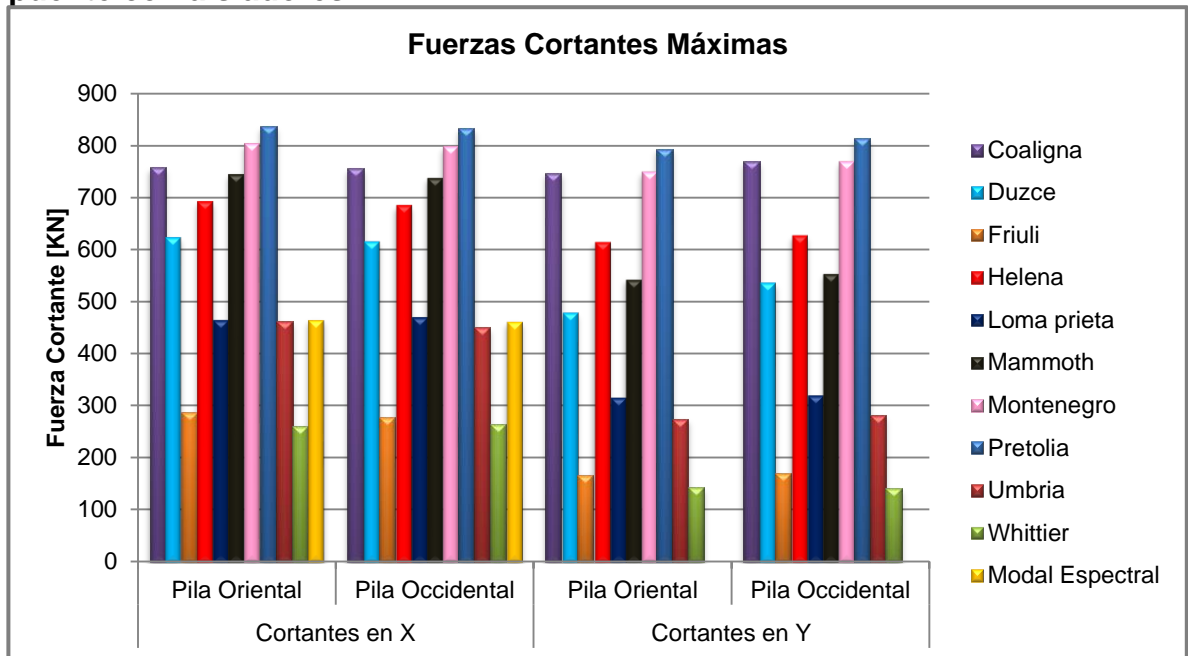


Fuente: Autor.

Tabla 10. Fuerzas Cortantes máximas en dirección longitudinal y transversal del puente con aisladores LRB en cada pila producida por cada sismo.

SISMO	Fuerzas Cortantes Máximos en X [KN]		Fuerzas Cortantes Máximos en Y [KN]	
	Pila Oriental	Pila Occidental	Pila Oriental	Pila Occidental
Coaligna	758,32	755,72	747,37	769,33
Duzce	623,03	614,75	479,12	535,84
Friuli	286,90	276,59	166,08	168,38
Helena	692,03	684,53	613,91	626,80
Loma prieta	463,45	469,30	314,83	319,28
Mammoth	745,33	737,98	543,61	554,53
Montenegro	804,01	798,43	749,82	769,53
Pretolia	837,33	833,44	793,90	813,86
Umbria	462,32	449,14	273,37	280,67
Whittier	260,43	263,04	141,33	140,75
Modal Espectral	490,91	489,23	464,32	460,83
Máximo	837,33	833,44	793,90	813,86

Figura 26. Comparación de los cortantes máximos en [KN] que produce cada sismo en cada de una de las pilas en dirección longitudinal y transversal del puente con aisladores LRB.



Fuente: Autor.

La Tabla 9 y Tabla 10 y la Figura 25 y Figura 26 nos permiten observar el comportamiento de los desplazamientos y fuerzas cortantes máximos generados en cada pila y para cada sismo en dirección longitudinal y transversal; de allí se puede decir que los desplazamientos máximos de 4,91 y 5,10 mm en la pila oriental y occidental respectivamente generados por los sismos en el modelo con aisladores LRB son mucho más grandes que los desplazamientos de 1,92 y 1,70 mm en la pila oriental y occidental respectivamente en el modelo sin aislamiento, mientras que las fuerzas cortantes máximas de 837,33 y 833,44 KN en la pila oriental y occidental respectivamente en dirección longitudinal generadas en el modelo con aisladores LRB son menores que las fuerzas cortantes de 1258,63 y 1203,60 KN en la pila oriental y occidental respectivamente generadas en el modelo sin aislamiento. También cabe mencionar que los sismos que produjeron mayores desplazamientos fueron Montenegro y Pretolia, así como también produjeron las fuerzas cortantes más grandes para ambas pilas.

Como se puede observar los desplazamientos máximos en dirección transversal son muchos más grandes siendo estos de 9,14 y 8,61 mm en la pila oriental y occidental respectivamente que los desplazamientos en dirección longitudinal, mientras que las fuerzas cortantes aunque son muy similares son mayores en dirección longitudinal que en dirección transversal.

Las fuerzas cortantes y desplazamientos máximos en ambas pilas los generaron los sismos de Montenegro y Coaligna, y además la pila occidental fue la que presento mayores desplazamientos y la pila oriental fue la que presento mayores fuerzas cortantes en dirección transversal.

A continuación se muestran unas tablas donde se hace un resumen de desplazamientos y fuerzas cortantes máximas en cada pila, se comparan y se muestra el porcentaje de reducción y/o aumento de las fuerzas cortantes y desplazamientos.

Tabla 11. Porcentaje de ampliación y/o reducción de los desplazamientos máximos en X (Sin aislamiento vs LRB).

SISMO	Desplazamientos Máximos en X [mm]					
	Pila Oriental			Pila Occidental		
	Sin	Con LRB	%	Sin	Con LRB	%
Coaligna	1,29	4,22	327,8	1,13	4,42	392,3
Duzce	0,96	3,18	329,8	0,86	3,31	385,7
Friuli	1,32	1,21	91,9	1,15	1,27	110,3
Helena	0,99	3,49	354,7	0,87	3,65	421,2
Loma prieta	1,92	2,02	105,4	1,70	2,11	124,5
Mammoth	0,49	4,35	891,0	0,44	3,59	815,0
Montenegro	1,72	4,67	271,0	1,53	4,84	317,2
Pretolia	0,79	4,91	623,7	0,70	5,10	729,0
Umbria	0,94	1,95	208,2	0,83	2,05	247,4
Whittier	1,18	0,76	63,9	1,05	0,81	77,5
Máximos	1,92	4,91	256,1	1,70	5,10	300,4

Tabla 12. Porcentaje de ampliación y/o reducción de los desplazamientos máximos en dirección transversal en cada pila con aisladores LRB.

SISMO	Desplazamientos Máximos en Y [mm]					
	Pila Oriental			Pila Occidental		
	Sin	Con LRB	%	Sin	Con LRB	%
Coaligna	0,17	8,04	4650,1	0,14	8,36	5924,8
Duzce	0,11	5,85	5188,7	0,03	6,02	17778,1
Friuli	0,15	2,09	1390,0	0,17	2,16	1265,9
Helena	0,13	6,66	5112,4	0,08	6,87	9121,5
Loma prieta	0,20	3,72	1899,8	0,16	3,81	2342,4
Mammoth	0,07	8,35	11484,6	0,03	2,72	8182,4
Montenegro	0,20	8,35	4163,5	0,13	8,61	6417,0
Pretolia	0,09	9,14	10169,8	0,04	5,02	12232,4
Umbria	0,10	3,49	3491,1	0,05	3,61	7368,2
Whittier	0,16	1,26	806,5	0,09	1,32	1447,0
Máximos	0,20	9,14	4554,4	0,17	8,61	5057,0

Tabla 13. Porcentaje de ampliación y/o reducción de los Cortantes máximos en dirección longitudinal del puente para cada pila con aisladores LRB.

SISMO	Cortantes Máximos en X [KN]					
	Pila Oriental			Pila Occidental		
	Sin	Con LRB	%	Sin	Con LRB	%
Coaligna	815,29	758,32	93,0	749,44	755,72	100,8
Duzce	607,27	623,03	102,6	475,25	614,75	129,4
Friuli	904,84	286,90	31,7	786,81	276,59	35,2
Helena	798,09	692,03	86,7	681,15	684,53	100,5
Loma prieta	1258,63	463,45	36,8	1203,60	469,30	39,0
Mammoth	449,68	745,33	165,7	404,38	737,98	182,5
Montenegro	1169,47	804,01	68,7	983,78	798,43	81,2
Pretolia	455,00	837,33	184,0	375,35	833,44	222,0
Umbria	530,51	462,32	87,1	449,98	449,14	99,8
Whittier	819,27	260,43	31,8	687,77	263,04	38,2
Máximos	1258,63	837,33	66,5	1203,60	833,44	69,2

Tabla 14. Porcentaje de ampliación y/o reducción de los Cortantes máximos en dirección transversal del puente para cada pila con aisladores LRB.

SISMO	Cortantes Máximos en Y [KN]					
	Pila Oriental			Pila Occidental		
	Sin	Con LRB	%	Sin	Con LRB	%
Coaligna	270,00	747,37	276,8	147,43	769,33	521,8
Duzce	204,44	479,12	234,4	123,36	535,84	434,4
Friuli	305,76	166,08	54,3	143,99	168,38	116,9
Helena	257,47	613,91	238,4	120,70	626,80	519,3
Loma prieta	361,76	314,83	87,0	179,80	319,28	177,6
Mammoth	138,83	543,61	391,6	81,21	554,53	682,8
Montenegro	354,75	749,82	211,4	173,03	769,53	444,7
Pretolia	154,91	793,90	512,5	89,33	813,86	911,1
Umbria	173,46	273,37	157,6	112,71	280,67	249,0
Whittier	265,22	141,33	53,3	128,07	140,75	109,9
Máximos	361,76	793,90	219,5	179,80	813,86	452,6

Tabla 15. Comparación de desplazamientos y fuerzas cortantes en dirección longitudinal y transversal del puente (Sin aislamiento vs LRB).

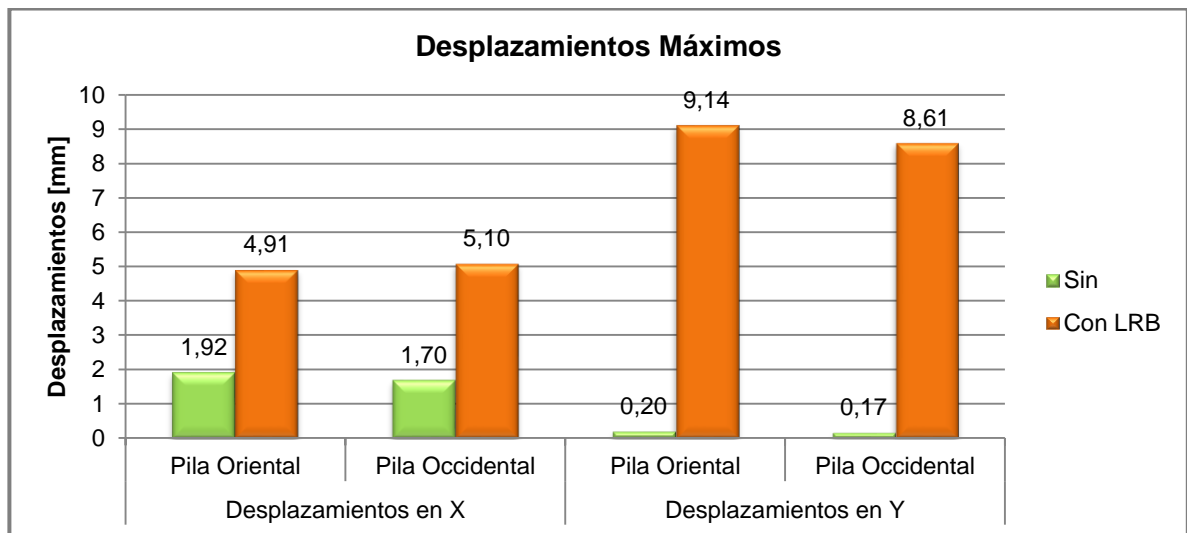
	Pila Oriental			Pila Occidental		
	Sin	Con LRB	%	Sin	Con LRB	%
Desplazamiento en X [mm]	1,92	4,91	256	1,70	5,10	300
Desplazamiento en Y [mm]	0,20	9,14	4554	0,17	8,61	5057
Cortante en X [KN]	1258,63	837,33	67	1203,60	833,44	69
Cortante en Y [KN]	361,76	793,90	219	179,80	813,86	453

En la Tabla 15 se puede observar que todos los desplazamientos de las pilas en dirección longitudinal y transversal se agrandan considerablemente, esto se debe a la flexibilidad que adquiere la estructura con los aisladores. Entonces al ser muy rígida la estructura los desplazamientos generados sin mínimos, mientras que al agregar los aisladores se está flexibilizando la estructura perdiendo rigidez y permitiendo tener mayores desplazamientos.

Las fuerzas cortantes por otro lado, en dirección longitudinal del puente tienden a disminuir, siendo la pila occidental la que tiene menos reducción (69%) y la pila oriental la que más reducción presenta (67%).

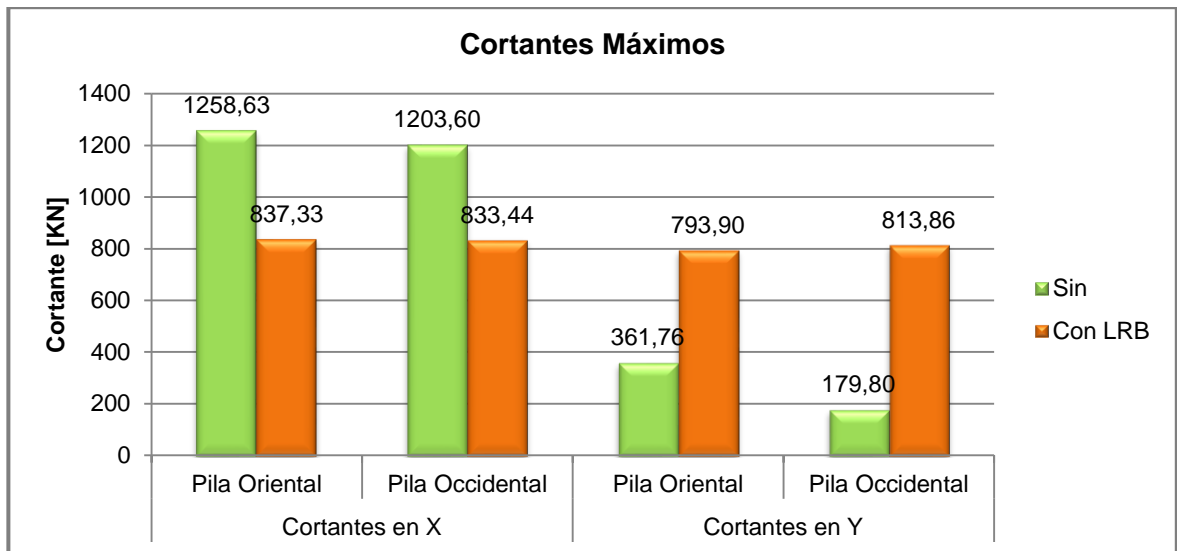
En la Figura 27 y Figura 28 se comparan los desplazamientos y fuerzas cortantes en dirección longitudinal y transversal del puente respectivamente, para los modelos sin aislamiento y con aisladores LRB.

Figura 27. Comparación de desplazamientos longitudinal y transversalmente (Sin aislamiento vs Aisladores LRB).



Fuente: Autor.

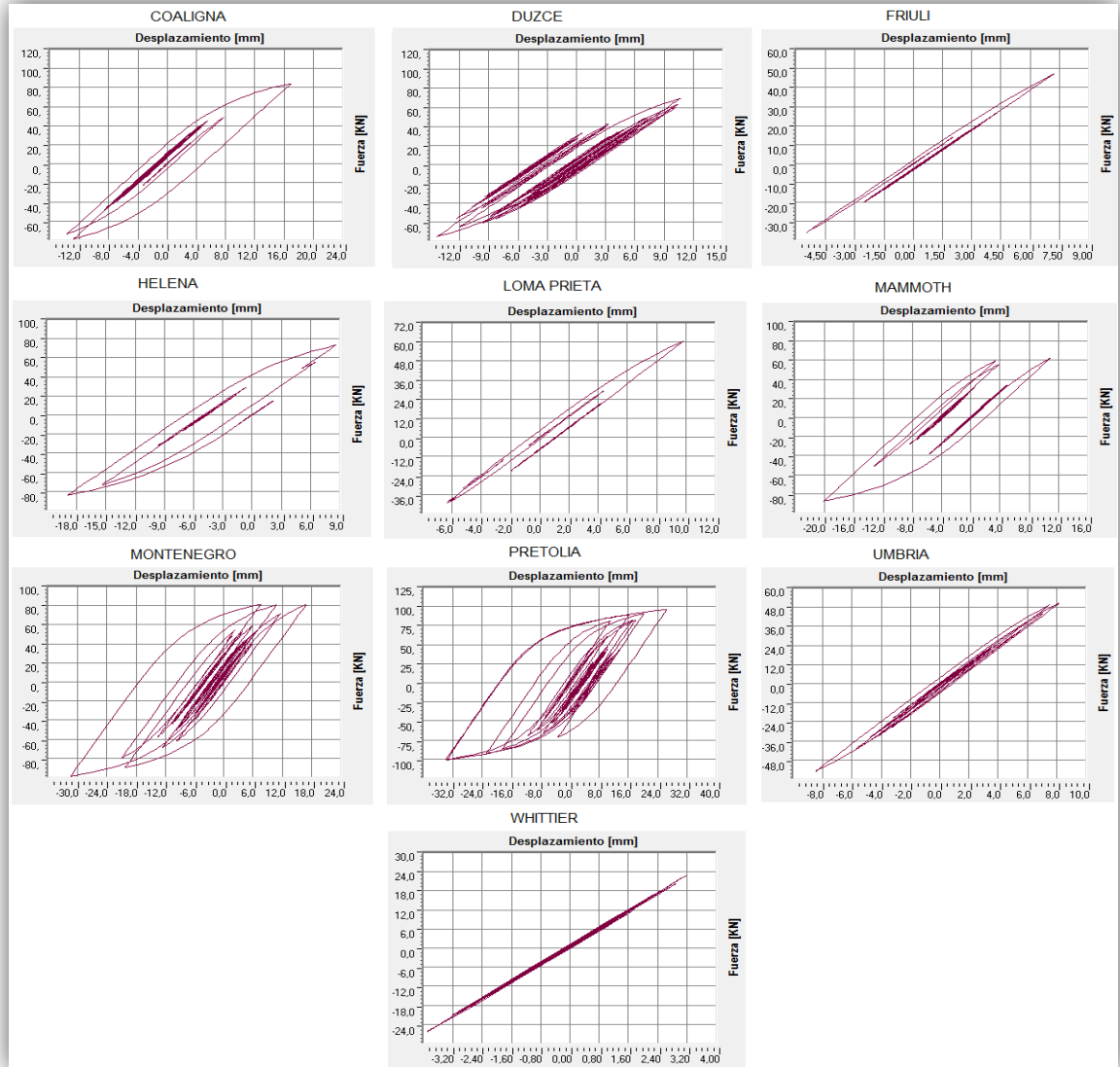
Figura 28. Comparación fuerzas cortantes longitudinal y transversalmente (Sin aislamiento vs Aisladores LRB).



Fuente: Autor.

Para finalizar el análisis del modelo del puente con aisladores LRB, a continuación se mostraran algunas curvas de fuerza – desplazamiento para un aislador de base ubicado en la pila oriental para los diferentes sismos, éstas curvas representan los ciclos de carga y descarga a los cuales estarían sometidos los aisladores por efecto de la acción sísmica.

Figura 29. Ciclos de histéresis para un aislador LRB en la pila oriental del puente para los sismos en dirección longitudinal.



Fuente: Autor.

De la Figura 29 se puede concluir que los sismos Montenegro y Pretolia llevan a que el aislador se comporte dentro del rango de post-fluencia para varios ciclos de carga. Los sismos de Friuli, Umbria y Whittier no llevan a que el aislador supere el rango elástico, mientras que los sismos de Coaligna, Duzce, Helena, Loma prieta

y Mammoth llevan a que el aislador se comporte dentro del rango elástico pero no durante ciclos repetidos de carga.

5.4. Modelo Sin Aislamiento Sísmico vs Modelo Con Aisladores HDRB

Para el modelo del Intercambiador Reina de la Paz con aisladores HDRB se realizó un análisis modal espectral y un análisis de historias en el tiempo. A continuación se muestran los resultados obtenidos y se comparan con el modelo sin aislamiento.

5.4.1. Periodos y modos de vibración

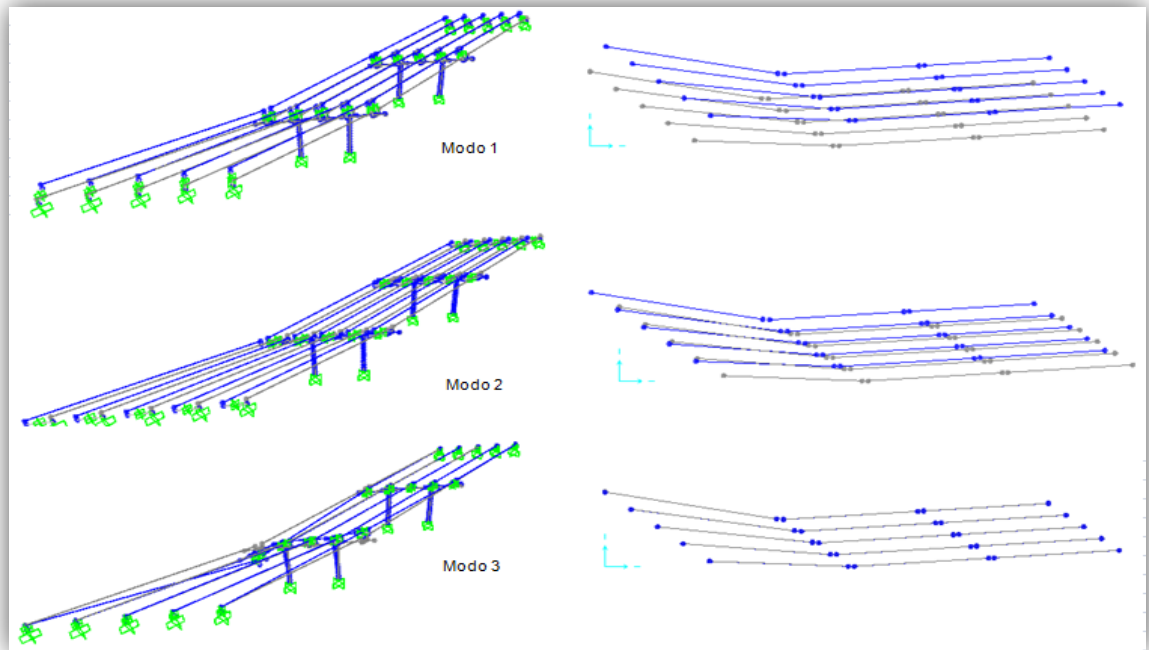
El eje longitudinal o eje X del puente se trazó siguiendo la dirección de la cuerda que une los dos estribos del puente, y el eje transversal o eje Y se trazó perpendicular a la cuerda que une los dos estribos.

En la Tabla 16 se muestran los primeros 5 modos de vibración los cuales se encuentran en dirección longitudinal y transversal del puente, periodos y frecuencias. En la Figura 30 se muestran los periodos 1,2 y 3.

Tabla 16. Modos de vibración, periodos y %de participación de masa del puente con HDRB.

Modo	Periodo [Seg]	Frecuencia [Ciclos/Seg]	% Participación de Masa	
			Ux	Uy
1	1,85	0,54	0,23	0,68
2	1,81	0,55	0,68	0,23
3	0,18	5,65	0,00	0,00
4	0,17	6,01	0,00	0,01
5	0,16	6,11	0,00	0,00

Figura 30. Modos de vibración 1,2 y 3 del puente con aisladores HDRB.



Fuente: Autor.

Comparando los modos de vibración del puente sin aislamiento con los obtenidos para el puente con aisladores HDRB, se observa que el primer modo es longitudinal y el segundo modo es transversal para el modelo con aisladores HDRB, mientras que para el puente sin aislamiento los modos principales son todos longitudinales.

El periodo fundamental de la estructura sin aislamiento sísmico es de 0,091 segundos mientras que para el puente con aisladores HDRB es de 1,81 segundos, en conclusión al colocar aisladores HDRB el periodo fundamental de la estructura se alarga considerablemente, generando desplazamientos más grandes y cambios en la forma de vibración de la estructura.

5.4.2. Desplazamientos y Fuerzas cortantes máximos.

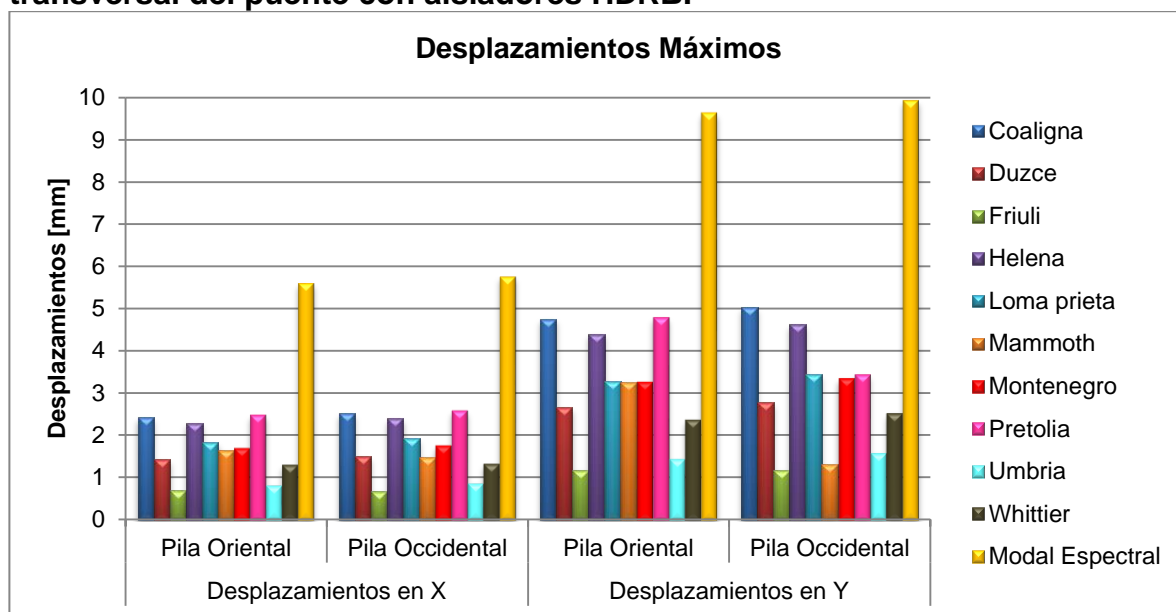
En el Anexo C se muestran las gráficas en donde se comparan los desplazamientos en dirección longitudinal del puente para las pilas sin aislamiento versus el desplazamiento de las mismas con aisladores HDRB para los diferentes sismos.

En la Tabla 17 y Tabla 18 se muestran los desplazamientos máximos y fuerzas cortantes máximas en dirección longitudinal y transversal del puente para cada uno de los sismos en cada una de las pilas con aisladores HDRB y en la Figura 31 y Figura 32 se comparan estos desplazamientos máximos y fuerzas cortantes máximas para cada pila por cada sismo.

Tabla 17. Desplazamientos máximos en dirección longitudinal y transversal del puente con aisladores HDRB en cada pila producida por cada sismo.

SISMO	Desplazamientos Máximos en X [mm]		Desplazamientos Máximos en Y [mm]	
	Pila Oriental	Pila Occidental	Pila Oriental	Pila Occidental
Coaligna	2,41	2,52	4,75	5,02
Duzce	1,41	1,49	2,65	2,76
Friuli	0,68	0,67	1,17	1,17
Helena	2,28	2,39	4,39	4,62
Loma prieta	1,82	1,92	3,26	3,44
Mammoth	1,63	1,48	3,26	1,30
Montenegro	1,71	1,77	3,26	3,34
Pretolia	2,48	2,58	4,78	3,44
Umbria	0,82	0,87	1,44	1,57
Whittier	1,30	1,33	2,35	2,50
Modal Espectral	5,61	5,77	9,64	9,93
Máximos	2,48	2,58	4,78	5,02

Figura 31. Comparación de los desplazamientos máximos en [mm] que produce cada sismo en cada de una de las pilas en dirección longitudinal y transversal del puente con aisladores HDRB.

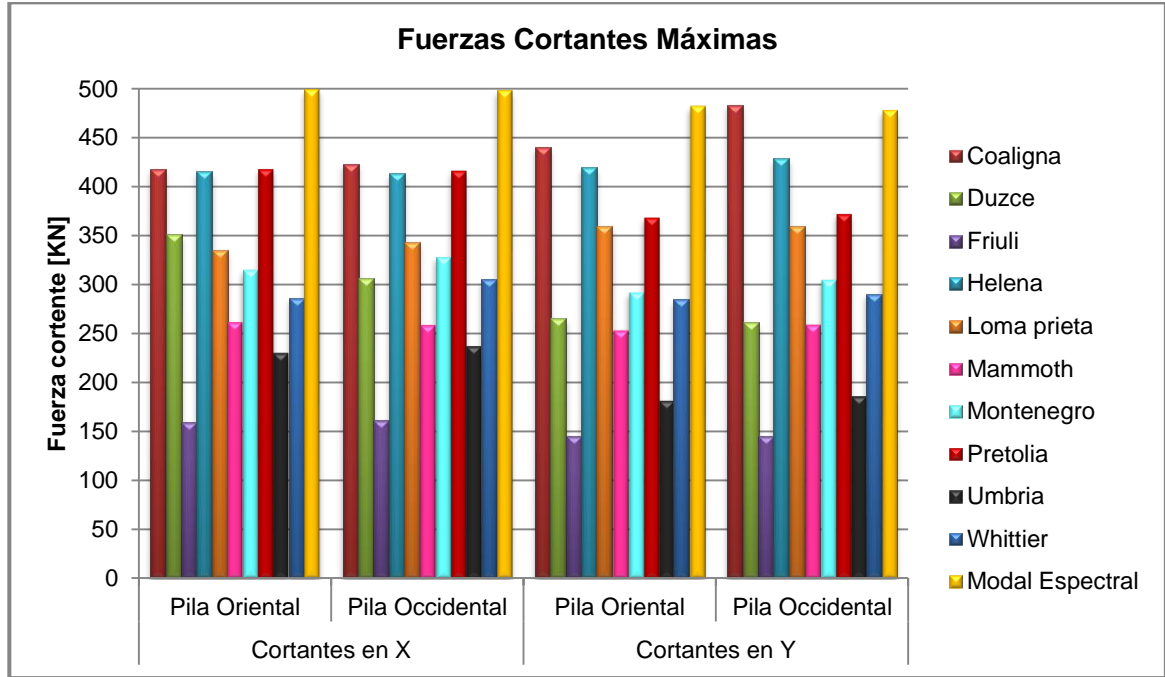


Fuente: Autor.

Tabla 18. Fuerzas Cortantes máximas en dirección longitudinal y transversal del puente con aisladores HDRB en cada pila producida por cada sismo.

SISMO	Fuerzas Cortantes Máximos en X [KN]		Fuerzas Cortantes Máximos en Y [KN]	
	Pila Oriental	Pila Occidental	Pila Oriental	Pila Occidental
Coaligna	418,23	423,18	439,79	483,33
Duzce	350,81	306,47	265,11	261,38
Friuli	159,71	160,77	144,98	144,77
Helena	415,89	413,38	419,49	428,81
Loma prieta	335,08	343,13	359,15	360,04
Mammoth	261,44	258,54	252,81	258,78
Montenegro	315,42	328,39	292,54	305,10
Pretolia	418,41	416,74	368,88	372,41
Umbria	229,72	236,55	181,40	185,87
Whittier	286,22	305,19	284,58	290,45
Modal Espectral	499,46	498,27	482,28	478,11
Máximo	418,41	423,18	439,79	483,33

Figura 32. Comparación de los cortantes máximos en [KN] que produce cada sismo en cada de una de las pilas en dirección longitudinal y transversal del puente con aisladores HDRB.



Fuente: Autor.

La Tabla 17 y Tabla 18 y la Figura 31 y Figura 32 se puede observar que los desplazamientos máximos en dirección longitudinal de 2,48 mm en la pila oriental y 2,58 mm en la pila occidental generados por los sismos en el modelo con aisladores HDRB son más grandes que los desplazamientos de 1,92 mm en la pila oriental y 1,70 mm en la pila occidental en el modelo sin aislamiento, mientras que las fuerzas cortantes de 418,41 KN en la pila oriental y 423,18 KN en la pila occidental en dirección longitudinal generadas en el modelo con HDRB son mucho más bajas que las fuerzas cortantes de 1258,63 KN en la pila oriental y 1203,60 KN en la pila occidental en dirección longitudinal generadas en el modelo sin aislamiento. También cabe mencionar que los sismos que produjeron grandes desplazamientos y fuerzas cortantes fueron Coaligna y Pretolia.

Como se puede observar los desplazamientos y fuerzas cortantes en dirección transversal para los sismos son grandes en comparación con los desplazamientos y fuerzas cortantes obtenidos con los sismos en dirección longitudinal, aunque en algunos casos es al contrario.

Las fuerzas cortantes y desplazamientos máximos en ambas pilas los generaron los sismos de Pretolia y Coaligna, y además la pila occidental fue la que presentó mayores desplazamientos y fuerzas cortantes en dirección transversal.

A continuación se muestran unas tablas donde se hace un resumen de desplazamientos y fuerzas cortantes máximas en cada pila.

Tabla 19. Porcentaje de ampliación y/o reducción de los desplazamientos máximos en dirección longitudinal (Sin aislamiento vs HDRB).

SISMO	Desplazamientos Máximos en X [mm]					
	Pila Oriental			Pila Occidental		
	Sin	Con LRB	%	Sin	Con LRB	%
Coaligna	1,29	4,22	327,8	1,13	4,42	392,3
Duzce	0,96	3,18	329,8	0,86	3,31	385,7
Friuli	1,32	1,21	91,9	1,15	1,27	110,3
Helena	0,99	3,49	354,7	0,87	3,65	421,2
Loma prieta	1,92	2,02	105,4	1,70	2,11	124,5
Mammoth	0,49	4,35	891,0	0,44	3,59	815,0
Montenegro	1,72	4,67	271,0	1,53	4,84	317,2
Pretolia	0,79	4,91	623,7	0,70	5,10	729,0
Umbria	0,94	1,95	208,2	0,83	2,05	247,4
Whittier	1,18	0,76	63,9	1,05	0,81	77,5
Máximos	1,92	4,91	256,1	1,70	5,10	300,4

Tabla 20. Porcentaje de ampliación y/o reducción de los desplazamientos máximos en dirección transversal en cada pila con aisladores HDRB.

SISMO	Desplazamientos Máximos en Y [mm]					
	Pila Oriental			Pila Occidental		
	Sin	Con LRB	%	Sin	Con LRB	%
Coaligna	0,17	8,04	4650,1	0,14	8,36	5924,8
Duzce	0,11	5,85	5188,7	0,03	6,02	17778,1
Friuli	0,15	2,09	1390,0	0,17	2,16	1265,9
Helena	0,13	6,66	5112,4	0,08	6,87	9121,5
Loma prieta	0,20	3,72	1899,8	0,16	3,81	2342,4
Mammoth	0,07	8,35	11484,6	0,03	2,72	8182,4
Montenegro	0,20	8,35	4163,5	0,13	8,61	6417,0
Pretolia	0,09	9,14	10169,8	0,04	5,02	12232,4
Umbria	0,10	3,49	3491,1	0,05	3,61	7368,2
Whittier	0,16	1,26	806,5	0,09	1,32	1447,0
Máximos	0,20	9,14	4554,4	0,17	8,61	5057,0

Tabla 21. Porcentaje de ampliación y/o reducción de los Cortantes máximos en dirección longitudinal del puente para cada pila con aisladores HDRB.

SISMO	Cortantes Máximos en X [KN]					
	Pila Oriental			Pila Occidental		
	Sin	Con LRB	%	Sin	Con LRB	%
Coaligna	815,29	758,32	93,0	749,44	755,72	100,8
Duzce	607,27	623,03	102,6	475,25	614,75	129,4
Friuli	904,84	286,90	31,7	786,81	276,59	35,2
Helena	798,09	692,03	86,7	681,15	684,53	100,5
Loma prieta	1258,63	463,45	36,8	1203,60	469,30	39,0
Mammoth	449,68	745,33	165,7	404,38	737,98	182,5
Montenegro	1169,47	804,01	68,7	983,78	798,43	81,2
Pretolia	455,00	837,33	184,0	375,35	833,44	222,0
Umbria	530,51	462,32	87,1	449,98	449,14	99,8
Whittier	819,27	260,43	31,8	687,77	263,04	38,2
Máximos	1258,63	837,33	66,5	1203,60	833,44	69,2

Tabla 22. Porcentaje de ampliación y/o reducción de los Cortantes máximos en dirección transversal del puente para cada pila con aisladores HDRB.

SISMO	Cortantes Máximos en Y [KN]					
	Pila Oriental			Pila Occidental		
	Sin	Con LRB	%	Sin	Con LRB	%
Coaligna	270,00	747,37	276,8	147,43	769,33	521,8
Duzce	204,44	479,12	234,4	123,36	535,84	434,4
Friuli	305,76	166,08	54,3	143,99	168,38	116,9
Helena	257,47	613,91	238,4	120,70	626,80	519,3
Loma prieta	361,76	314,83	87,0	179,80	319,28	177,6
Mammoth	138,83	543,61	391,6	81,21	554,53	682,8
Montenegro	354,75	749,82	211,4	173,03	769,53	444,7
Pretolia	154,91	793,90	512,5	89,33	813,86	911,1
Umbria	173,46	273,37	157,6	112,71	280,67	249,0
Whittier	265,22	141,33	53,3	128,07	140,75	109,9
Máximos	361,76	793,90	219,5	179,80	813,86	452,6

Tabla 23. Comparación de desplazamientos y fuerzas cortantes en dirección longitudinal y transversal del puente (Sin aislamiento vs HDRB).

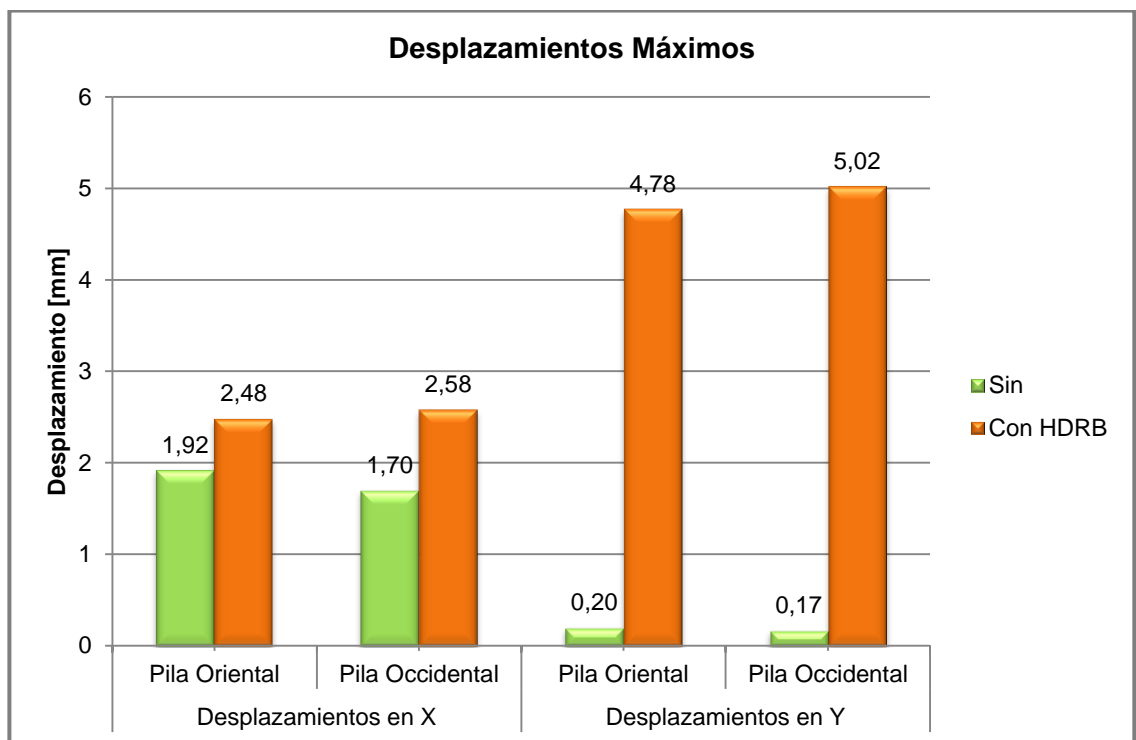
	Pila Oriental			Pila Occidental		
	Sin	Con HDRB	%	Sin	Con HDRB	%
Desplazamiento en X [mm]	1,92	2,48	129	1,70	2,58	152
Desplazamiento en Y [mm]	0,20	4,78	2381	0,17	5,02	2950
Cortante en X [KN]	1258,63	418,41	33	1203,60	423,18	35
Cortante en Y [KN]	361,76	470,99	130	179,80	483,33	269

En la Tabla 23 se puede observar que todos los desplazamientos de las pilas en dirección longitudinal con los aisladores HDRB son mayores pero transversalmente tienen un desplazamiento aún mayor. Entonces al ser muy rígida la estructura los desplazamientos generados son mínimos, mientras que al agregar los aisladores se está flexibilizando la estructura perdiendo rigidez y permitiendo tener mayores desplazamientos tanto longitudinalmente como transversalmente.

Las fuerzas cortantes por otro lado, en dirección longitudinal del puente tienden a disminuir, siendo la pila occidental la que tiene menos reducción (35%) y la pila oriental la que más reducción presenta (33%).

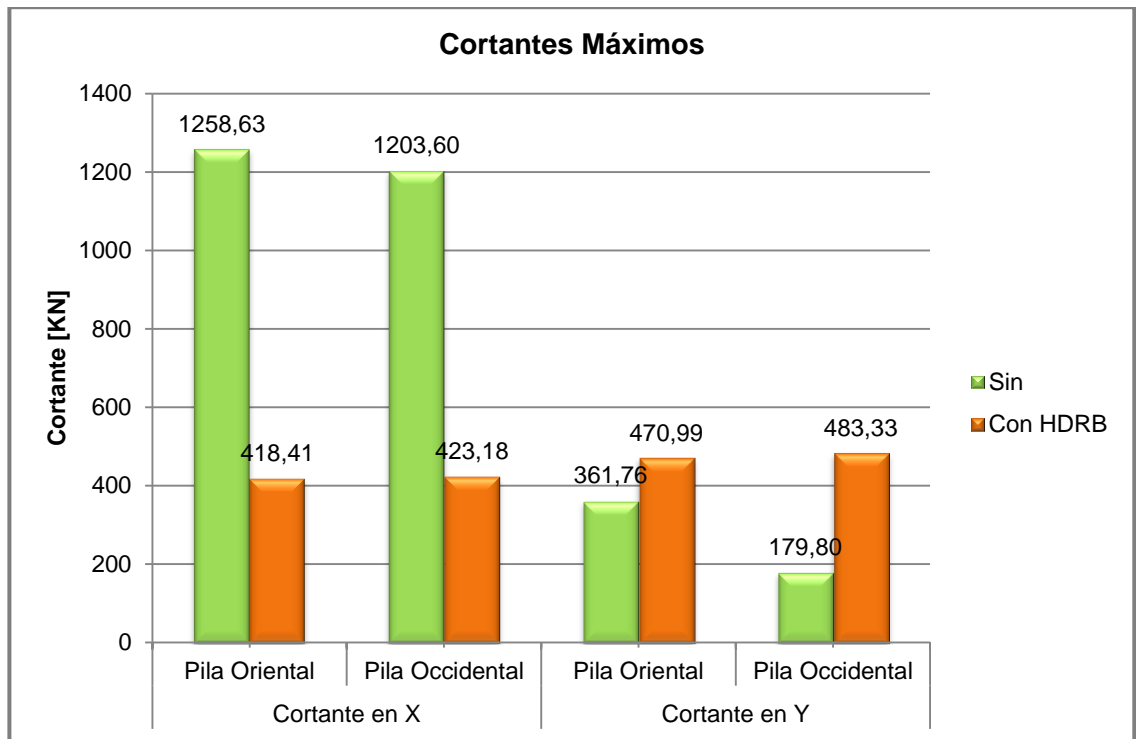
En la Figura 33 y Figura 34 se comparan los desplazamientos y fuerzas cortantes en dirección longitudinal y transversal del puente respectivamente, para los modelos sin aislamiento y con aisladores HDRB.

Figura 33. Comparación de desplazamientos longitudinal y transversalmente (Sin aislamiento vs Aisladores HDRB).



Fuente: Autor.

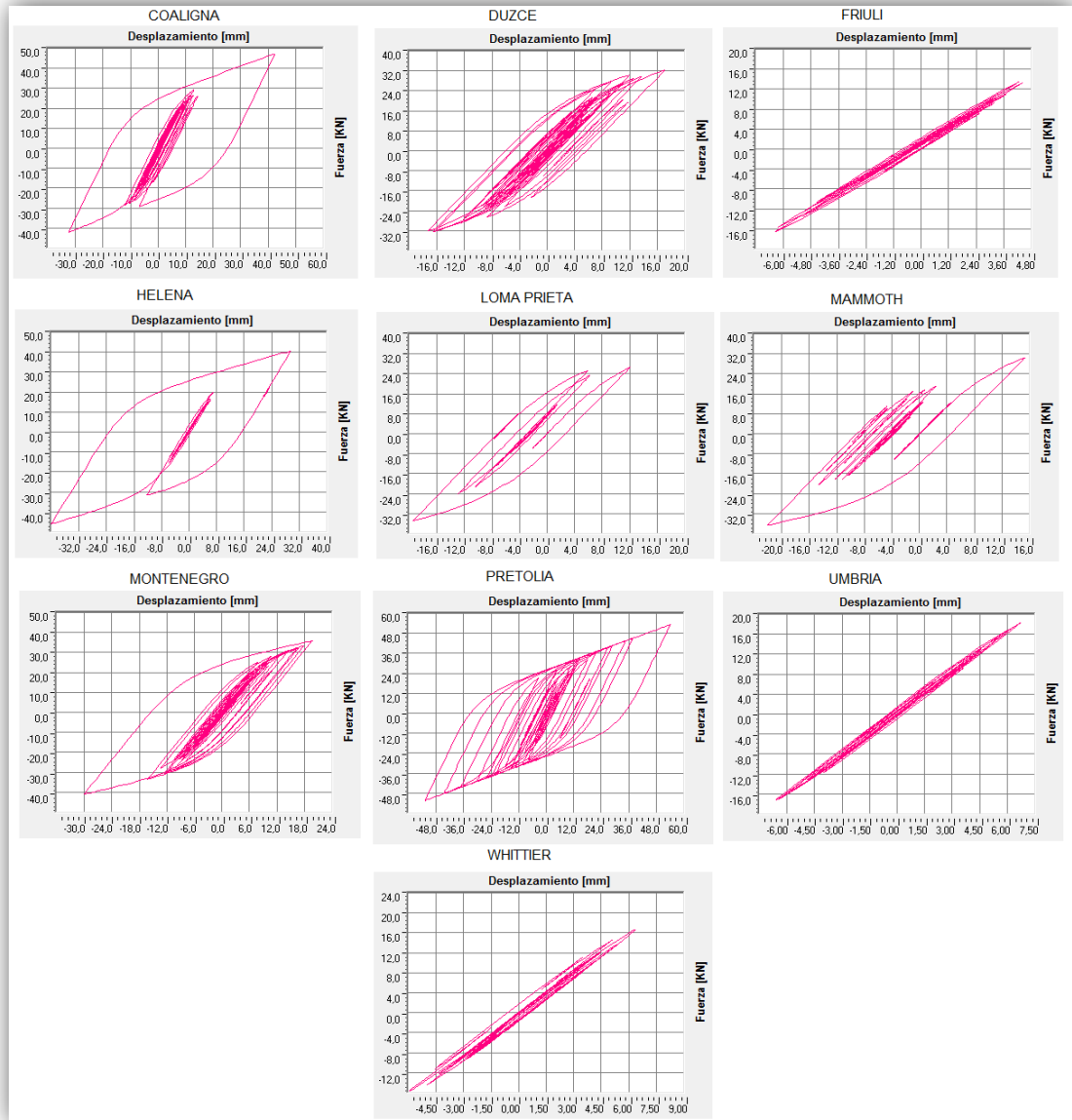
Figura 34. Comparación fuerzas cortantes longitudinal y transversalmente (Sin aislamiento vs Aisladores HDRB).



Fuente: Autor.

Para finalizar el análisis del modelo del puente con aisladores HDRB, a continuación se mostraran algunas curvas de fuerza – desplazamiento para un aislador de base ubicado en la pila oriental para los diferentes sismos, éstas curvas representan los ciclos de carga y descarga a los cuales estarían sometidos los aisladores por efecto de la acción sísmica.

Figura 35. Ciclos de histéresis para un aislador LRB en la pila oriental del puente para los sismos en dirección longitudinal.



Fuente: Autor.

De la Figura 35 se puede concluir los sismos Montenegro, Pretolia y Duzce llevan a que el aislador se comporte dentro del rango de post-fluencia para varios ciclos de carga. Los sismos de Friuli, Umbria y Whittier no llevan a que el aislador supere el rango elástico, mientras que los sismos de Coaligna, Helena, Loma prieta y

Mammoth llevan a que el aislador se comporte dentro del rango elástico pero no durante bastantes ciclos repetidos de carga.

5.5. Modelo con aisladores LRB vs Modelo con aisladores HDRB.

A continuación se compararán periodos, desplazamientos y fuerzas cortantes máximas de modelo con aisladores LRB contra el modelo con aisladores HDRB.

5.5.1. Modos de vibración, Periodos (LRB vs HDRB)

En la Tabla 24. Comparación modos de vibración y periodos LRB vs HDRB. Se muestran los periodos para los dos sistemas y se puede observar que el modo fundamental para ambos sistemas es el modo 2. El sistema que presenta mayores periodos es aquel con los aisladores HDRB.

Tabla 24. Comparación modos de vibración y periodos LRB vs HDRB.

Modo	Periodo LRB [Seg]	Periodo HDRB [Seg]
1	1,41	1,85
2	1,36	1,81
3	0,17	0,18
4	0,16	0,17
5	0,16	0,16

Como ya se había mencionado anteriormente los primeros dos modos de vibración para los dos sistemas de aislamiento son en dirección longitudinal y transversalmente, además para ambos casos el periodo fundamental del puente es el perteneciente al modo 2.

5.5.2. Desplazamientos y Fuerzas Cortantes Máximas (LRB vs HDRB)

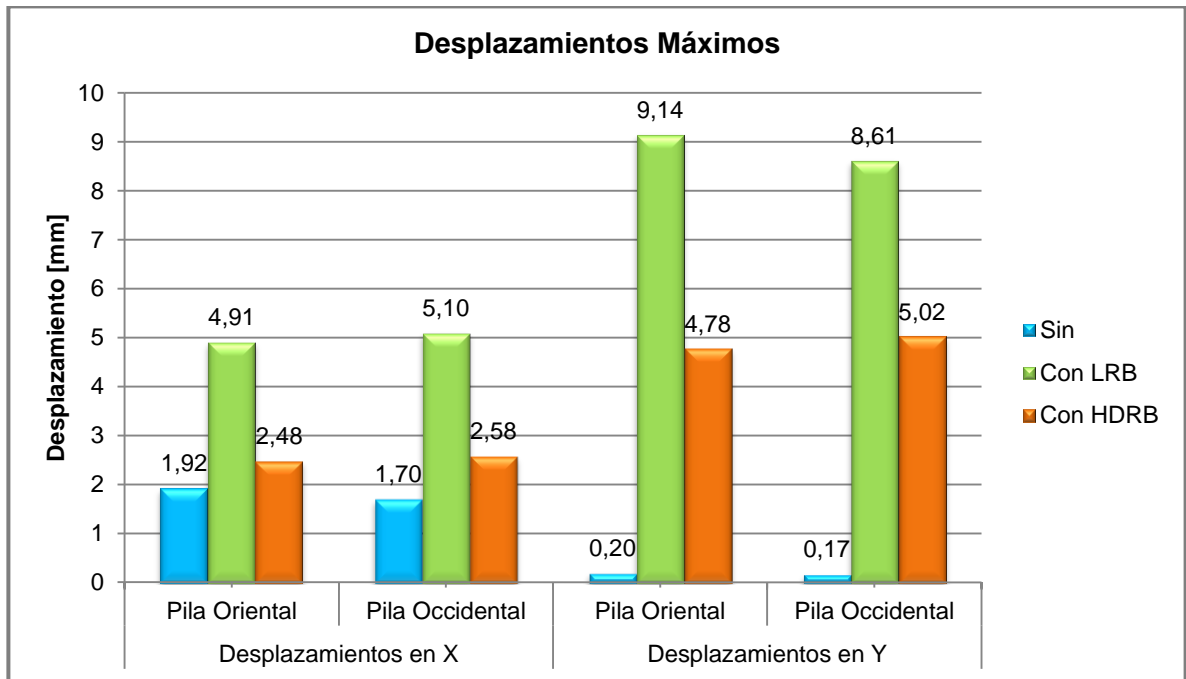
En la Tabla 25 se observan los desplazamientos en dirección longitudinal y transversalmente así como también los cortantes máximos en las mismas direcciones en cada una de las pilas.

Tabla 25. Comparación desplazamientos y fuerzas cortantes máximas en dirección longitudinal y transversal del puente (LRB vs HDRB).

	Pila Oriental			Pila Occidental		
	Sin	Con LRB	Con HDRB	Sin	Con LRB	Con HDRB
Desplazamiento en X [mm]	1,92	4,91	2,48	1,70	5,10	2,58
Desplazamiento en Y [mm]	0,20	9,14	4,78	0,17	8,61	5,02
Cortante en X [KN]	1258,63	837,33	418,41	1203,60	833,44	423,18
Cortante en Y [KN]	361,76	793,90	470,99	179,80	813,86	483,33

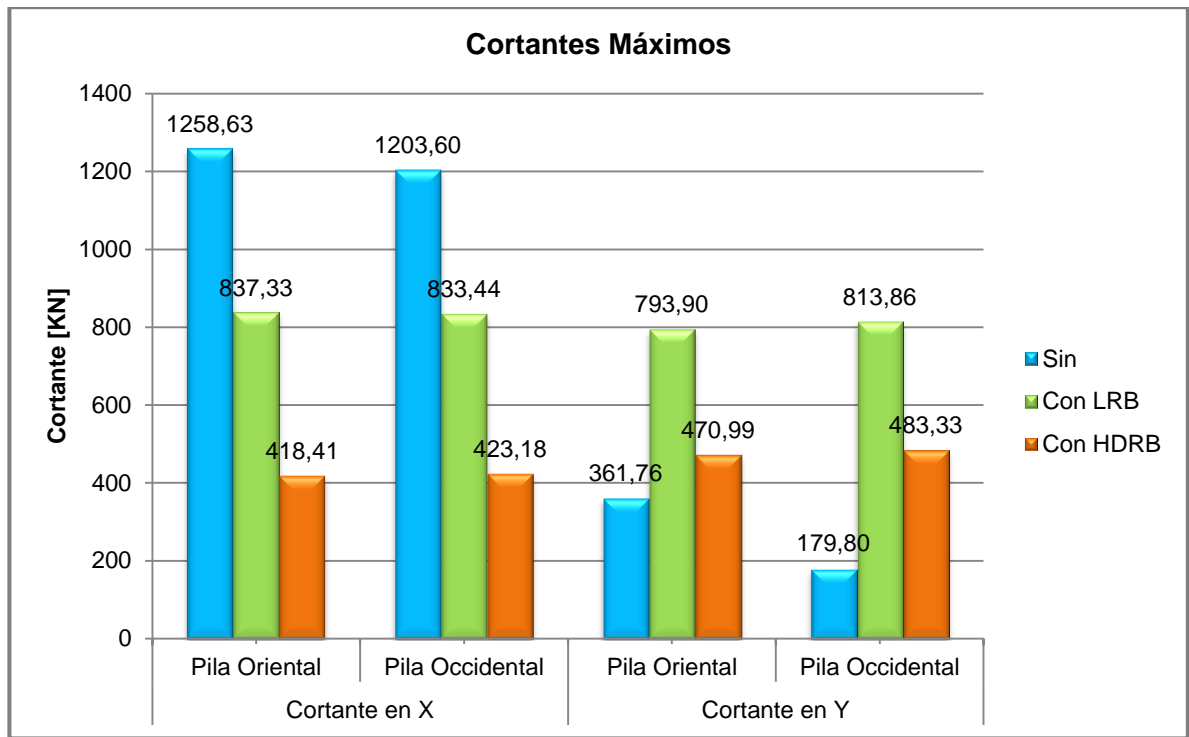
Como se puede observar en la Tabla 15 y la Figura 36 y Figura 37 el sistema que presento mayores desplazamientos y fuerzas cortantes fue el del puente con aisladores LRB, mientras que para el puente con aisladores HDRB los desplazamientos fueron más pequeños y las fuerzas cortantes se redujeron prácticamente a la mitad.

Figura 36. Comparación de desplazamientos en dirección longitudinal y transversal (LRB vs HDRB).



Fuente: Autor.

Figura 37. Comparación de fuerzas cortantes en dirección longitudinal y transversal (LRB vs HDRB).



Fuente: Autor.

6. CONCLUSIONES

Se realizó el modelo en SAP2000 del Intercambiador Vial Reina de la Paz sin aislamiento, con aisladores LRB y con aisladores HDRB y eventualmente se compararon y analizaron los resultados obtenidos para cada uno de los modelos.

Las características mecánicas de los aisladores LRB y HDRB que se definieron usando el modelo bilineal, permitieron representar el comportamiento sísmico de una estructura con aisladores, de esta manera se determinó la reducción de la demanda sísmica para el Intercambiador vial Reina de la Paz para diferentes casos de análisis mediante la comparación de sistemas sin aislamiento, con aisladores LRB y con aisladores HDRB.

Se realizó el Modelamiento del puente con aisladores LRB y HDRB y se compararon con los resultados obtenidos del modelo sin aislamiento, encontrándose que los desplazamientos en las pilas aumentaron debido a la flexibilidad que generan estos dispositivos y que las fuerzas cortantes en la base de las pilas disminuyeron a causa de que los periodos se alargaron, logrando la reducción de la demanda sísmica que se quería verificar.

Se comparó los resultados obtenidos entre el modelo con aisladores LRB y el modelo con aisladores HDRB, obteniéndose que los desplazamientos longitudinales obtenidos con el sistema con HDRB fueron de 2,48 mm en la pila oriental y 2,58 en la pila occidental siendo estos más pequeños que los del sistema LRB, ya que los desplazamientos con aisladores LRB fueron de 4,91 mm en la pila oriental y 5,10 mm en la pila occidental, así como con los desplazamientos las fuerzas cortantes longitudinales que generó el sistema con HDRB fueron aproximadamente la mitad (418,41 KN en la pila oriental y 423,18 KN en la pila occidental) de los del sistema LRB (837,33 en la pila oriental y 833,44 en la pila occidental).

Por otro lado, los desplazamientos en dirección transversal tanto con aisladores LRB como HDRB aumentaron notoriamente en ambas pilas, siendo los desplazamientos con LRB (9,14 mm en la pila oriental y 8,61mm en la pila occidental) el doble que los desplazamientos con HDRB (4,78 mm en la pila oriental y 5,02 mm en la pila occidental), mientras que las fuerzas cortantes en dirección transversal tuvieron el mismo comportamiento que las fuerzas cortantes en dirección longitudinal, siendo las fuerzas cortantes con LRB (793,90 KN en la pila oriental y 813,86 KN en la pila occidental) y con HDRB (470,99 KN en la pila oriental y 483,33 KN en la pila occidental), como consecuencia los aisladores HDRB mejoran la respuesta estructural del Intercambiador Vial Reina de la Paz.

La presencia de este tipo de aisladores hace que los desplazamientos aumenten, además la implementación de aisladores de base elastoméricos (como se puede ver en las tablas de comparación) disminuye notablemente las fuerzas cortantes a las cuales se ve sometida la estructura, lo cual hace que haya un ahorro en materiales de refuerzo contra esfuerzos cortantes y material que conforma en sí mismo el soporte de la estructura

7. RECOMENDACIONES

Se recomienda que en estudios posteriores se realice una investigación más a fondo sobre el dimensionamiento de los aisladores, ya que el no contar con tiempo suficiente y como no era objetivo en este proyecto, las medidas que se establecieron se basaron en dimensiones comerciales teniendo en cuenta la fuerza vertical que tenía que soportar cada aislador.

Si se quieren tomar medidas de prevención para el adecuado funcionamiento de los aisladores, no basta con la estimación realizada en el presente trabajo, sino además se deben realizar diseños especiales de estos a fin de acomodar los desplazamientos y fuerzas cortantes esperadas para el sistema de aislación.

Para lograr una estimación más exacta de la disminución de la demanda sísmica en puentes, se hace necesario el estudio de sistemas de fricción para comparar los resultados obtenidos en la presente tesis con los resultados posteriores y así tener una perspectiva más grande sobre el mejoramiento del comportamiento de la estructura.

8. BIBLIOGRAFÍA

AASHTO. Guide Specifications for Seismic Isolation Design. Third Edition 2010. Pág 1 – 34.

CAHIS CAROLA, Xavier. Desarrollo de un nuevo disipador de energía para diseño sísmico resistente, análisis numérico y validación experimental de su comportamiento (2000). Capítulo 2 Estado actual del Conocimiento. Universidad Politécnica de Cataluña. Pág. 2.1 – 2.21.

CCDSP – 95. Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes de 1995. Título A. Pág (A.1-1) – (A.3-29)

CHENG, Franklin Y & JIANG, Hongping. SMART STRUCTURES, Innovative Systems for Seismic Response Control (2008). Pág 1 – 157.

CORPORACIÓN DE DESARROLLO TECNOLÓGICO. Protección sísmica de estructuras. Sistemas de aislamiento sísmico y disipación de energía. Pág. 13 – 25.

FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY, NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings and NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Reports No. FEMA -274. Building Seismic Safety Council, Washington, DC 1997.

GARCIA REYES, Luis Enrique. Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico (1998). Sección II Sistemas Dinámicos de varios grados de libertad, Capítulo 14 Análisis Modal Cronológico. Pág 423 – 490.

HURTADO, José C; SUÁREZ, Vinicio A. Implementación del diseño directo basado en desplazamientos para puentes con sistemas de aislamiento sísmico (2007). Pág. 2 – 16.

INGEOMINAS, SUBDIRECCIÓN DE AMENAZAS GEOAMBIENTALES. Zonificación Sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga

(2001). Capítulo 3 – Caracterización geotécnica del subsuelo, Capitulo 4 – Respuesta sísmica del subsuelo. Pág 187 – 266.

KUNDE, M.C. Seismic behavior of isolated bridges: A state of the art review (2003).Pág.140-150.

MALDONADO RONDÓN, Esperanza; CHIO CHO, Gustavo. Análisis Sísmico de Edificaciones. Capítulo 3 Estructuras de múltiples grados de libertad. Pág 128 – 133.

MEZA BLANDON, Roger Iván. SANCHEZ GARCIA, Edgard Ezequiel. Guía de diseño sísmico de aisladores elastoméricos y de fricción para la republica de Nicaragua (2010), Capitulo 4 Características Mecánicas y modelo bilineal de los aisladores de base elastoméricos y de fricción, pandeo lateral y desplazamiento crítico. Pág. 64 -100.

MONTANARO, Msc. Ing. María Inés. Sistemas de control de vibración en estructuras de gran altura (2001). Pág 32 – 35.

“NEHRP RECOMMENDED PROVISIONS FOR SEISMIC REGULATIONS FOR NEW BUILDINGS AND OTHER STRUCTURES, Federal Emergency Management Agency (FEMA 450) (2003).

OVIEDO, Juan Andrés. Sistemas De Control De Respuesta Sísmica En Edificaciones (2006). Artículo Revista EIA. Pág. 110.

RENDÓN, Ing. Jorge. El aislamiento sísmico de estructuras. Su aplicación en Colombia. Pág 3 – 101.

SUMMARY OF EVALUATION FINDINGS FOR THE TESTING OF SEISMIC ISOLATION AND ENERGY DISSIPATION DEVICE July 1999. Pág 5 – 15.

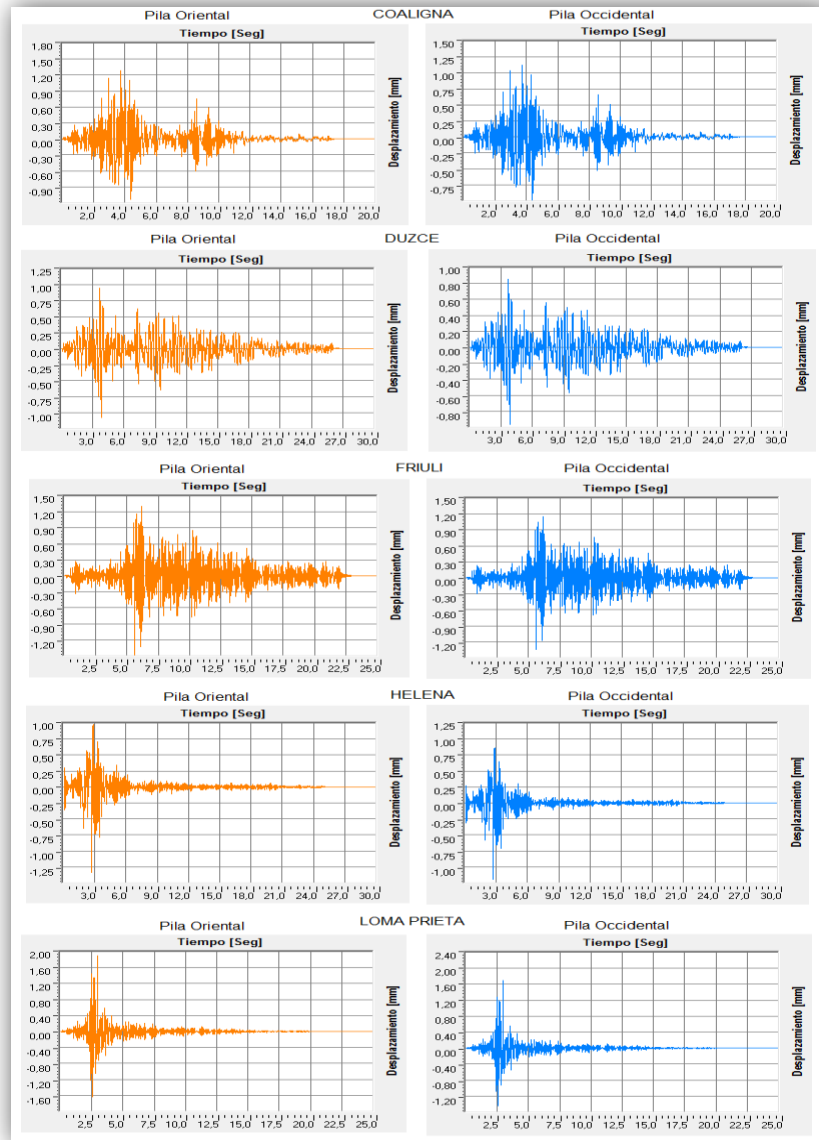
WENYING HU. Analysis Effectiveness of Bridges with Partial Isolation 2008. Pág 5 – 18.

WHITTAKER, Professor Andrew. CONSTANTINOU, Professor Michael. Seismic Isolation of Bridges and Mission – Critical Infrastructure. Department of civil, Structural and Environmental Engineering University at Buffalo. Pág 1 – 19.

9. ANEXOS

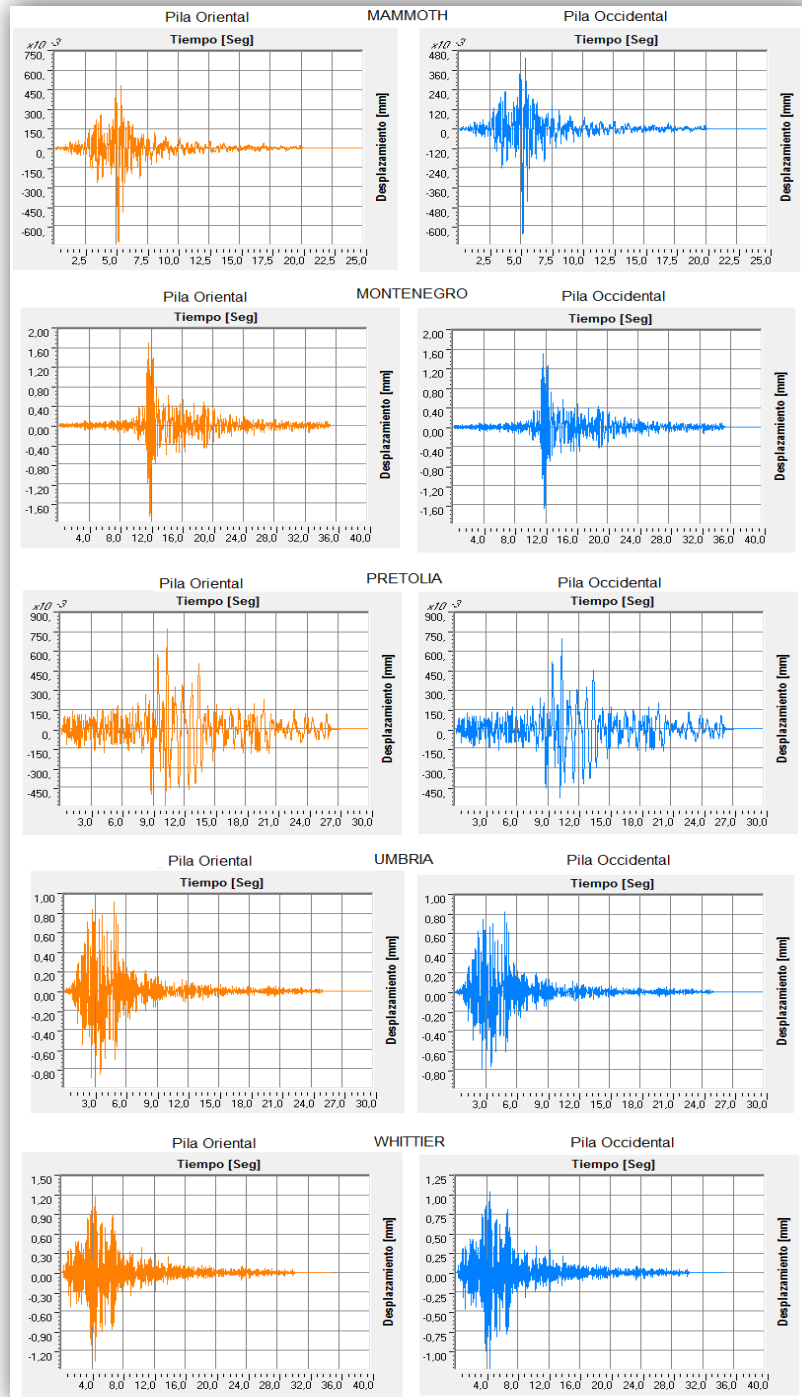
Anexo A. Gráficas de desplazamientos máximos en cada una de las pilas en dirección Longitudinal para cada uno de los sismos.

Figura 38. Desplazamientos en dirección longitudinal del puente para las pilas sin aislamiento sísmico.



Fuente: Autor.

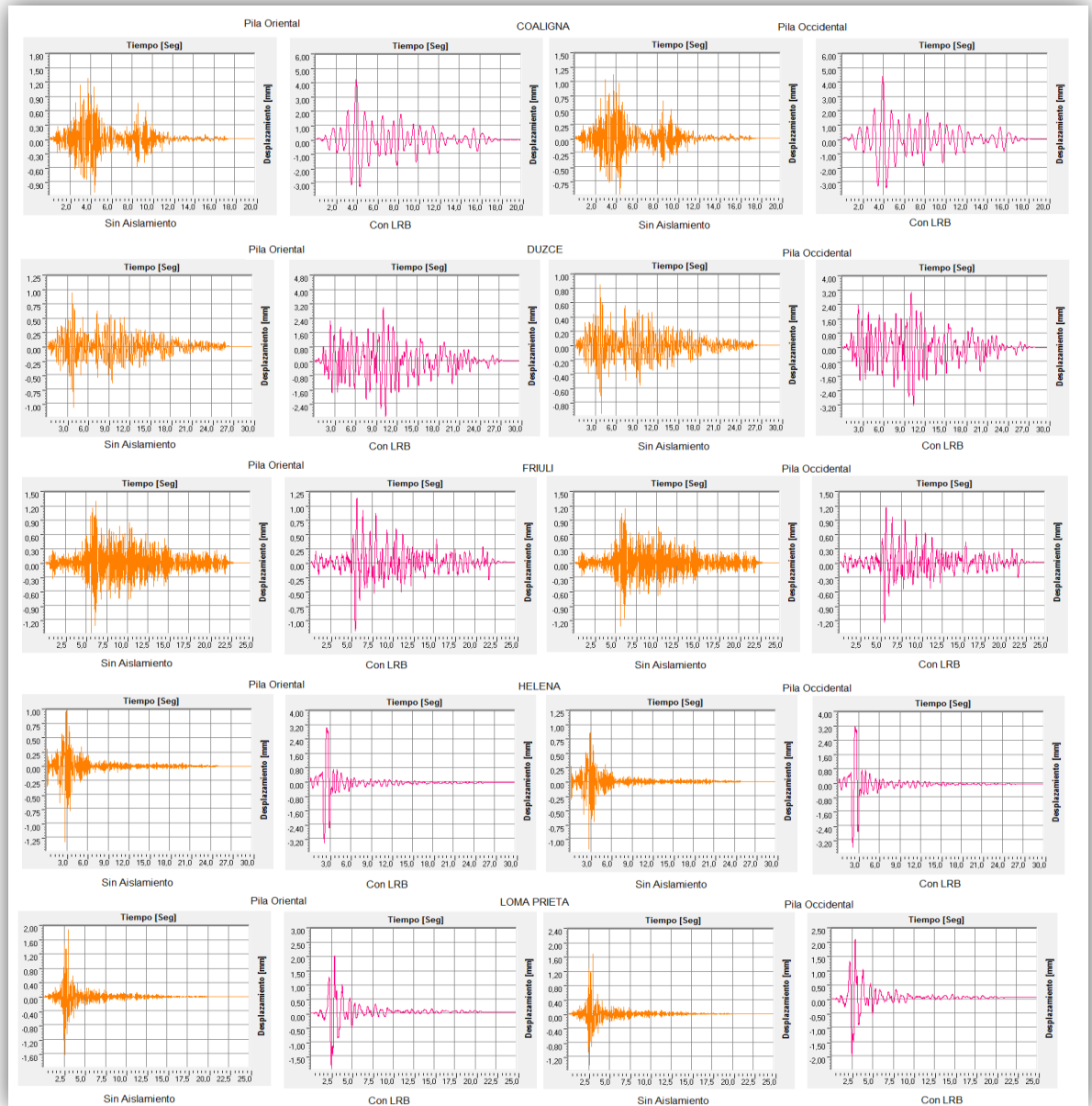
Figura 38. Desplazamientos en dirección longitudinal del puente para las pilas sin aislamiento sísmico.



Fuente: Autor.

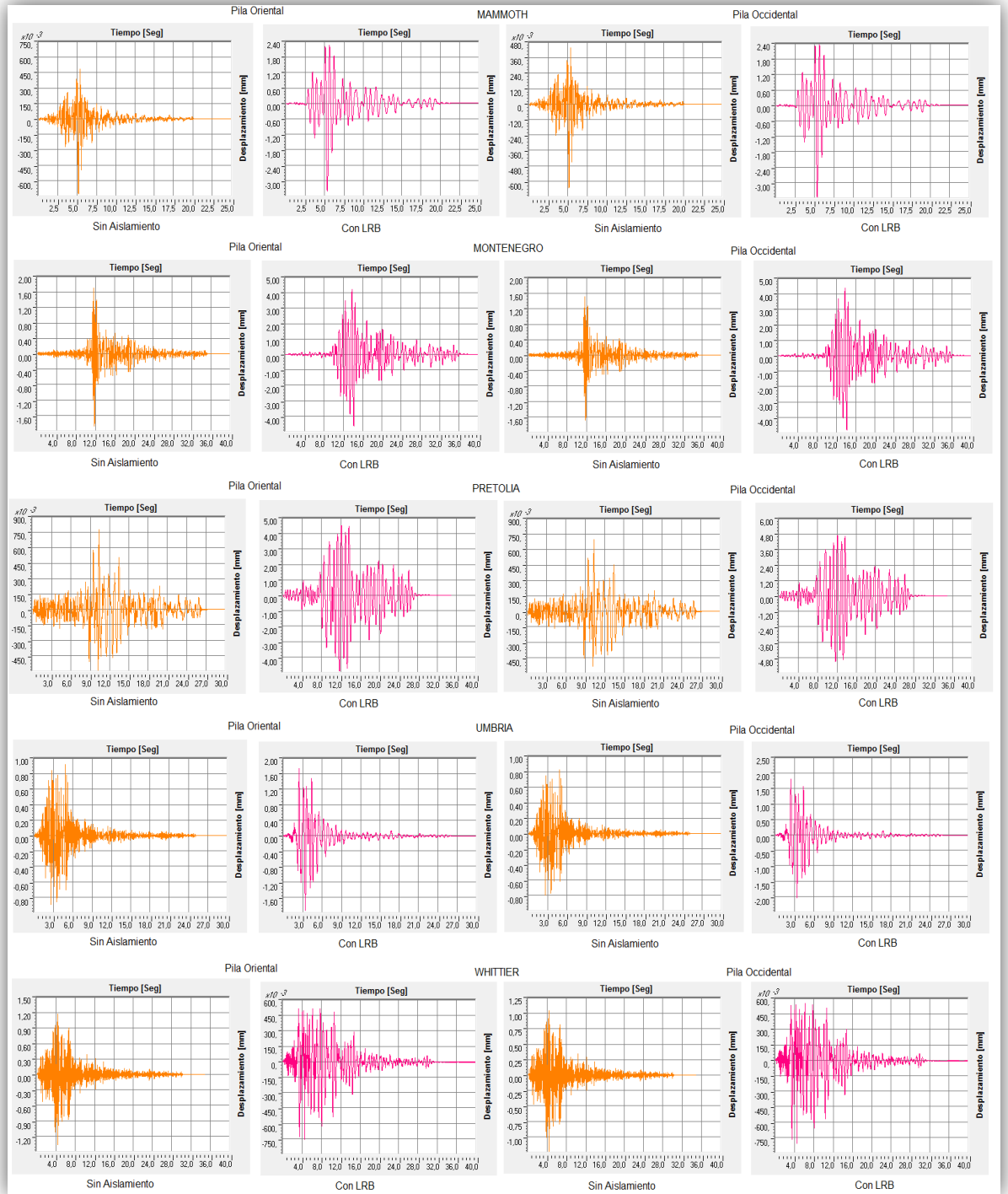
Anexo B. Gráficas de comparación de desplazamientos máximos en cada una de las pilas con aisladores LRB en dirección Longitudinal para cada uno de los sismos.

Figura 39. Comparación de los desplazamientos en dirección longitudinal del puente para las pilas sin aislamiento sísmico vs aisladores LRB.



Fuente: Autor.

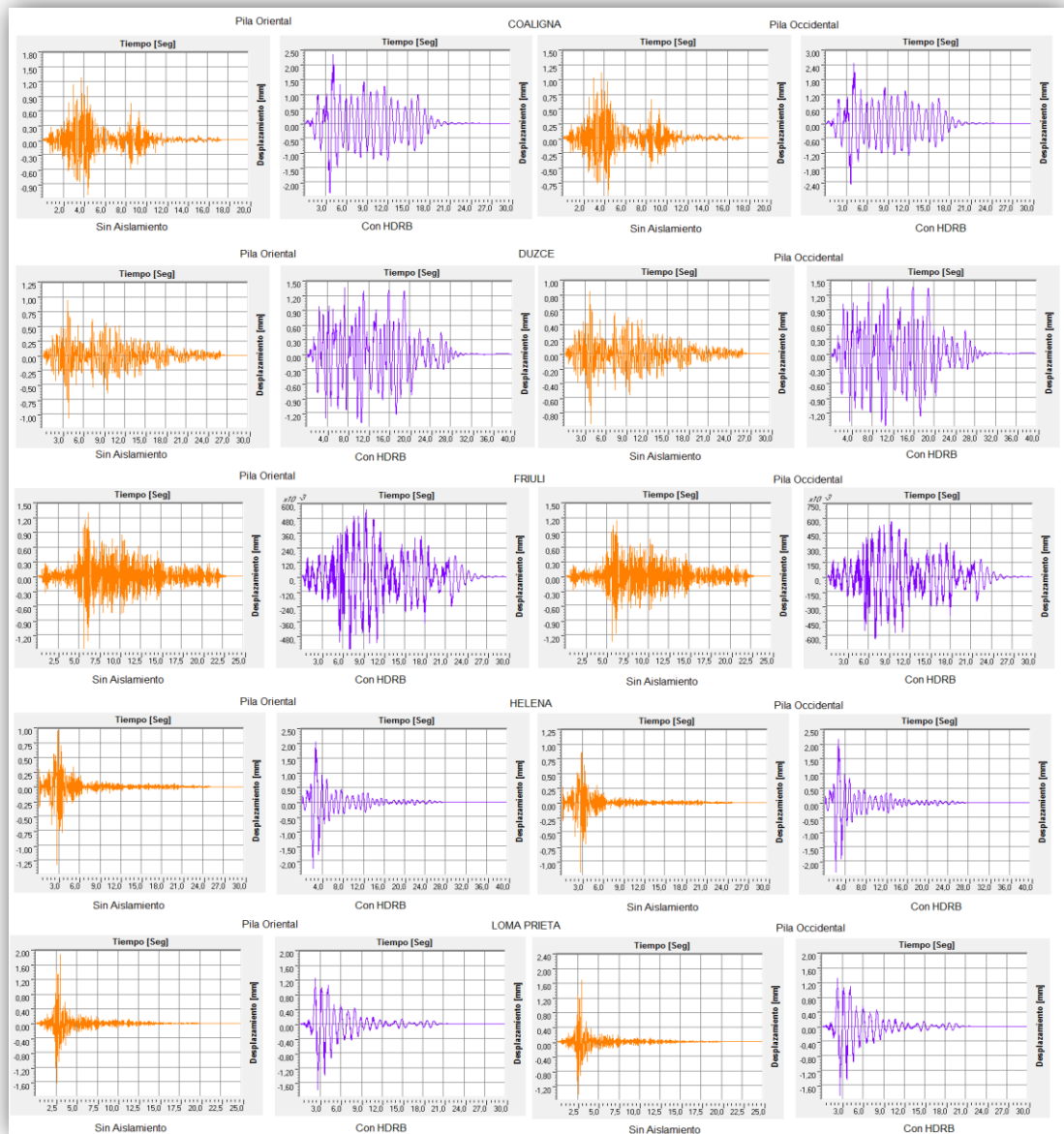
Figura 39. Comparación de los desplazamientos en dirección longitudinal del puente para las pilas sin aislamiento sísmico vs aisladores LRB.



Fuente: Autor.

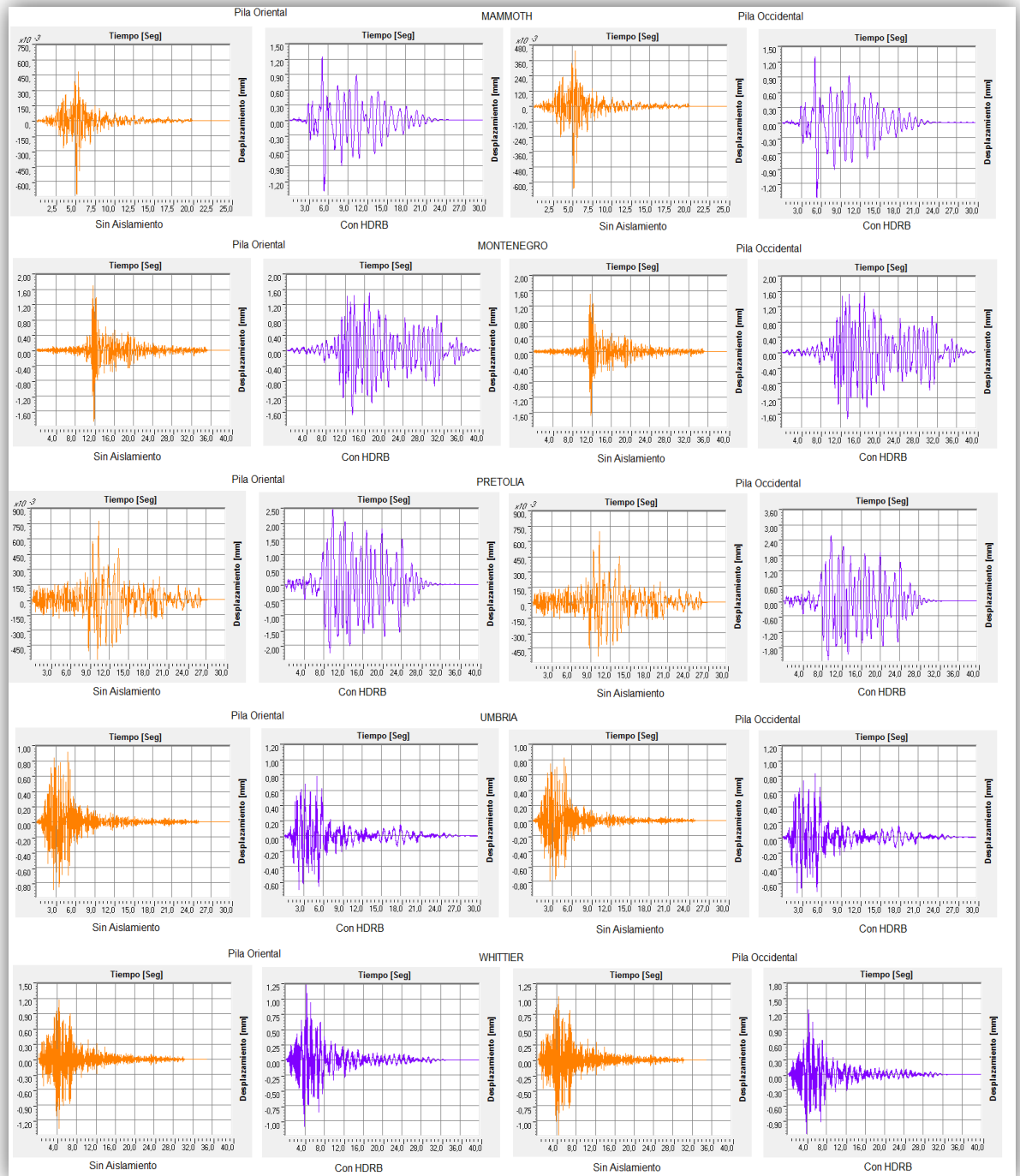
Anexo C. Gráficas de comparación de desplazamientos máximos en cada una de las pilas con aisladores HDRB en dirección Longitudinal para cada uno de los sismos.

Figura 40. Comparación de los desplazamientos en dirección longitudinal del puente para las pilas sin aislamiento sísmico vs aisladores HDRB.



Fuente: Autor.

Figura 40. Comparación de los desplazamientos en dirección longitudinal del puente para las pilas sin aislamiento sísmico vs aisladores HDRB.



Fuente: Autor.