

**ANÁLISIS DINÁMICO LINEAL DE UN PUENTE EN CONCRETO
REFORZADO SIMPLEMENTE APOYADO CON Y SIN AISLADORES DE
BASE (CASO DE ESTUDIO: PUENTE LA FLORA, BUCARAMANGA)**

**NICOLÁS ANDRES BAYONA CESARINO
EYMARD HERNANDO BLANCO FIGUEREDO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
ABRIL DE 2010**

**ANÁLISIS DINÁMICO LINEAL DE UN PUENTE EN CONCRETO
REFORZADO SIMPLEMENTE APOYADO CON Y SIN AISLADORES DE
BASE (CASO DE ESTUDIO: PUENTE LA FLORA, BUCARAMANGA)**

**NICOLÁS ANDRES BAYONA CESARINO
EYMARD HERNANDO BLANCO FIGUEREDO**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Civil**

Directora:

Ph. D. Esperanza Maldonado Rondón

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
ABRIL DE 2010**

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	15
1.1. <i>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN</i>	15
1.2. <i>OBJETIVOS</i>	16
1.2.1. <i>OBJETIVO GENERAL:</i>	16
1.2.2. <i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS:</i>	16
2. ESTADO DEL ARTE	17
2.1. <i>GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE AISLAMIENTO SISMICO EN PUENTES</i> .	17
2.2. <i>TIPOLOGIAS</i>	18
2.2.1. <i>AISLADOR DE CAUCHO DE ALTO AMORTIGUAMIENTO (HIGH-DAMPING RUBBER BEARING HDRB)</i>	18
2.2.2. <i>AISLADOR DE BLOQUES DE CAUCHO CON NÚCLEO DE PLOMO (LEAD - RUBBER BEARING: LRB)</i> .	19
2.2.3. <i>AISLADOR DE PÉNDULO FRICCIONANTE (FRICTION PENDULUM SYSTEM: FPS)</i>	21
3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DEL VIADUCTO LA FLORA.....	25
3.1. <i>GEOMETRÍA, DIMENSIONES, PROPIEDADES DE LOS MATERIALES</i>	25
3.2. <i>MODELO DEL VIADUCTO</i>	28
4. DIMENSIONAMIENTO Y MODELACIÓN DE LOS SISTEMAS DE AISLAMIENTO SISMICO EN SAP 2000	34
4.1. <i>DIMENSIONAMIENTO Y MODELACIÓN DEL AISLADOR ELASTOMÉRICO DE ALTO AMORTIGUAMIENTO (HDRB)</i>	34
4.2. <i>DIMENSIONAMIENTO Y MODELACIÓN DEL AISLADOR ELASTOMÉRICO CON NUCLEO DE PLOMO (LRB)</i>	37
4.3. <i>DIMENSIONAMIENTO Y MODELACIÓN DEL AISLADOR SÍSMICO TIPO PÉNDULO DE FRICCIÓN (FPS)</i>	39
5. DEFINICION Y MODELACIÓN DE LA ACCIÓN SÍSMICA	41
5.1. <i>DEFINICIÓN DE LOS ACELEROGRAMAS</i>	41
5.1.1. <i>DETERMINACIÓN DE ESCENARIOS SÍSMICOS COMPATIBLES</i>	42
5.1.2. <i>ZONAS SISMOGEO TÉCNICAS:</i>	44
5.1.3 <i>ACELEROGRAMAS EN SUPERFICIE</i>	45
6. RESULTADOS COMPARACIÓN Y ANÁLISIS ENTRE LAS SOLUCIONES DE AISLAMIENTO SISMICO DEL MODELO.....	52
6.1. <i>FRECUENCIAS, PERIODOS Y MODOS DE VIBRACIÓN</i>	52
6.1.1. <i>MODELO SIN AISLAMIENTO SÍSMICO</i>	52
6.1.2. <i>MODELO CON DISPOSITIVO DE AISLAMIENTO SÍSMICO HDRB</i>	54

6.1.3. MODELO CON DISPOSITIVO DE AISLAMIENTO SÍSMICO LRB	56
6.1.4. MODELO CON DISPOSITIVO DE AISLAMIENTO SÍSMICO FPS	57
6.2. DESPLAZAMIENTOS.....	60
6.2.1. RESULTADOS PARA SISMOS DE LA FALLA BUCARAMANGA-SANTA MARTA .	61
6.2.2. RESULTADOS PARA LOS SISMOS DE LA FALLA FRONTAL	64
6.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	68
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS .	71
BIBLIOGRAFÍA	73

LISTA DE TABLAS

CAPITULO 3

<i>Tabla 3. 1. Dimensiones Pilas y Zapatas.</i>	<i>27</i>
--	-----------

CAPITULO 6

<i>Tabla 6. 1. Comparación de Frecuencias y periodos HDRB y modelo sin Aislador.</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 6. 2. Comparación de frecuencias y periodos, LRB y modelo sin Aislador.</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 6. 3. Comparación de Frecuencias y periodos, FPS y modelo sin Aislador.</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 6. 4. Desplazamientos máximos.</i>	<i>66</i>

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO 2

<i>Figura 2. 1 Aislador elastomérico de alto amortiguamiento.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2. 2 Comportamiento histerético del HDRB.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2. 3. Aislador Elastomérico con Núcleo de Plomo.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2. 4. Modelo de comportamiento del aislador con histéresis.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2. 5. Aislador Tipo Péndulo de Fricción.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 2. 6. Modelamiento Péndulo de Fricción.</i>	<i>23</i>

CAPITULO 3

<i>Figura 3. 1. Vista longitudinal viaducto La Flora.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3. 2. Corte Transversal Viaducto La Flora.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3. 3. Vistas Laterales de las Zapatas.</i>	<i>27</i>
<i>Figura 3. 4. Vista en planta de las Zapatas.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 3. 5. Modelo del viaducto en SAP</i>	<i>29</i>
<i>Figura 3. 6. Detalle modelo en SAP</i>	<i>29</i>
<i>Figura 3. 7. Sección en los extremos de la viga cabezal.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3. 8. Sección en la luz de la viga cabezal.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3. 9. Definición Sección No Prismática Viga Cabezal.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3. 10. Sección Vigas en el Apoyo.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3. 11. Sección Vigas en la Luz.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3. 12. Ejemplo de sección no prismática para viga de 39m</i>	<i>33</i>

CAPITULO 4

<i>Figura 4. 1. Definición de las propiedades del HDRB en SAP 2000.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4. 2. Definición de propiedades direccionales del HDRB en SAP 2000.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4. 3. Definición de las propiedades del LRB en SAP 2000.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4. 4. Definición de propiedades direccionales del LRB en SAP 2000. ...</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4. 5. Definición de las propiedades del FPS en SAP 2000.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4. 6. Definición de propiedades direccionales del FPS en SAP 2000. ...</i>	<i>40</i>

CAPITULO 5

<i>Figura 5. 1. Acelerogramas de diseño compatibles con escenario sísmico falla Bucaramanga–Santa Marta. De izquierda a derecha y de arriba abajo se presentan los acelerogramas de Helena, Friuli, Mammoth, Coalinga, Whittier y Umbria.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 5. 2. Acelerogramas de diseño compatibles con escenario sísmico falla Frontal. De izquierda a derecha y de arriba abajo se presentan los acelerogramas de Montenegro, Loma Prieta, Pretolia y Dulze.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 5. 3. Acelerogramas compatibles con escenario sísmico falla Bucaramanga-Santa Marta para la zona 1.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 5. 4. Acelerogramas compatibles con escenario sísmico falla Frontal para la zona 1.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 5. 5 Acelerogramas compatibles con escenario sísmico falla Bucaramanga-Santa Marta para la zona 2</i>	<i>47</i>
<i>Figura 5. 6. Acelerogramas compatibles con escenario sísmico falla Frontal para la zona 2</i>	<i>47</i>
<i>Figura 5. 7. Acelerogramas compatibles con escenario sísmico falla Bucaramanga-Santa Marta para la zona 3.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 5. 8. Acelerogramas compatibles con escenario sísmico falla Frontal para la zona 3</i>	<i>48</i>
<i>Figura 5. 9. Ejemplo de definición de un sismo por medio de una función Time History.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 5. 10. Ejemplo de definición de acción sísmica por medio de acelerogramas.</i>	<i>50</i>

CAPITULO 6

<i>Figura 6. 1. Primer modo de vibración de la estructura sin aislamiento sísmico visto en planta.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 6. 2. Segundo modo de vibración de la estructura sin aislamiento sísmico visto en planta.....</i>	<i>53</i>

<i>Figura 6. 3. Tercer modo de vibración de la estructura sin aislamiento sísmico visto en planta.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 6. 4. Cuarto modo de vibración de la estructura sin aislamiento sísmico visto en planta.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 6. 5. Primer modo de vibración de la estructura bajo condiciones de Aislamiento Sísmico con dispositivos HDRB.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 6. 6. Segundo modo de vibración de la estructura bajo condiciones de Aislamiento Sísmico con dispositivos HDRB.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 6. 7. Tercer modo de vibración de la estructura bajo condiciones de Aislamiento Sísmico con dispositivos HDRB.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 6. 8. Cuarto modo de vibración de la estructura bajo condiciones de Aislamiento Sísmico con dispositivos HDRB.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 6. 9. Primer modo de vibración de la estructura bajo condiciones de Aislamiento Sísmico con dispositivos LRB.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 6. 10. Segundo modo de vibración de la estructura bajo condiciones de Aislamiento Sísmico con dispositivos LRB.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 6. 11. Tercer modo de vibración de la estructura bajo condiciones de Aislamiento Sísmico con dispositivos LRB.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 6. 12. Cuarto modo de vibración de la estructura bajo condiciones de Aislamiento Sísmico con dispositivos LRB.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 6. 13. Primer modo de vibración de la estructura bajo condiciones de Aislamiento Sísmico con dispositivos FPS.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 6. 14. Segundo modo de vibración de la estructura bajo condiciones de Aislamiento Sísmico con dispositivos FPS.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 6. 15. Tercer modo de vibración de la estructura bajo condiciones de Aislamiento Sísmico con dispositivos FPS.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 6. 16. Cuarto modo de vibración de la estructura bajo condiciones de Aislamiento Sísmico con dispositivos FPS.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 6. 17. Frecuencias Propias y Modos de Vibración.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 6. 18. Desplazamientos para Coalinga.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 6. 19. Desplazamientos para Friulli.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 6. 20. Desplazamientos para Helena.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 6. 21. Desplazamientos para Mammoth.....</i>	<i>62</i>

<i>Figura 6. 22. Desplazamientos para Umbria.</i>	63
<i>Figura 6. 23. Desplazamientos para Whitthier.</i>	63
<i>Figura 6. 24. Desplazamientos para Duzce.</i>	64
<i>Figura 6. 25. Desplazamientos para Loma Prieta.</i>	64
<i>Figura 6. 26. Desplazamientos para Montenegro.</i>	65
<i>Figura 6. 27. Desplazamientos para Pretolia.</i>	65
<i>Figura 6. 28. Desplazamientos Máximos.</i>	67

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DINÁMICO LINEAL DE UN PUENTE EN CONCRETO REFORZADO SIMPLEMENTE APOYADO CON Y SIN AISLADORES DE BASE (CASO DE ESTUDIO: PUENTE LA FLORA, BUCARAMANGA)*

AUTORES:

BAYONA CESARINO, Nicolás Andrés**

BLANCO FIGUEREDO, Eymard Hernando**

PALABRAS CLAVES: Puente La Flora, Aislamiento sísmico, Aislador, Modelo, Péndulo friccionante, Elastomérico.

Los puentes, al igual que las demás obras civiles, representan un factor muy importante en la economía y desarrollo de una población, es por esto que su análisis y adecuado mantenimiento es de suma importancia para que a lo largo de su vida útil presten un adecuado servicio.

Así mismo la respuesta sísmica que estos ofrecen, representa el factor más importante en el desempeño, es por esto que a medida que avanza el tiempo y se implementan nuevas tecnologías, es necesario adoptar medidas que permitan un comportamiento más adecuado de las estructuras.

El presente trabajo de grado tiene como finalidad la realización de un análisis comparativo de soluciones para diferentes condiciones propuestas para el caso de estudio seleccionado.

En este documento se presenta un análisis dinámico lineal aplicado a un modelo elaborado en elementos finitos en 3D para el puente La Flora en Bucaramanga, Colombia.

Así mismo es presentada la forma de cálculo de las diferentes propiedades de rigidez necesarias para la implementación de los sistemas de aislamiento sísmico, así como las diferentes tipologías estudiadas de dichos sistemas como el péndulo friccionante y aisladores elastoméricos.

Como parte final, se analiza el comportamiento de una estructura relativamente antigua, el puente La Flora, bajo la implementación de diferentes sistemas de aislamiento sísmico con sistemas de péndulo friccionante y aisladores elastoméricos. En este se comparan las respuestas del puente con aisladores y sin ellos, presentándose la forma de introducción de los datos necesarios para los diferentes casos en un software especializado en análisis estructural.

* Proyecto de Grado

** Universidad industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Directora: Esperanza Maldonado Rondón, Co-Director: Leocadio Rico Pradilla.

ABSTRACT

TÍTULO: LINEAR DYNAMIC ANALYSIS OF A REINFORCED CONCRETE BRIDGE SIMPLY SUPPORTED WITH AND WITHOUT BASE ISOLATORS (CASE OF STUDY: LA FLORA BRIDGE, BUCARAMANGA) *

AUTHORS:

BAYONA CESARINO, Nicolás Andrés**

BLANCO FIGUEREDO, Eymard Hernando**

KEY WORDS: La Flora Bridge, Seismic Isolation, Isolator, Model, Frictional Pendulum, Elastomeric.

Bridges, like other civil works represent a very important factor in a population economy and development, which is why their analysis and proper maintenance is critical to provide an adequate service. Also, seismic response they offer represents the most important factor in its performance, which is why as time goes on and new technologies are implemented, it is necessary to take considerations to guarantee a better behavior of structures.

This graduate work is aimed at carrying out a comparative analysis of solutions for different conditions proposed for the selected case of study. This paper presents a nonlinear dynamic analysis applied to a model developed in 3D finite element for La Flora Bridge in Bucaramanga, Colombia.

Also, here is presented how to calculate the different rigidity properties for seismic isolation systems implementation and different types of such systems are studied like frictional pendulum and elastomeric isolators.

As a final part, the behavior of a relatively old structure, La Flora Bridge is analyzed, in the implementation of various seismic isolation systems. Here the responses of the bridge with isolators and without them are compared, presenting the form of data entry required for different cases in specialized structural analysis software.

* Grade Work.

** Universidad Industrial de Santander, Faculty of Physical-Mechanical Engineers, Faculty of Civil Engineering. Director: Esperanza Maldonado Rondón, Co-Director: Leocadio Rico Pradilla.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Los puentes, al igual que las demás obras civiles, representan un factor muy importante en la economía y desarrollo de una población, es por esto que su análisis y adecuado mantenimiento es de suma importancia para que a lo largo de su vida útil presten un adecuado servicio.

La evolución y desarrollo de una sociedad conlleva a diferentes factores de suma importancia para las construcciones, en el caso de los puentes, a medida que la sociedad se desarrolla, las solicitudes se incrementan, ya sea por el aumento de tráfico o nuevos diseños de vehículos. Factores que influirán tarde o temprano en la vida útil de la estructura.

Así mismo la respuesta sísmica que estos ofrecen, representa el factor más importante en el desempeño, es por esto que a medida que avanza el tiempo y se implementan nuevas tecnologías, es necesario adoptar medidas que permitan un comportamiento más adecuado de las estructuras.

En este proyecto se analizará el comportamiento de una estructura relativamente antigua, el puente La Flora, bajo la implementación de diferentes sistemas de aislamiento sísmico. En este se comparará las respuestas del puente con aisladores y sin ellos, y se encontrara soluciones concretas con el fin de demostrar la necesidad y favorabilidad que ofrecen estos sistemas.

Finalmente, se espera que este estudio sea el punto de partida, para que se analice la factibilidad de su implementación en un futuro próximo.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General:

Comparar mediante un análisis dinámico lineal la respuesta sísmica de un puente de concreto reforzado de vigas simplemente apoyadas con y sin implementación de sistemas de aislamiento de base.

1.2.2. Objetivos Específicos:

- Conocer la respuesta dinámica del Puente La Flora bajo las condiciones actuales.
- Conocer la respuesta dinámica del Puente La Flora bajo la implementación de aislamiento de base.
- Realizar un análisis por elementos finitos en 3D del Puente La Flora con y sin condiciones de aislamiento de base.
- Comparar los comportamientos del Puente La Flora obtenidos mediante los análisis mencionados anteriormente.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE AISLAMIENTO SISMICO EN PUNTES

Actualmente las consideraciones de diseño estructural en los diferentes códigos colombianos plantean un diseño estructural resistente a la acción sísmica sustentado principalmente en las propiedades físicas de los materiales. Esta respuesta se ve reflejada en el comportamiento elástico de las estructuras de tal forma que, aunque la respuesta estructural puede ser satisfactoria en cuanto a la protección de la integridad física de los usuarios, en el momento del sismo, desemboca generalmente en una estructura deformada, fisurada y, en otras palabras inútil.

A medida que la ingeniería sísmica y estructural han avanzado de la mano, han surgido diferentes soluciones de diseño que contemplan distintos aspectos como la disipación de energía y el aislamiento sísmico, las cuales proporcionan un notable mejoramiento en la respuesta de las estructuras sometidas a la acción sísmica.

Los dispositivos disipadores de energía se encargan de absorber el input energético proveniente del sismo protegiendo así la estructura de éste; por otro lado, los sistemas de aislamiento sísmico se caracterizan por modificar el input energético. Esta modificación se logra permitiendo un mayor movimiento horizontal de la estructura al separarla de su fundación.

En el caso de los puentes, este aislamiento se hace generalmente en la interfaz tablero-pila, ya que la concentración de masa se encuentra en la parte superior de la estructura, logrando así, mayores desplazamientos en el tablero por medio de los cuales se reducen los esfuerzos transmitidos a las pilas, teniendo esto directa incidencia en los esfuerzos transmitidos a la fundación.

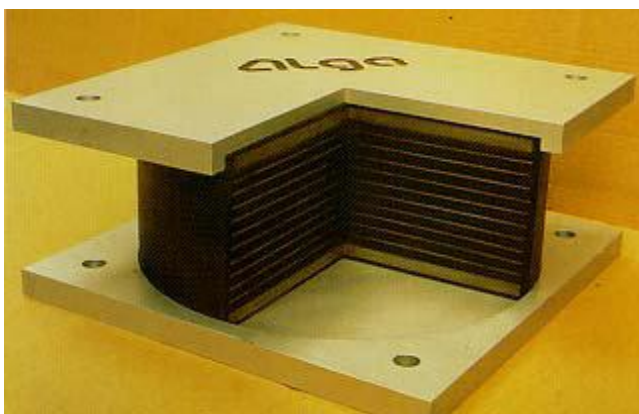
2.2. TIPOLOGIAS

2.2.1. Aislador de caucho de alto amortiguamiento (High-damping rubber bearing HDRB).

Los dispositivos HDRB están constituidos por láminas de caucho HDR (High Damping Rubber) intercaladas con placas vulcanizadas de acero. El caucho HDR presenta un amortiguamiento de orden del 10% al 20%, conseguida gracias a la utilización de aditivos, tales como carbono, pétreos y resinas. El espesor de las capas de caucho varía, normalmente, entre los 8 y 20 mm, y el espesor de la capa de acero oscila entre los 2 y los 4 mm.

La presencia de las capas de acero en este dispositivo tiene como fin principal dificultar la deformación de las capas de caucho, soportando de esta forma, elevadas cargas axiales sin excesivas deformaciones.

Figura 2. 1 Aislador elastomérico de alto amortiguamiento.



Fuente:

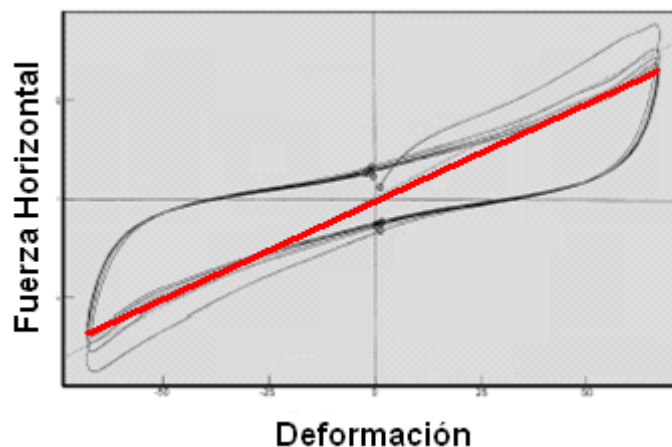
[HTTP://WWW.SIRVE.CL/INFORMACION_TECNICA/AISLACION_SISMICA/CONTENIDO_IT_AISLACION.HTM](http://www.sirve.cl/informacion_tecnica/aislacion_sismica/contenido_it_aislacion.htm)

Los dispositivos de caucho de alto amortiguamiento presentan, además del amortiguamiento, las siguientes propiedades:

- Módulo de deformación (G) entre 0,4 MPa y 1,4 MPa
- La rigidez disminuye con el aumento de la deformación
- Para grandes deformaciones, la rigidez vuelve a aumentar.

La disipación de energía realizada en este tipo de dispositivos no puede ser considerada como sólo viscosa, ya que también ocurre una disipación de energía relativa a un comportamiento histerético. De cualquier manera, el comportamiento lineal viscoso recrea una conveniente representación matemática del sistema. Esta afirmación se encuentra justificada en la siguiente figura en la cual se muestra la disipación realizada por un dispositivo HDRB.

Figura 2. 2 Comportamiento histerético del HDRB.



Fuente: Ferreira 2007.

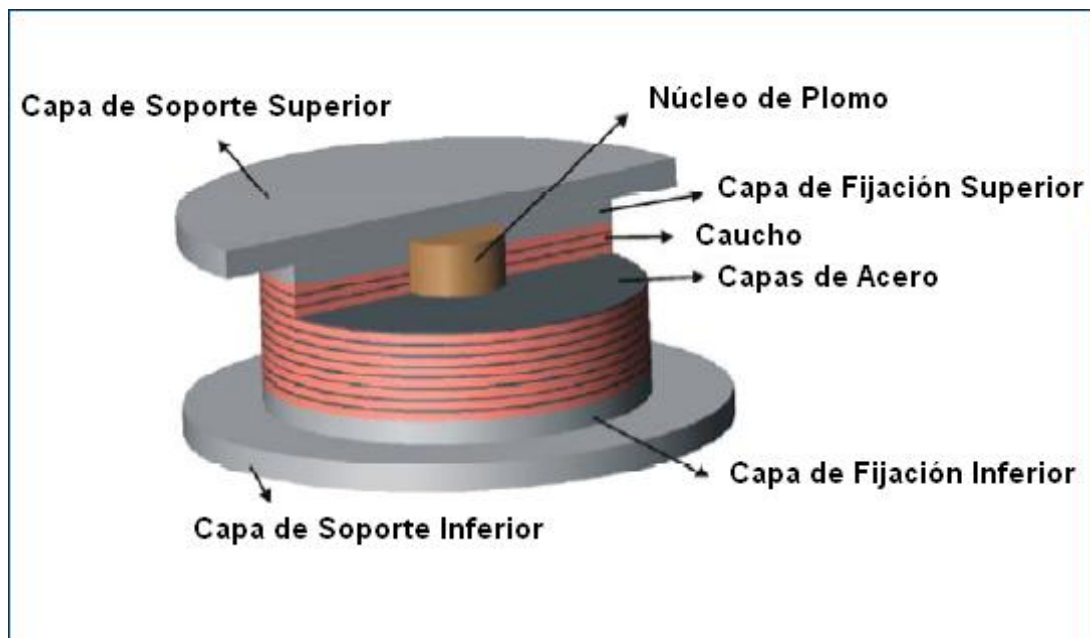
2.2.2. Aislador de bloques de caucho con núcleo de plomo (Lead - rubber bearing: LRB).

El dispositivo LRB está compuesto por bloques de caucho, donde es introducido un núcleo cilíndrico de plomo. En su proceso de fabricación es necesario que el hueco realizado en el caucho sea más pequeño que el diámetro del elemento de plomo, para que de este sea forzado a entrar. Esta

característica garantiza la uniformidad del bloque y la consiguiente deformación por cortante de todo el volumen del núcleo de plomo.

La plastificación del núcleo de plomo garantiza elevados valores de amortiguamiento, que originan, no sólo menores desplazamientos de la superestructura, sino también mayor rigidez lateral del tablero para niveles bajos de acciones horizontales.

Figura 2. 3. Aislador Elastomérico con Núcleo de Plomo.



Fuente: Ferreira 2007.

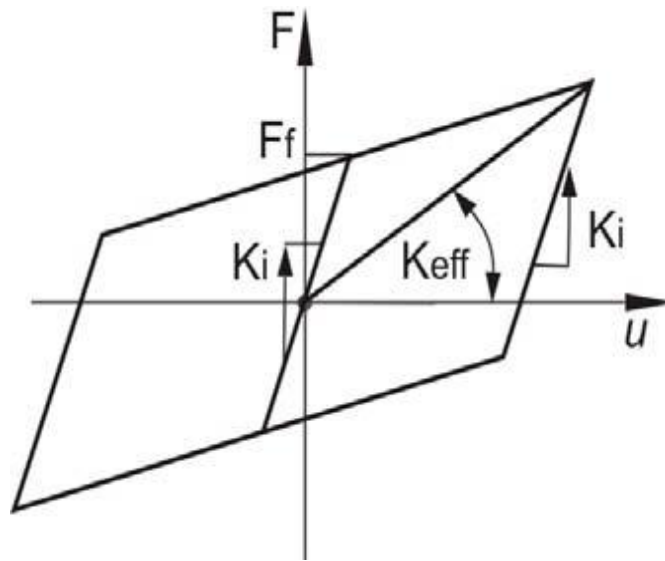
La tensión de cadencia a cortante del núcleo de plomo es de, aproximadamente 10MPa. Sobrepassado este valor, la rigidez del dispositivo es la rigidez del caucho, lo que proporciona al dispositivo una rigidez bi-lineal. Este comportamiento es excelente, incluso a bajas temperaturas, pues el caucho presenta buenas características de resistencia a fatiga bajo estas condiciones.

La rigidez inicial del aparato LRB es cerca de 10 veces superior a la rigidez post-elástica, resultante de la cadencia del núcleo de plomo.

Este tipo de sistema de aislamiento sísmico es la solución más utilizada en puentes, dada su simplicidad, comportamiento y bajo costo.

El amortiguamiento de un LRB se mide por su capacidad de disipar energía que, a su vez, es obtenida por el área del gráfico fuerza-desplazamiento.

Figura 2. 4. Modelo de comportamiento del aislador con histéresis.



Fuente: Ferreira 2007.

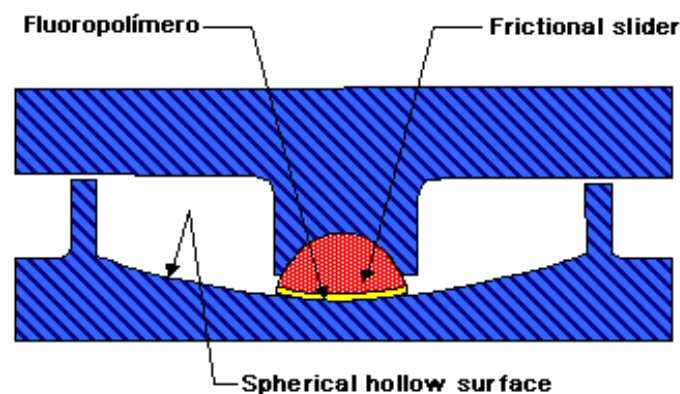
Donde K_i es la rigidez inicial, K_{eff} la rigidez efectiva y F_f la carga de fluencia del núcleo de plomo.

2.2.3. Aislador de péndulo friccionante (Friction pendulum system: FPS).

Este sistema fue desarrollado durante los años '80 en Estados Unidos (BOZZO, 1996).

Los sistemas de péndulo de fricción o FPS debido a las siglas de su nombre en inglés (Friction pendulum system) son aisladores sísmicos de tipo deslizantes los cuales consisten en un deslizador de forma lenticular que se mueve sobre una superficie cóncava y una platina de cubierta como se muestra en la Figura 2.5. El deslizador es de forma lenticular debido a que así se logra un área de contacto sobre la superficie cóncava mejorando el comportamiento de un deslizador completamente esférico, la razón de mejoramiento se deba a que este solo estaría en contacto en un punto lo cual impide que la superficie se raye y esto influya en el desplazamiento del deslizador. El mecanismo del péndulo friccionante durante la ocurrencia de un sismo funciona de la siguiente forma: el patín esférico se desliza en la superficie cóncava lo cual provoca que la estructura tenga pequeños movimientos pendulares como se muestra en la Figura 2.6. La energía que ingresa proveniente del sismo es absorbida por el amortiguamiento generado por la fricción dinámica. Por lo cual, las fuerzas y movimientos laterales transmitidos a la estructura se reducen de manera apreciable.

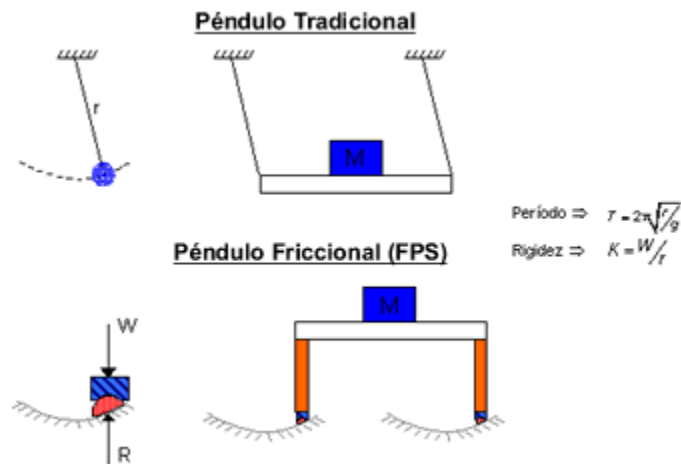
Figura 2. 5. Aislador Tipo Péndulo de Fricción.



Fuente:

[HTTP://WWW.SIRVE.CL/INFORMACION_TECNICA/AISLACION_SISMICA/CONTENIDO_IT_AISLACION.HTM](http://www.sirve.cl/informacion_tecnica/aislacion_sismica/contenido_it_aislacion.htm)

Figura 2. 6. Modelamiento Péndulo de Fricción.



Fuente:

[HTTP://WWW.SIRVE.CL/INFORMACION_TECNICA/AISLACION_SISMICA/CONTENIDO_IT_AISLACION.HTM](http://www.sirve.cl/informacion_tecnica/aislacion_sismica/contenido_it_aislacion.htm)

En el diseño del péndulo friccionante el periodo, la capacidad de desplazamiento y la capacidad a tensión del aislador pueden seleccionarse de forma independiente lo cual simplifica su diseño.

El periodo natural T del aislador depende del radio de curvatura de la superficie cóncava, R, así:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (1)$$

Siendo g la aceleración de la gravedad. Como se puede observar el periodo no depende de la masa de la estructura soportada.

La rigidez lateral del aislador K_b , la cual proporciona la capacidad de restauración del sistema, es:

$$K_b = \frac{m_t g}{R} \quad (2)$$

Donde $m_t g$ es el peso de la estructura representada en la ecuación del modelo matemático asociado al aislador FPS (ACHISINA, 2001; BOZZO, 1996):

$$f_r = K_b x + \mu m_t g \text{sign}(\dot{x}) \quad (3)$$

Para el diseño de los aisladores FPS se recomienda que la presión de contacto entre el Teflón y el acero no exceda los 40 MPa (ACHISINA, 2001), y el coeficiente de fricción μ se encuentre dentro del rango de 0.05 a 0.15 (BOZZO, 1996). Valores por debajo de este rango pueden provocar que la estructura sea susceptible a moverse por acción del viento. Por otra parte, valores sobre el rango bloquean el deslizamiento, cancelando la mecánica aisladora (BOZZO, 1996).

3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DEL VIADUCTO LA FLORA

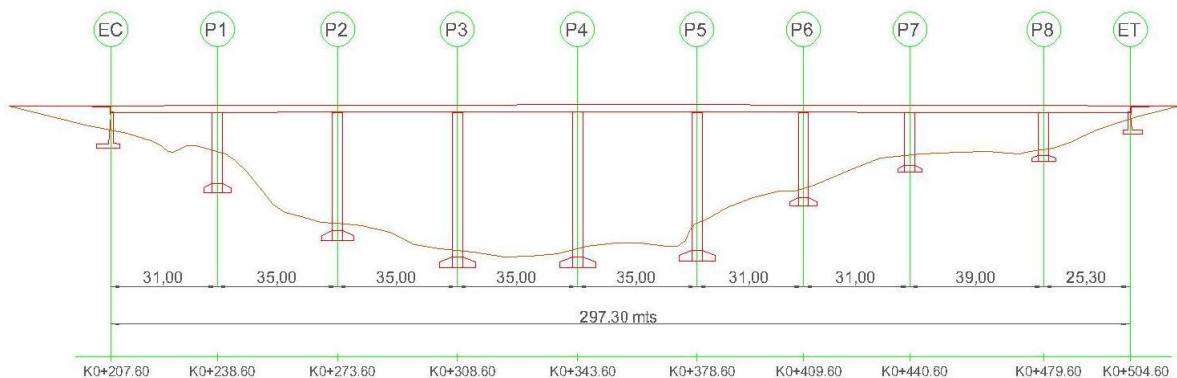
3.1. GEOMETRÍA, DIMENSIONES, PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.

La estructura del Viaducto La Flora está construida en concreto pretensado. Su longitud es de 298.30 metros y se encuentra apoyada sobre ocho pilares y dos estribos.

El tablero está dividido en tres secciones, es decir, presenta cuatro juntas físicas, para garantizar la transmisión de esfuerzos axiales hacia los tableros adyacentes, ubicados, dos en los extremos y dos en los apoyos 3 y 6.

El viaducto presenta una altura aproximada de 46.0 metros tomando como referencia el pilar más alto, el cual corresponde al eje 4 y la luz más grande es de 39.0 metros, ubicada entre los ejes 7 y 8. En la Figura 3.1, se puede observar el perfil longitudinal del viaducto La Flora.

Figura 3. 1. Vista longitudinal viaducto La Flora.

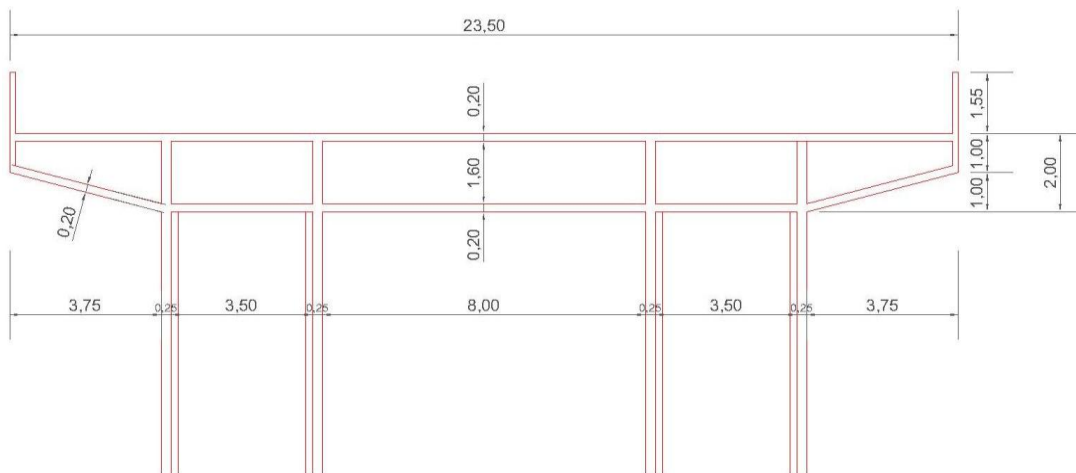


Fuente: Los Autores.

El ancho total del tablero es de 23.50 metros distribuidos en tres carriles y dos senderos peatonales en los extremos tal y como se muestra en la Figura 3.2.

La losa se encuentra apoyada sobre una viga cabezal soportada por dos columnas originando así la conformación de una pila tipo pórtico, la cual se muestra en la Figura 3.2.

Figura 3. 2. Corte Transversal Viaducto La Flora.



Fuente: Los Autores.

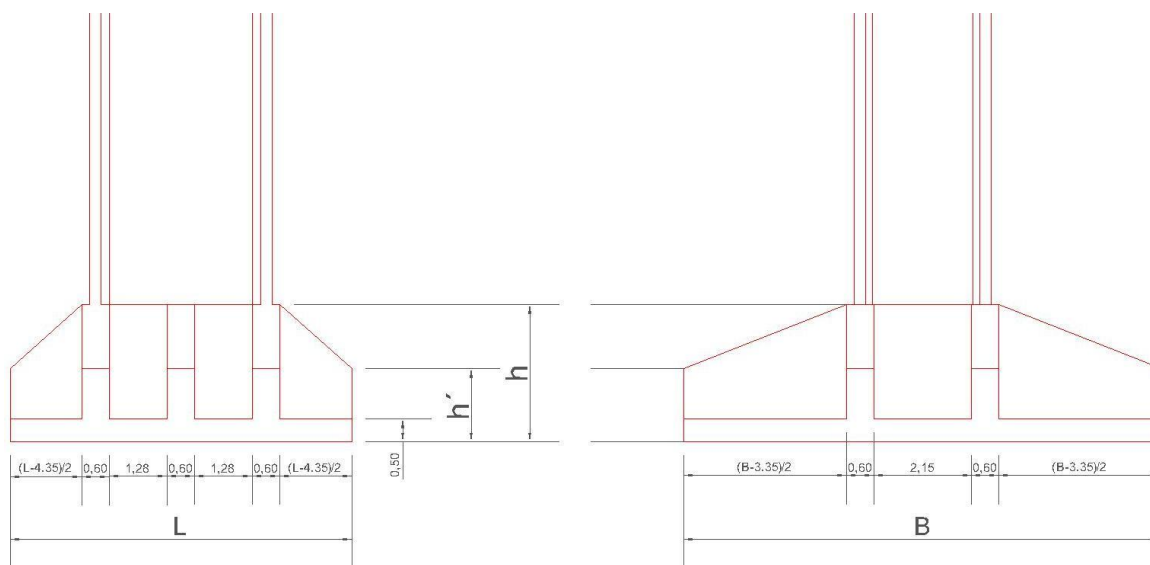
El tablero así mismo, está conformado por un armado longitudinal conformado por diez vigas, en todas las luces, a excepción de la luz más larga, comprendida entre los ejes 7 y 8, la cual consta de 11 vigas para su armado.

La distribución de las pilas está de acuerdo a como se muestra en la tabla 3.1, donde también se muestran las dimensiones de las zapatas. En la Figura 3.3 y Figura 3.4 se muestran detalles las pilas y de las zapatas.

Tabla 3. 1. Dimensiones Pilas y Zapatas.

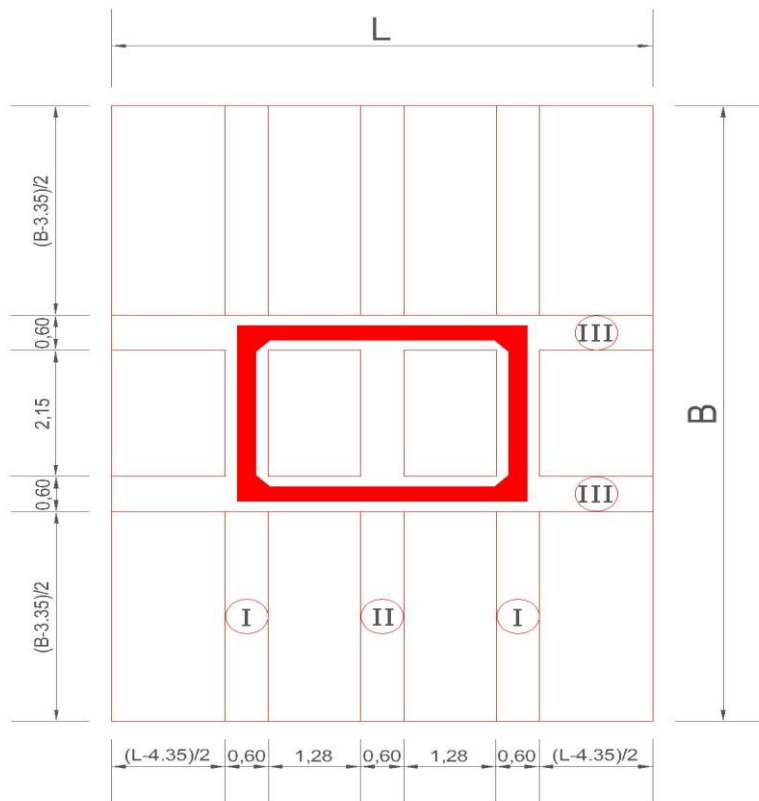
Eje	Pila			Zapata			
	Cota Superior [m]	Cota Inferior [m]	H [m]	B [m]	L [m]	h [m]	h' [m]
1	937,910	915,410	22,500	8,000	7,000	2,500	1,300
2	937,990	901,740	36,250	9,500	7,500	2,750	1,500
3	938,100	895,060	43,040	10,500	7,500	3,000	1,600
4	938,140	894,140	44,000	10,500	7,500	3,000	1,600
5	938,080	896,080	42,000	10,000	7,500	3,000	1,600
6	938,020	911,520	26,500	8,000	7,000	2,500	1,300
7	937,960	921,210	16,750	7,000	6,000	1,750	1,000
8	937,890	924,140	13,750	7,000	6,000	1,750	1,000

Figura 3. 3. Vistas Laterales de las Zapatas.



Fuente: Los Autores.

Figura 3. 4. Vista en planta de las Zapatas.



Fuente: Los Autores.

3.2. MODELO DEL VIADUCTO

Con el fin de realizar las comparaciones respectivas ante la respuesta sísmica del viaducto La Flora, fue necesario utilizar un software para análisis estructural. El software utilizado en este caso fue SAP2000 Ver. 14.

En este programa, se realizó el modelo mostrado en la Figura 3.6, cuyas especificaciones se mencionan paso a paso durante este numeral.

Figura 3. 5. Modelo del viaducto en SAP

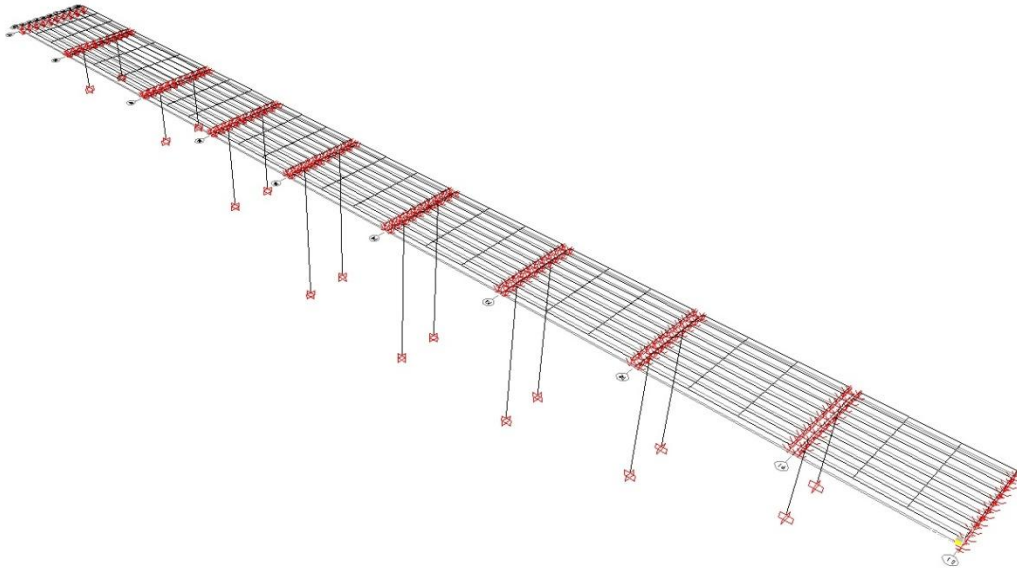
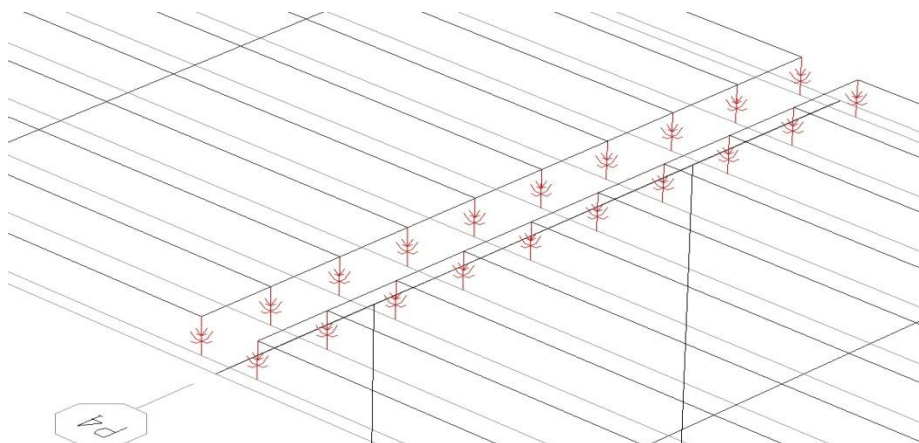


Figura 3. 6. Detalle modelo en SAP



Pilas:

Para modelar las pilas, se utilizaron elementos Frame tipo cajón, ya que el análisis que se necesita en este caso, no amerita la utilización de elementos tipo Shell, debido a que los valores de cortante basal que se esperan obtener son para la pila como un conjunto y no para cada uno de los elementos que la conforman.

Así mismo, la viga cabezal se modeló con un elemento Frame tipo cajón de sección no prismática, debido a que su sección es variable a través de su longitud.

A continuación aparecen unas imágenes que muestran los datos de entrada que se tuvieron en cuenta para simular la estructura en este programa.

Figura 3. 7. Sección en los extremos de la viga cabezal.

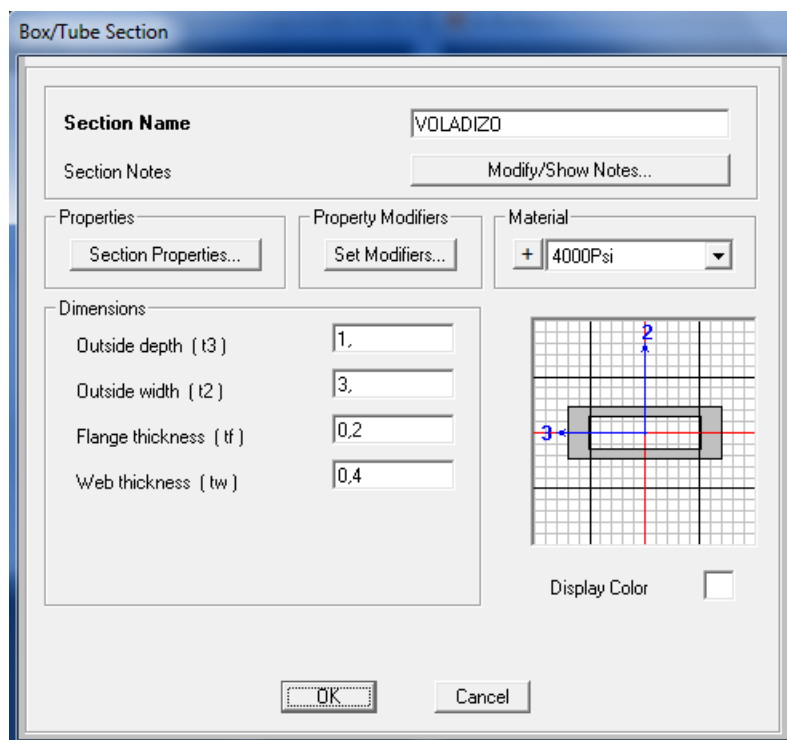


Figura 3. 8. Sección en la luz de la viga cabezal.

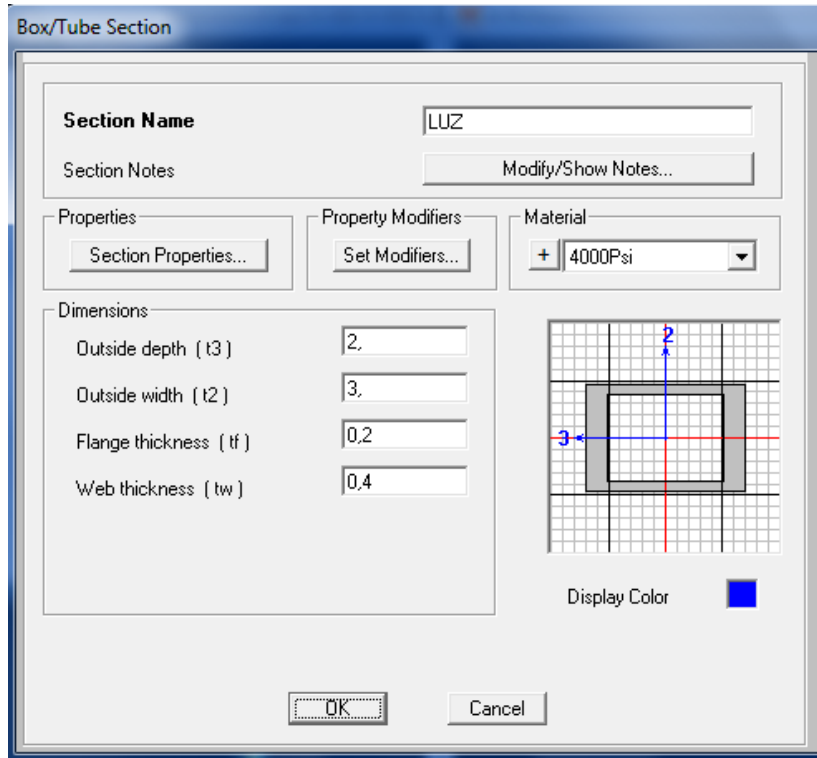
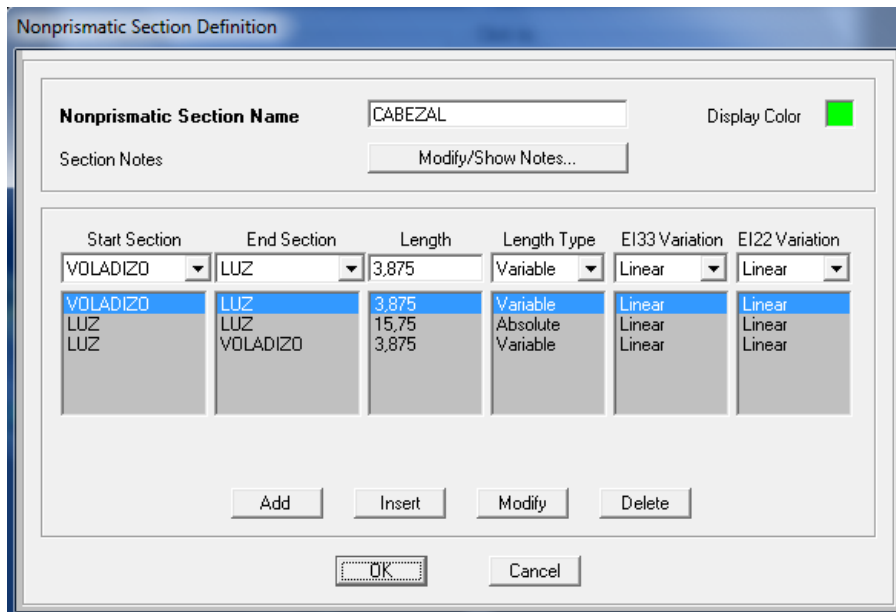


Figura 3. 9. Definición Sección No Prismática Viga Cabezal.



Modelado de vigas

Como las vigas constan de diferente sección a través de su longitud, fue necesario definir las dos secciones, la del apoyo y la de la luz, mediante la herramienta en SAP que permite definir secciones I y T, "Precast I".

Figura 3. 10. Sección Vigas en el Apoyo.

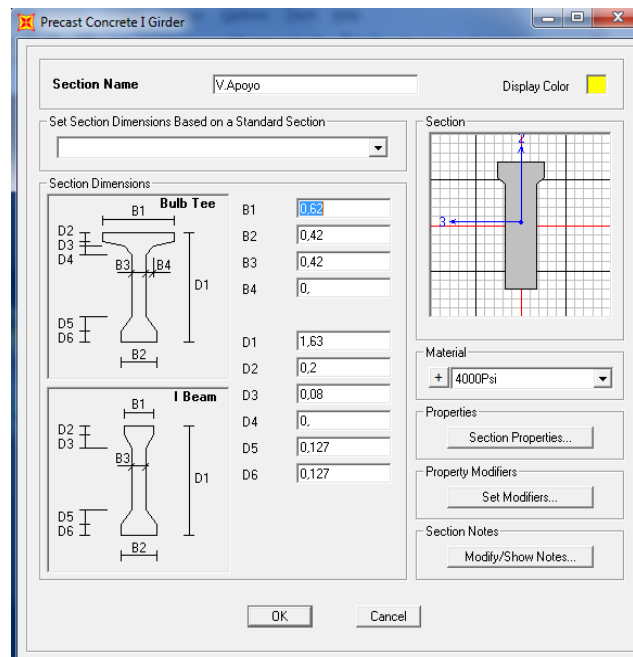
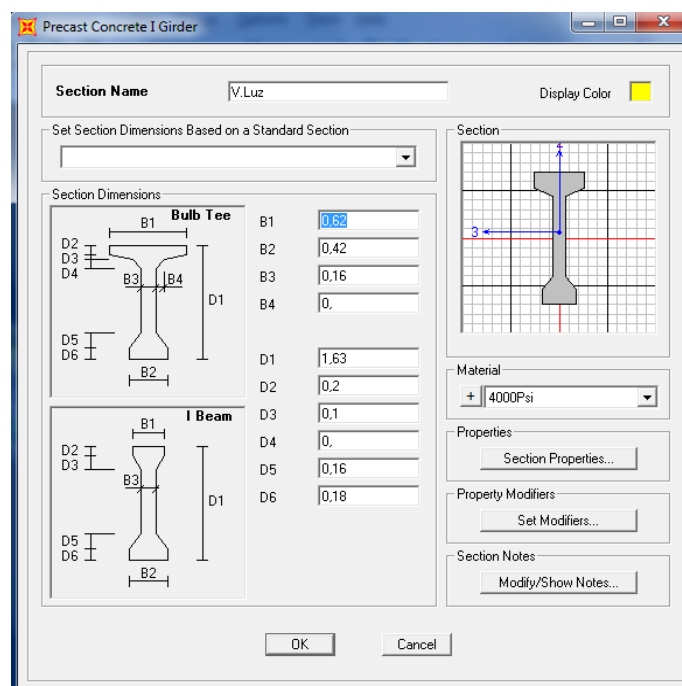
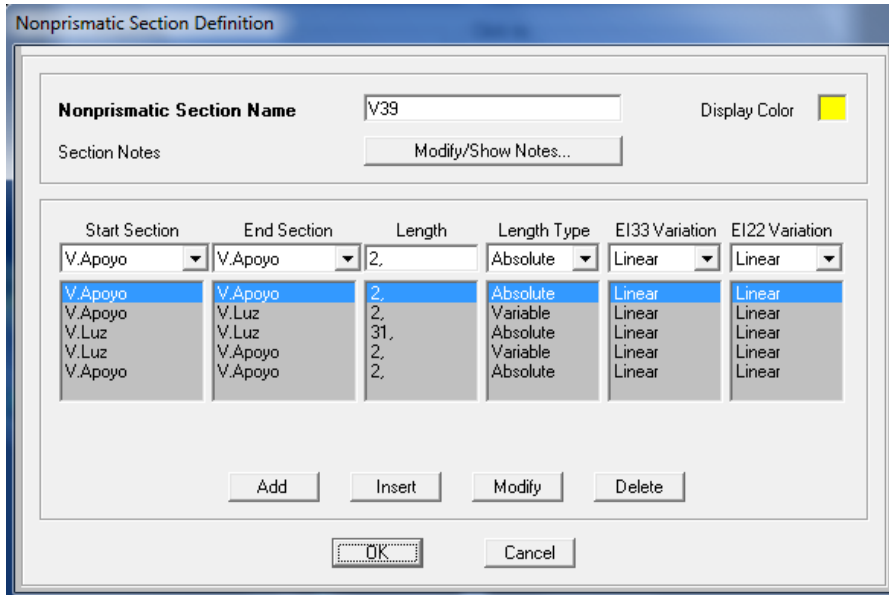


Figura 3. 11. Sección Vigas en la Luz.



Así mismo para tener en cuenta las diferentes secciones de las vigas en su longitud, fue necesario definirlas como secciones no prismáticas, ya que su conformación obedece a una sección constante – variable – constante – variable - constante.

Figura 3. 12. Ejemplo de sección no prismática para viga de 39m



Para realizar la simulación de los apoyos correspondientes a las vigas simplemente apoyadas sobre la viga cabezal, fue necesario replicar elementos de tal manera que se crearan nuevos nodos para así poder asignar un aislador a cada viga en cada uno de sus extremos. Así mismo la asignación de “bodies” fue necesaria para garantizar que las vigas que componen el tablero estuvieran ligadas a la viga cabezal correspondiente a las pilas.

4. DIMENSIONAMIENTO Y MODELACIÓN DE LOS SISTEMAS DE AISLAMIENTO SISMICO EN SAP 2000

Para el presente trabajo y debido a su amplia base teórica de acuerdo a la bibliografía consultada y la facilidad para su implementación en puentes los sistemas de aislamiento analizados e implementados en este estudio constan de los siguientes dispositivos:

- Aislador elastomérico de alto amortiguamiento (HDRB).
- Aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB).
- Aislador tipo péndulo de fricción (FPS).

Cada dispositivo debe ser dimensionado y modelado de acuerdo a sus características.

4.1. DIMENSIONAMIENTO Y MODELACIÓN DEL AISLADOR ELASTOMÉRICO DE ALTO AMORTIGUAMIENTO (HDRB).

Las propiedades consideradas para los aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento fueron la rigidez horizontal, la rigidez vertical y el amortiguamiento. La rigidez rotacional de estos dispositivos fue despreciada. (FERREIRA, 2007)

Para la rigidez horizontal de cada dispositivo se tomó un periodo de 2sg, calculando con este periodo y el peso de la estructura la rigidez horizontal total la cual se dividió en el número de dispositivos de aislamiento que se van a colocar, el cual es de 182 ya que se va a ubicar uno en el extremo de cada viga sobre las vigas cabezal. De la siguiente forma:

$$K_{H\ TOTAL} = \frac{4 * \pi^2 * W}{T_D^2 * g} = \frac{4 * \pi^2 * 10322,97}{2^2 * g} = 103225,13 \frac{KN}{m} \quad (4)$$

$$K_H = \frac{103225,13}{182} = 567,17 \frac{KN}{m} \quad (5)$$

La rigidez vertical del HDRB fue considerada 500 veces superior a la horizontal. (FERREIRA, 2007).

El amortiguamiento para el dispositivo se considero de un 10%.

A continuación se muestra un resumen con las principales características del HDRB.

- Periodo	2 s.
- Masa Oscilante	10249,7 Ton.
- Rigidez horizontal total	103225,13 KN/m.
- Número de dispositivos de Aislamiento	182 un.
- Rigidez Horizontal del HDRB	567,17 KN/m.
- Rigidez vertical del HDRB	283585,53 KN/m.
- Amortiguamiento del HDRB	10%.

Para la modelación del dispositivo en la herramienta de software Sap 2000 se colocó un NLink que para el caso de HDRB es de tipo Rubber Isolator. El procedimiento de definición de sus propiedades y parámetros se muestra en las siguientes imágenes:

Figura 4. 1. Definición de las propiedades del HDRB en SAP 2000.

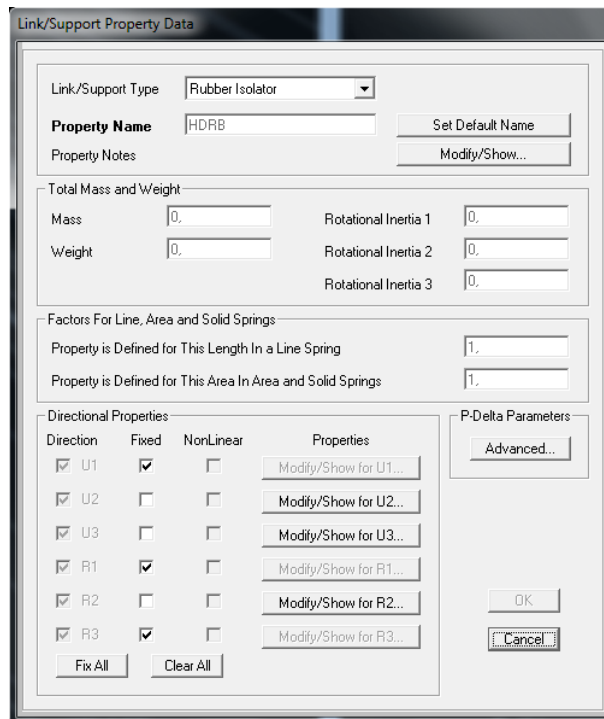
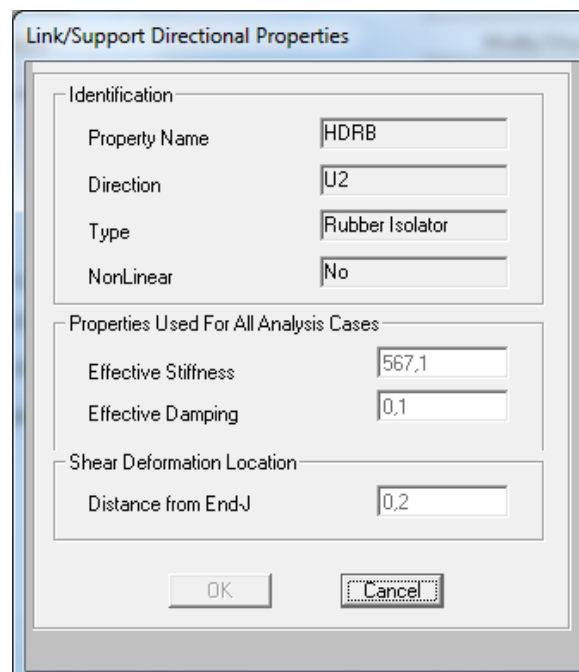


Figura 4. 2. Definición de propiedades direccionales del HDRB en SAP 2000.



Como se puede apreciar en las figuras anteriores el análisis efectuado para este dispositivo fue un análisis lineal debido a que la rigidez del elemento se puede aproximar a una recta debido al amortiguamiento.

4.2. DIMENSIONAMIENTO Y MODELACIÓN DEL AISLADOR ELASTOMÉRICO CON NUCLEO DE PLOMO (LRB).

El dimensionamiento del dispositivo de aislamiento sísmico LRB es muy similar al del elemento HDRB. La única diferencia radica en la presencia del núcleo de plomo en el dispositivo LRB, lo que implica la consideración de dos rigideces una rigidez K_1 que representa la rigidez del núcleo de plomo después de la fluencia y K_2 que es la rigidez antes de la fluencia.

Estas rigideces horizontales se determinan por medio de la relación $K_2=10K_1$. (FERREIRA, 2007). Esta variación bi-lineal de las rigideces requiere la consideración de un análisis dinámico no lineal.

Para el núcleo de plomo aún es necesario definir una fuerza F_y , que corresponde a la fuerza de amortiguación de este elemento, que para nuestro caso fue adaptado de la reacción vertical sobre cada aislador y corresponde a 60,333KN.

A continuación se muestra un resumen con las principales características del HDRB.

- Periodo	2 seg.
- Masa Oscilante	10249,7 Ton.
- Rigidez horizontal total	103225,13 KN/m.
- Número de dispositivos de Aislamiento	182 un.
- K_1 - Caucho	56717 KN/m.
- K_2 – Plomo	567,17 KN/m.
- Rigidez vertical del HDRB	283585,53 KN/m.
- Amortiguamiento del HDRB	10%.

El modelamiento en el programa SAP 2000 de este dispositivo es similar al del HDRB, en las siguientes imágenes se muestra como se introdujeron sus propiedades.

Figura 4. 3. Definición de las propiedades del LRB en SAP 2000.

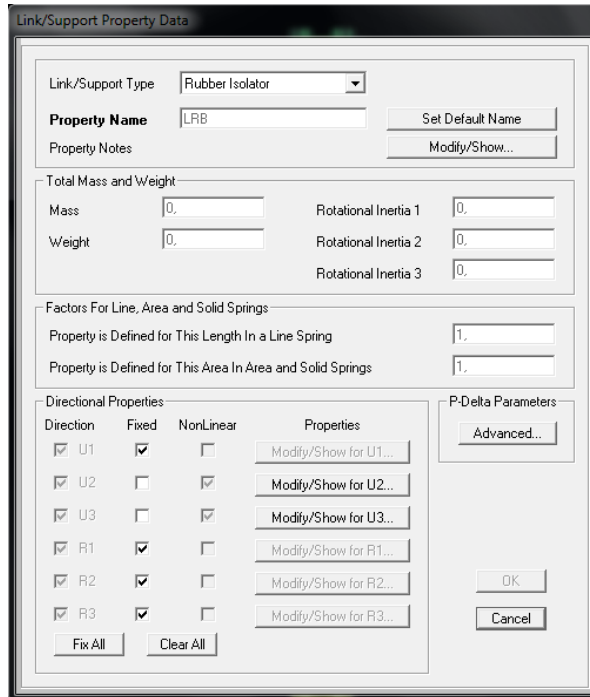
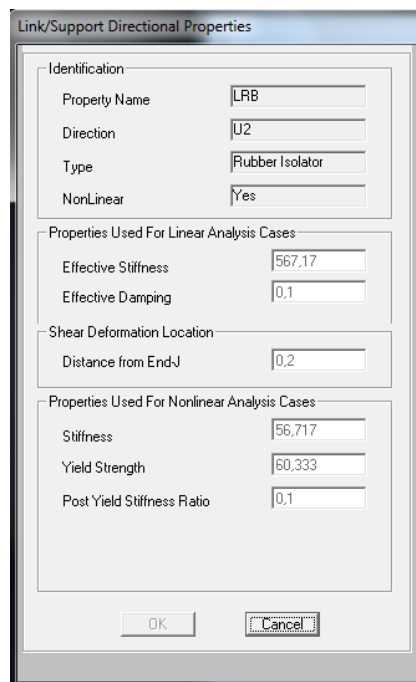


Figura 4. 4. Definición de propiedades direccionales del LRB en SAP 2000.



4.3. DIMENSIONAMIENTO Y MODELACIÓN DEL AISLADOR SÍSMICO TIPO PÉNDULO DE FRICCIÓN (FPS).

De acuerdo con las propiedades y características propias del FPS definidas en el capítulo 2 y apoyados en la bibliografía consultada se definieron las propiedades necesarias para su modelamiento.

El modelamiento mediante el programa de análisis estructural SAP2000 v14, el cual trae entre su biblioteca de elementos con comportamiento no lineal, el elemento Friction Isolator (NLink), con todos y cada uno de los parámetros requeridos para simular el funcionamiento del mismo como son la fricción estática y dinámica, el radio de curvatura y el parámetro de forma, al igual que las rigideces efectivas en cada dirección.

El programa permite realizar análisis no lineales contra el tiempo concentrando la no linealidad en dichos elementos, igualmente, utiliza la ecuación desarrollada por Zayas et al., 1987, para el cálculo de la fuerza en el aislador con base en su deformación y velocidad.

A continuación se muestra la forma en que introdujeron los datos necesarios para la modelación del aislador tipo péndulo de fricción.

Figura 4. 5. Definición de las propiedades del FPS en SAP 2000.

Link/Support Property Data

Link/Support Type: Friction Isolator

Property Name: FPS

Property Notes:

Total Mass and Weight

Mass: 0.0, Rotational Inertia 1: 0.0, Rotational Inertia 2: 0.0, Rotational Inertia 3: 0.0

Weight: 0.0

Factors For Line, Area and Solid Springs

Property is Defined for This Length In a Line Spring: 1.0

Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs: 1.0

Directional Properties

Direction	Fixed	NonLinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U1...
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U2...
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U3...
<input checked="" type="checkbox"/> R1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R1...
<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R2...
<input checked="" type="checkbox"/> R3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R3...

P-Delta Parameters

Advanced...

OK, Cancel

Figura 4. 6. Definición de propiedades direccionales del FPS en SAP2000

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: FPS

Direction: U2

Type: Friction Isolator

NonLinear: Yes

Properties Used For Linear Analysis Cases

Effective Stiffness: 563.17

Effective Damping: 0.1

Shear Deformation Location

Distance from EndJ: 0.0

Properties Used For Nonlinear Analysis Cases

Stiffness: 283585.53

Friction Coefficient, Slow: 0.08

Friction Coefficient, Fast: 0.12

Rate Parameter: 0.47

Radius of Sliding Surface: 0.993

OK, Cancel

5. DEFINICION Y MODELACIÓN DE LA ACCIÓN SÍSMICA

Un análisis sísmico de una estructura consiste en el estudio de la respuesta de dicha estructura cuando está sometida a una acción sísmica en su base. Este análisis sísmico generalmente se hace por medio de un espectro de respuesta donde se calculan los valores extremos de respuesta de la estructura, o por medio de acelerogramas que son registros de la respuesta de una estructura frente a un sismo a lo largo del tiempo.

En este trabajo todos los análisis dinámicos fueron realizados por medio de acelerogramas.

5.1. DEFINICIÓN DE LOS ACELEROGRAMAS

La definición de los acelerogramas se realizó con base en el estudio hecho por INGEOMINAS (2001) en el cual de acuerdo con los estudios de amenaza sísmica para la ciudad de Bucaramanga basados en una zonificación sismogeotécnica determinó unos escenarios compatibles. Además debido a que estos registros generados por INGEOMINAS (2001) muestran los datos de aceleración producida por el sismo directamente en la roca y ya que en la ciudad de Bucaramanga generalmente las estructuras no están cimentadas sobre roca sólida es necesario, para un mejor análisis, obtener los registros de los acelerogramas en la superficie del terreno. GELVEZ y ORTIZ, 2009 realizaron el filtro de estas señales teniendo en cuenta la zonificación sismogeotécnica hecha 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 como se mostrará posteriormente.

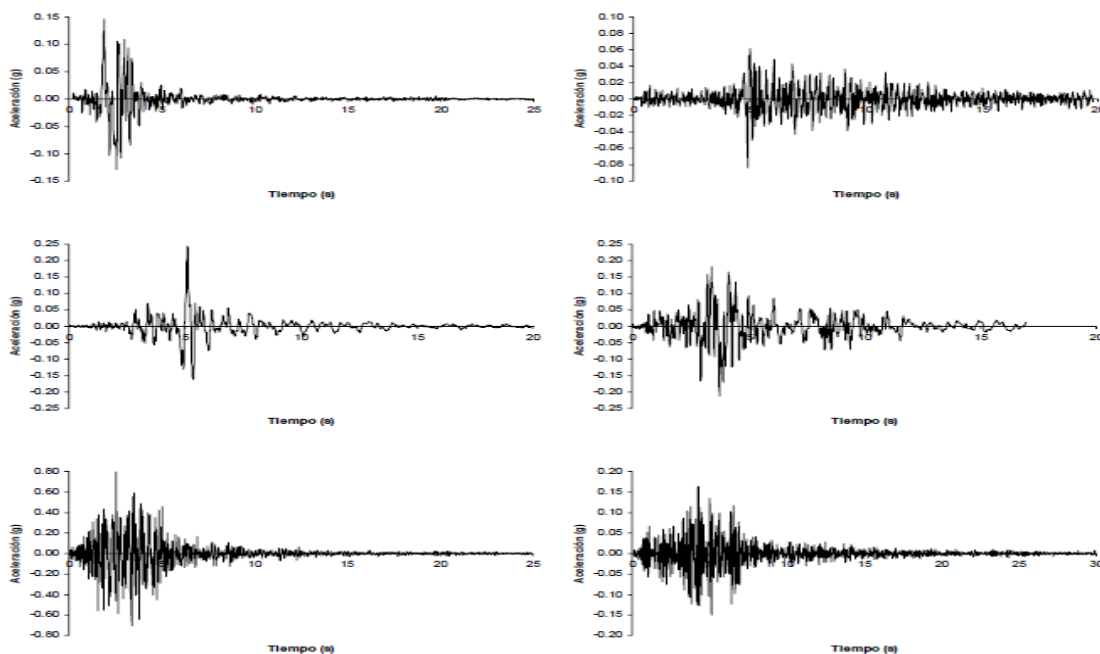
5.1.1. Determinación de escenarios sísmicos compatibles

El estudio de zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga presentado por INGEOMINAS (2001) indica que la amenaza para la ciudad de Bucaramanga está controlada por la posible ocurrencia de un sismo a lo largo de las Fallas Bucaramanga-Santa Marta, Suárez, Salinas y la Frontal de los Llanos Orientales. Sin embargo, este mismo estudio propone tomar como escenarios de amenaza la Falla Bucaramanga-Santa Marta, y la Falla Frontal de los Llanos Orientales. Lo anterior se debe a que los posibles efectos generados por un sismo en las fallas Suárez y Salinas estarían cubiertos por los escenarios escogidos. (GELVEZ, ORTIZ, 2009).

Según INGEOMINAS (2001) un escenario sísmico compatible para la Falla de Bucaramanga-Santa Marta sería un evento con magnitudes entre 5.6 y 6.0, y distancia de la fuente al sitio entre 13 y 25 km. De igual manera para la Falla Frontal de los Llanos Orientales determinó, que eventos con magnitudes entre 6.9 y 7.3 y distancias al sitio de 60-80 km son compatibles con el nivel de amenaza.

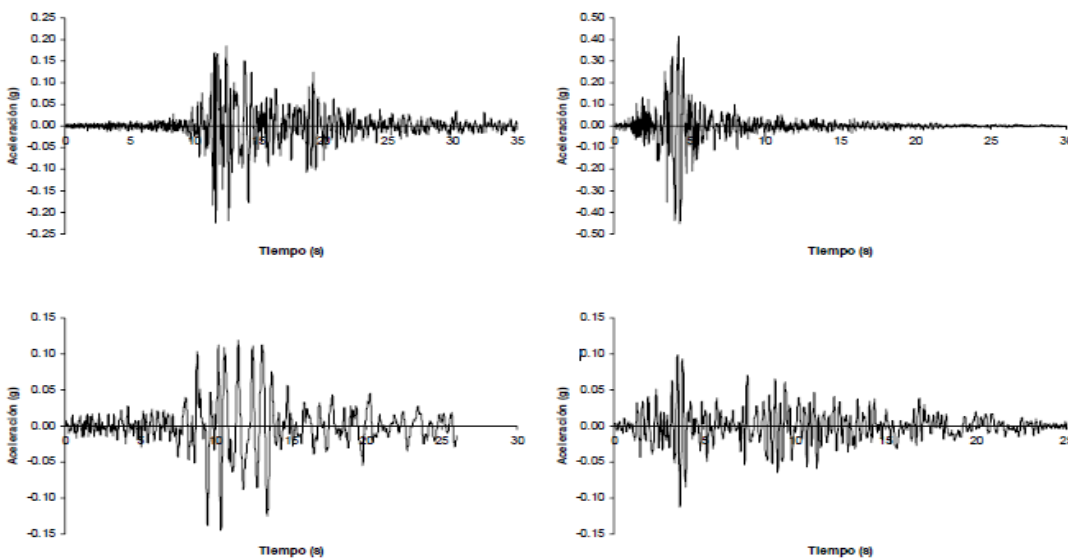
Una vez escogidos los escenarios sísmicos compatibles con las fuentes que afectan la región, INGEOMINAS (2001) presentó los acelerogramas de registros reales obtenidos en roca compatibles con el contenido frecuencial, duración y energía de eventos producidos por estas fallas mostrados en las figuras 5.1. y 5.2. Además, el mismo estudio estableció que los acelerogramas compatibles con la Falla de Bucaramanga-Santa Marta deben ser escalados a 0.16g, y de igual forma los acelerogramas compatibles con la Falla Frontal de los Llanos Orientales deben escalarse a 0.21g, que son los valores correspondientes a la probabilidad de excedencia del 10% en 50 años, es decir, un periodo de retorno de 475 años. Los registros son compatibles con el contenido frecuencial, duración y energía de eventos producidos por estas fallas.

Figura 5. 1. Acelerogramas de diseño compatibles con escenario sísmico falla Bucaramanga–Santa Marta. De izquierda a derecha y de arriba abajo se presentan los acelerogramas de Helena, Friulli, Mammoth, Coalinga, Whittier y Umbria.



Fuente: INGEOMINAS (2001).

Figura 5. 2. Acelerogramas de diseño compatibles con escenario sísmico falla Frontal. De izquierda a derecha y de arriba abajo se presentan los acelerogramas de Montenegro, Loma Prieta, Pretolia y Duzce.



Fuente: INGEOMINAS (2001)

5.1.2. Zonas sismogeotécnicas:

INGEOMINAS (2001) basados en el mapa geológico de la ciudad, información recolectada en los informes de suelos, y en la información obtenida en las perforaciones profundas propuso una serie de zonas geotécnicas para Bucaramanga. Además INGEOMINAS (2001) teniendo en cuenta las características geológicas, geofísicas y geotécnicas de la ciudad presenta siete zonas como representativas para el cálculo de la respuesta dinámica las cuales son:

Zona 1: Roca.

Conformada básicamente por roca de las Formaciones Girón y Neis de Bucaramanga.

Zona 2: Abanico de Bucaramanga.

En esta zona se encuentra asentada la población del municipio de Bucaramanga.

Zona 3: Bad Lands.

Consiste básicamente en la Formación Órganos afectada por procesos erosivos.

Zona 4: Flujos de escombros.

En esta zona se encuentran los municipios de Piedecuesta y Florida.

Zona 5: Terrazas Bajas y Medias.

En esta zona se encuentran parte de municipio de Girón y el Valle Aluvial del Río Frío.

Zona 6: Llenos.

Zona 7: Cañaveral.

Debido a que pertenece a la zona de Flujos de Escombros, pero las características son diferentes a las definidas en dicha zona, INGEOMINAS (2001) decidió hacer una consideración especial y dejarla como zona independiente.

INGEOMINAS (2001) muestra que para los escenarios sísmicos correspondientes a la Falla Bucaramanga-Santa Marta y la Falla Frontal de los Llanos desde el punto de vista de respuesta dinámica de las 7 zonas propuestas existen 3 grupos de respuesta espectral similar en amplitud y forma. Un primer grupo reúne las respuestas espectrales de las zonas de roca pura, suelos residuales sobre roca sana 1G, 1N, 3 y 7, el segundo grupo está compuesto por las zonas 2, 4 y 5, aquí está incluida la mayoría del área construida, que se cimienta sobre depósitos de suelo rígido El espectro para las zonas de llenos, resulta ser un caso especial y presenta las mayores aceleraciones esperadas (1.20g para la Falla Bucaramanga-Santa Marta, y 1.25g para la Falla Frontal de los Llanos). Teniendo en cuenta esto, INGEOMINAS (2001) denominó a estos 3 grupos Zona 1, Zona 2, y Zona 3 respectivamente.

5.1.3 Acelerogramas en superficie

(GELVEZ, ORTIZ, 2009) Utilizando las características, y propiedades dinámicas del suelo presentadas por INGEOMINAS (2001) para las 3 zonas sismogeotécnicas, y mediante el programa SHAKE calcularon los acelerogramas en superficie para cada zona sismogeotécnica.

Figura 5. 3. Acelerogramas compatibles con escenario sísmico falla Bucaramanga-Santa Marta para la zona 1.

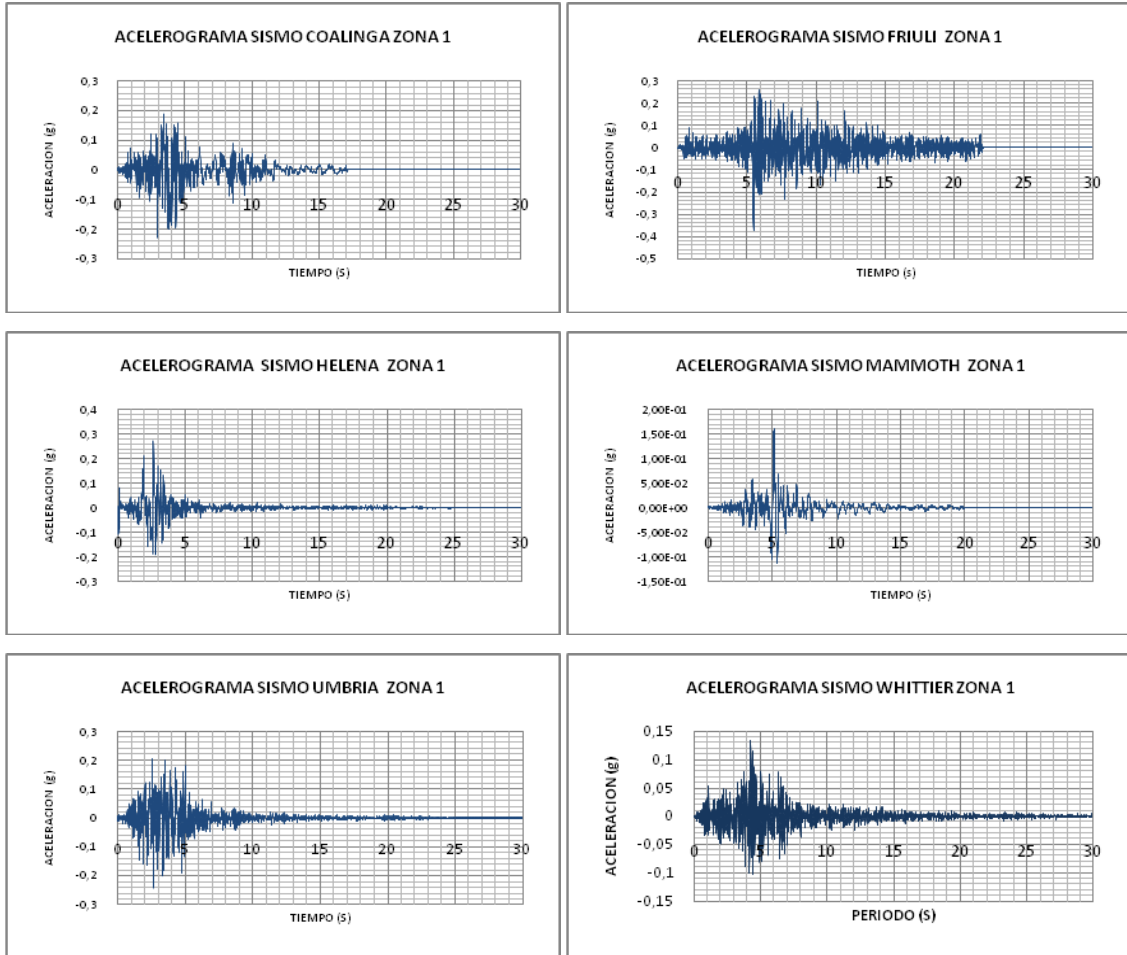
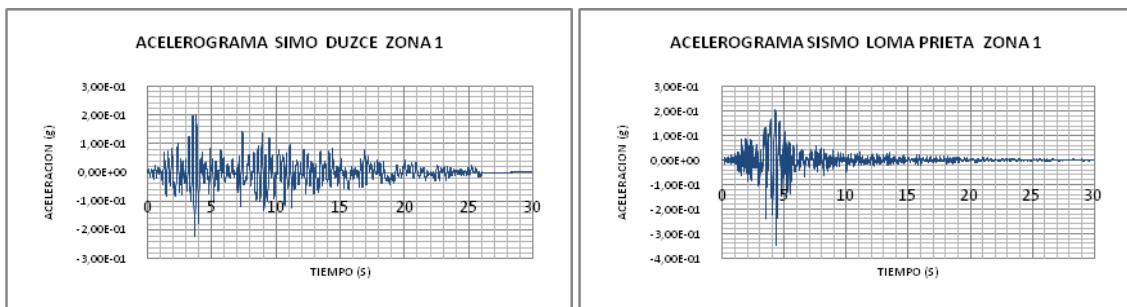


Figura 5. 4. Acelerogramas compatibles con escenario sísmico falla Frontal para la zona 1.



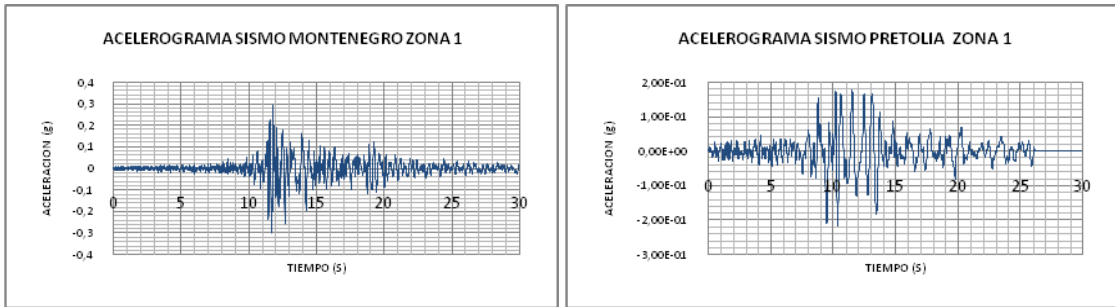


Figura 5. 5 Acelerogramas compatibles con escenario sísmico falla Bucaramanga-Santa Marta para la zona 2

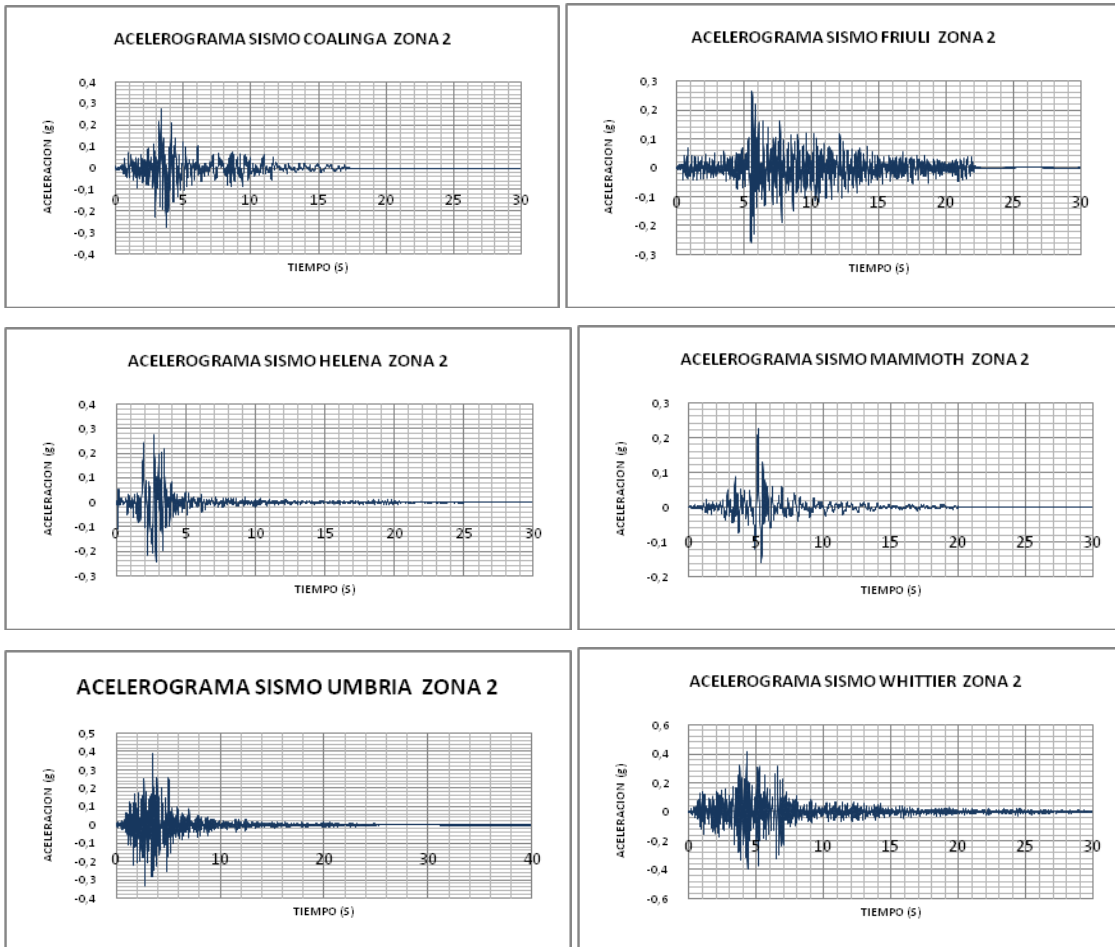
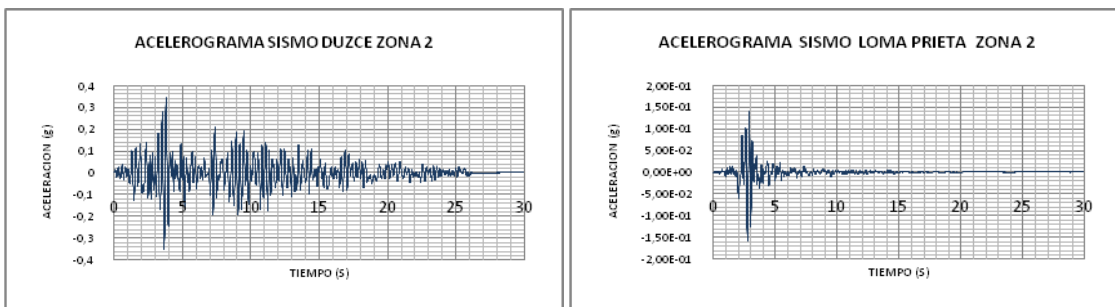


Figura 5. 6. Acelerogramas compatibles con escenario sísmico falla Frontal para la zona 2



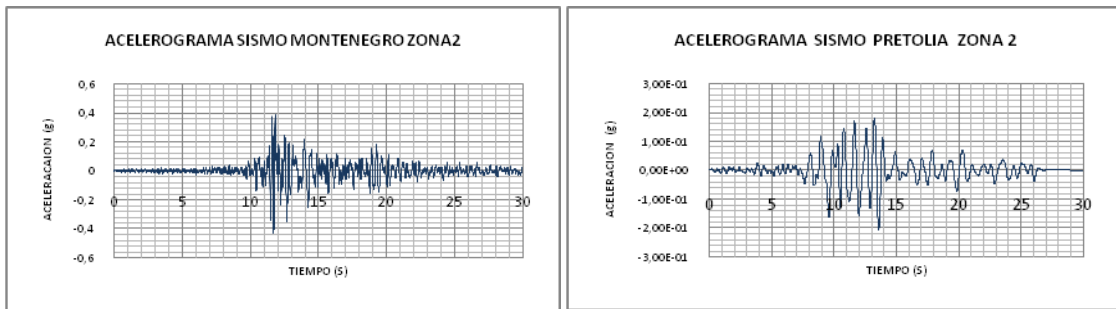


Figura 5. 7. Acelerogramas compatibles con escenario sísmico falla Bucaramanga-Santa Marta para la zona 3.

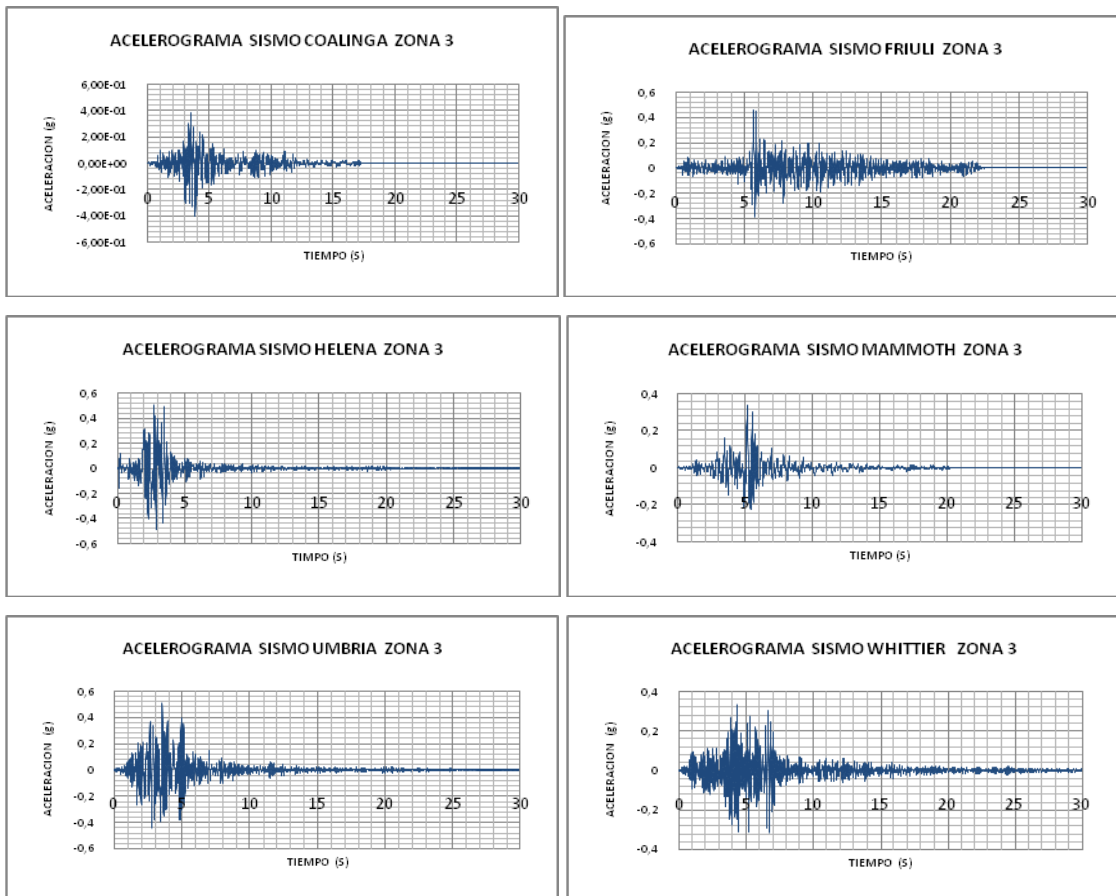
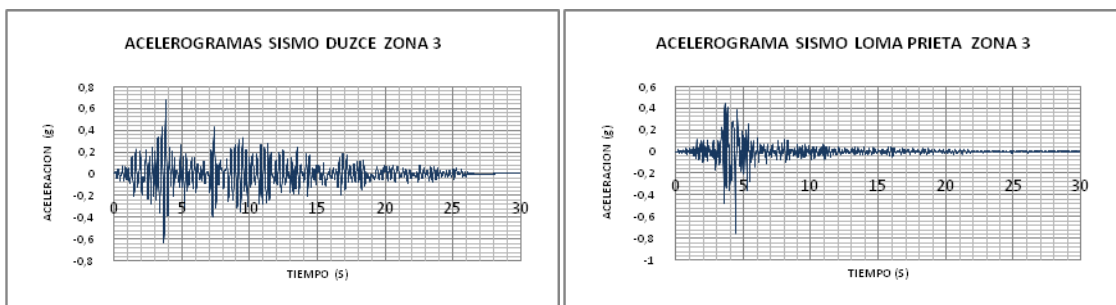
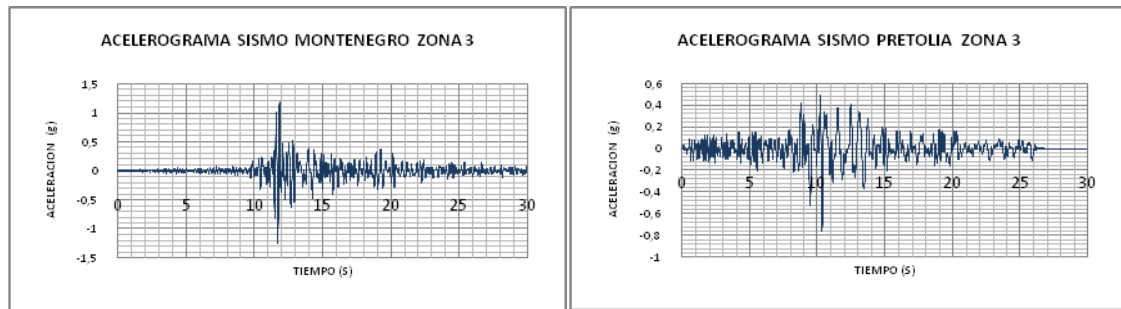


Figura 5. 8. Acelerogramas compatibles con escenario sísmico falla Frontal para la zona 3





Fuente: *Gélvez y Ortiz, 2009.*

La validez de estos acelerogramas en superficie Gélvez y Ortiz, 2009 la comprobaron generando espectros de respuesta de aceleración y comparándolos con los espectros de aceleración presentados por INGEOMINAS (2201). para cada zona sismogeotécnica.

De acuerdo al mapa de zonificación sismogeotécnica el viaducto La Flora se encuentra ubicado en la ZONA 2.

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, geofísicas y geotécnicas respectivas a la zona de ubicación del viaducto La Flora.

A continuación se procedió a ingresar los acelerogramas al programa de cálculo utilizado para el análisis de la siguiente manera:

Se colocan los datos de aceleración en un archivo de texto, luego en el programa SAP 2000 se define una función de historias en el tiempo desde el archivo de texto creado como se muestra a continuación.

Después de haber definido la acción sísmica en el programa SAP 2000 para los diez sismos anteriormente seleccionados se procedió a la definición de los casos de carga que es donde finalmente se asigna la acción sísmica a la estructura para cada uno de los sismos.

Figura 5. 9. Ejemplo de definición de un sismo por medio de una función Time History.

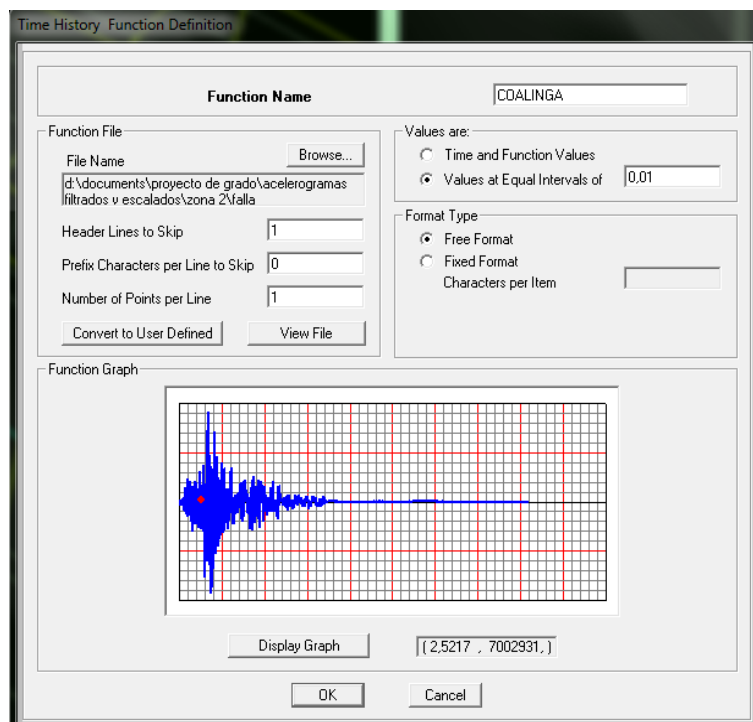


Figura 5. 10. Ejemplo de definición de acción sísmica por medio de acelerogramas.

Load Case Data - Nonlinear Modal History (FNA)

Load Case Name: CDALINGA Notes:

Load Case Type: Time History

Initial Conditions:
 Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
 Continue from State at End of Modal History
Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case:
 Use Modes from Case: MODAL

Analysis Type:
 Linear
 Nonlinear

Time History Type:
 Modal
 Direct Integration

Time History Motion Type:
 Transient
 Periodic

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	coalinga	1.
Accel	U2	coalinga	1.

Show Advanced Load Parameters

Time Step Data:
 Number of Output Time Steps: 300
 Output Time Step Size: 0,1

Other Parameters:
 Modal Damping: None
 Nonlinear Parameters: Default

6. RESULTADOS COMPARACIÓN Y ANÁLISIS ENTRE LAS SOLUCIONES DE AISLAMIENTO SISMICO DEL MODELO

Teniendo definidos todos los elementos necesarios para la realización del análisis estructural con y sin aisladores sísmicos, tales como las características de viaducto La Flora en lo que refiere a sus dimensiones y propiedades, para luego haber realizado el modelo estructural como se mostró en el capítulo 3. En el capítulo 4 se muestra la definición y modelamiento de los diferentes tipos de aisladores sísmicos utilizados en este estudio y finalmente la definición de la acción sísmica que se aplicó al modelo y el tipo de análisis a realizar. Los modelos analizados son los siguientes:

- Modelo sin aisladores sísmicos.
- Modelo con aislador elastomérico de alto amortiguamiento HDRB.
- Modelo con aislador elastomérico con núcleo de plomo LRB.
- Modelo con aislador tipo péndulo de fricción FPS.

6.1. FRECUENCIAS, PERIODOS Y MODOS DE VIBRACIÓN

6.1.1. Modelo Sin Aislamiento Sísmico

El primer caso de análisis, como es natural corresponde al viaducto la flora en las condiciones y características actuales y normales, sin los dispositivos de Aislamiento sísmico. La principal característica de este modelo es que las vigas están simplemente apoyadas sobre una viga cabezal directamente sobre las pilas de la estructura. Los resultados de este análisis serán nuestro punto de comparación para justificar la favorabilidad de la implementación de los dispositivos de aislamiento sísmico.

Para realizar el análisis modal de la estructura, fue necesaria la utilización de 50 modos de vibración, de los cuales, a continuación se mostrarán los cuatro primeros para cada uno de los casos.

La frecuencia fundamental de la estructura corresponde al primer modo de vibración de esta, el cual es un modo transversal y cuyo valor es de 0,625 [Hz].

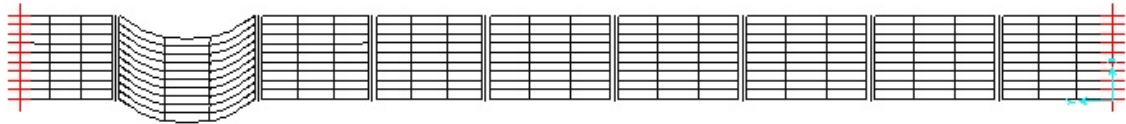


Figura 6. 1. Primer modo de vibración de la estructura sin aislamiento sísmico visto en planta.

El segundo modo de vibración de la estructura tiene una frecuencia de 0,690 [Hz].

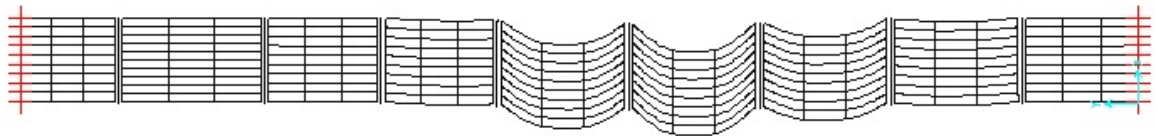


Figura 6. 2. Segundo modo de vibración de la estructura sin aislamiento sísmico visto en planta.

A continuación se presenta la estructura deformada bajo el tercer modo de vibración, cuya frecuencia es de 0,721 [Hz].

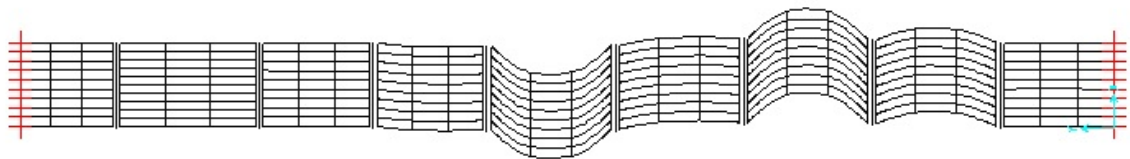


Figura 6. 3. Tercer modo de vibración de la estructura sin aislamiento sísmico visto en planta.

Finalmente se presenta el cuarto modo de vibración, el cual, al igual que los anteriores, es un modo transversal, y cuya frecuencia es de 0,747 [Hz].

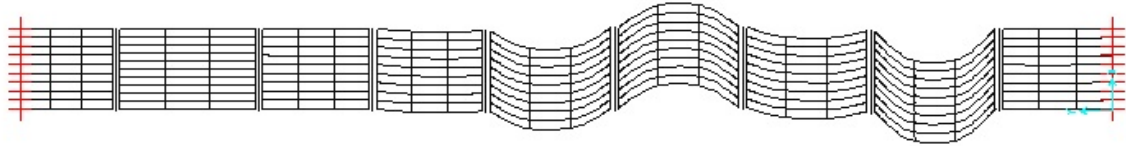


Figura 6. 4. *Cuarto modo de vibración de la estructura sin aislamiento sísmico visto en planta.*

6.1.2. Modelo Con Dispositivo de Aislamiento Sísmico HDRB

El segundo caso de análisis correspondió al viaducto la flora en condiciones de aislamiento sísmico mediante el dispositivo HDRB. La principal característica de este modelo es que las vigas están simplemente apoyadas sobre dispositivos de caucho de alto amortiguamiento restringidos a rotaciones y deformaciones axiales.

La frecuencia fundamental corresponde al primer modo de vibración, el cual se presenta a continuación, cuya frecuencia es de 0,507 [Hz] y es un modo longitudinal.

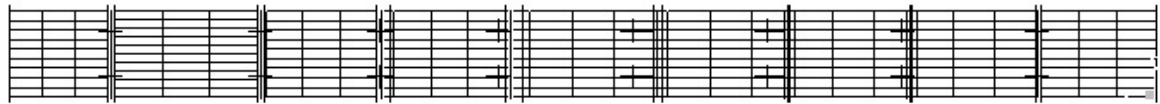


Figura 6. 5. *Primer modo de vibración de la estructura bajo condiciones de Aislamiento Sísmico con dispositivos HDRB.*

En este caso, el segundo modo de vibración, también correspondió a un modo longitudinal el cual tiene una frecuencia de 0,606 [Hz].



Figura 6. 6. *Segundo modo de vibración de la estructura bajo condiciones de Aislamiento Sísmico con dispositivos HDRB.*

El tercer modo de vibración es un modo transversal con una frecuencia de oscilación de 0,661 [Hz].

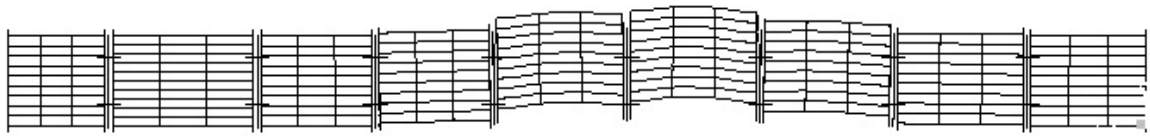


Figura 6. 7. Tercer modo de vibración de la estructura bajo condiciones de Aislamiento Sísmico con dispositivos HDRB.

El cuarto modo de vibración al igual que el anterior, es un modo transversal y tiene una frecuencia de 0.694 [Hz].

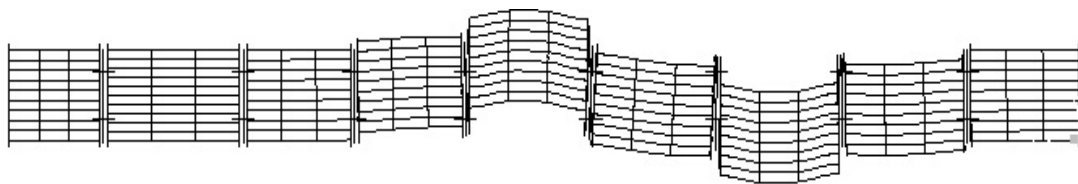


Figura 6. 8. Cuarto modo de vibración de la estructura bajo condiciones de Aislamiento Sísmico con dispositivos HDRB.

A continuación se presenta una tabla comparativa con las diferencias entre las frecuencias y los periodos para los 4 primeros modos de vibración en condiciones de aislamiento de base con dispositivos HDRB y sin aislamiento.

Tabla 6. 1. Comparación de Frecuencias y periodos HDRB y modelo sin Aislador.

Modo N°	Modelo con Aislador HDRB		Sin Aislamiento Sísmico	
	T (s)	f (Hz)	T (s)	f (Hz)
1	1,972	0,507	1,599	0,625
2	1,650	0,606	1,449	0,690
3	1,512	0,661	1,386	0,721
4	1,440	0,694	1,339	0,747

Se puede observar un cambio en la frecuencia de cada uno de los modos de vibración, notándose la disminución de esta bajo condiciones de aislamiento de base, y por tanto un aumento del período de oscilación.

6.1.3. Modelo Con Dispositivo de Aislamiento Sísmico LRB

El Tercer caso de análisis correspondió al viaducto la flora en condiciones de aislamiento sísmico mediante el dispositivo LRB. La principal característica de este modelo es que las vigas están simplemente apoyadas sobre dispositivos de caucho de alto amortiguamiento con un núcleo de plomo, con restricciones a las rotaciones y deformaciones axiales.

La frecuencia fundamental corresponde al primer modo de vibración, el cual se presenta a continuación, cuya frecuencia es de 0,507 [Hz] y es un modo longitudinal.

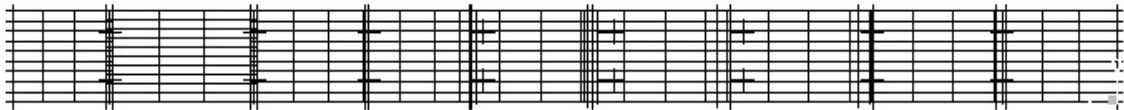


Figura 6. 9. Primer modo de vibración de la estructura bajo condiciones de Aislamiento Sísmico con dispositivos LRB.

El segundo modo de vibración, corresponde a un modo transversal el cual tiene una frecuencia de 0,606 [Hz].

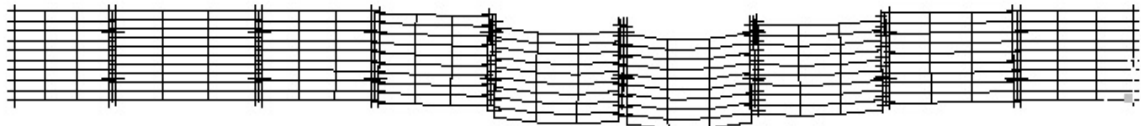


Figura 6. 10. Segundo modo de vibración de la estructura bajo condiciones de Aislamiento Sísmico con dispositivos LRB.

El tercer modo de vibración es un modo longitudinal con una frecuencia de oscilación de 0,661 [Hz].

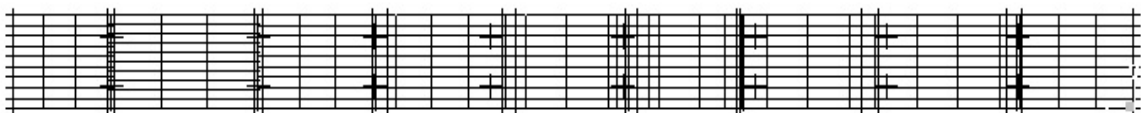


Figura 6. 11. Tercer modo de vibración de la estructura bajo condiciones de Aislamiento Sísmico con dispositivos LRB.

El cuarto modo de vibración a diferencia del anterior, es un modo transversal y tiene una frecuencia de 0.694 [Hz].

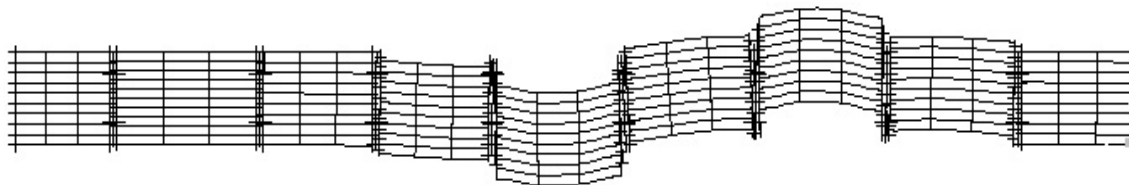


Figura 6. 12. Cuarto modo de vibración de la estructura bajo condiciones de Aislamiento Sísmico con dispositivos LRB.

A continuación se presenta la tabla comparativa con las diferencias entre las frecuencias y los periodos para los 4 primeros modos de vibración en condiciones de aislamiento de base con dispositivos LRB y sin aislamiento.

Tabla 6. 2. Comparación de frecuencias y periodos, LRB y modelo sin Aislador.

Modo N°	Modelo con Aislador LRB		Sin Aislamiento Sísmico	
	T (S)	f (Hz)	T (S)	f (Hz)
1	1,972	0,507	1,599	0,625
2	1,650	0,606	1,449	0,690
3	1,512	0,661	1,386	0,721
4	1,440	0,694	1,339	0,747

Se puede observar un cambio en la frecuencia de cada uno de los modos de vibración, notándose la disminución de esta bajo condiciones de aislamiento de base, y por tanto un aumento del período de oscilación.

6.1.4. Modelo Con Dispositivo de Aislamiento Sísmico FPS

El Cuarto caso de análisis correspondió al viaducto la flora en condiciones de aislamiento sísmico mediante el dispositivo FPS. La principal característica de este modelo es que las vigas están simplemente apoyadas sobre un dispositivo

tipo péndulo friccional, los cuales, a igual que los dispositivos anteriores presentan restricciones a los giros y a deformaciones axiales

La frecuencia fundamental corresponde al primer modo de vibración, el cual se presenta a continuación, cuya frecuencia es de 0,620 [Hz] y es un modo longitudinal.

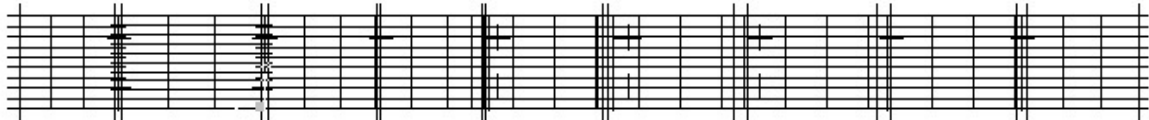


Figura 6. 13. Primer modo de vibración de la estructura bajo condiciones de Aislamiento Sísmico con dispositivos FPS.

El segundo modo de vibración, corresponde a un modo transversal el cual tiene una frecuencia de 0,660 [Hz].

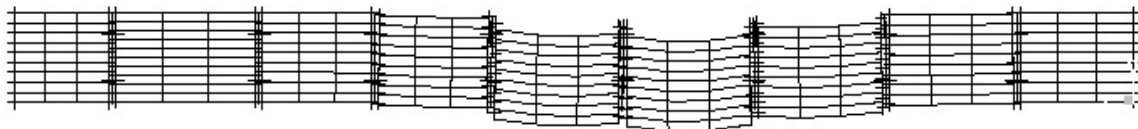


Figura 6. 14. Segundo modo de vibración de la estructura bajo condiciones de Aislamiento Sísmico con dispositivos FPS.

El tercer modo de vibración es un modo longitudinal con una frecuencia de oscilación de 0,683 [Hz].

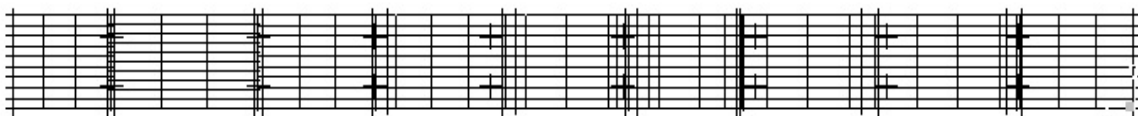


Figura 6. 15. Tercer modo de vibración de la estructura bajo condiciones de Aislamiento Sísmico con dispositivos FPS.

El cuarto modo de vibración a diferencia del anterior, es un modo transversal y tiene una frecuencia de 0.693 [Hz].

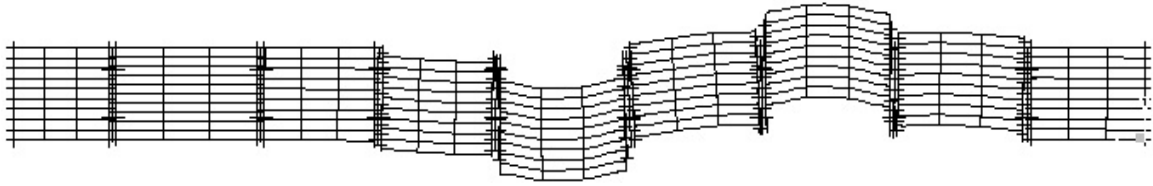


Figura 6. 16. Cuarto modo de vibración de la estructura bajo condiciones de Aislamiento Sísmico con dispositivos FPS.

A continuación se presenta la tabla comparativa con las diferencias entre las frecuencias y los periodos para los 4 primeros modos de vibración en condiciones de aislamiento de base con dispositivos FPS y sin aislamiento.

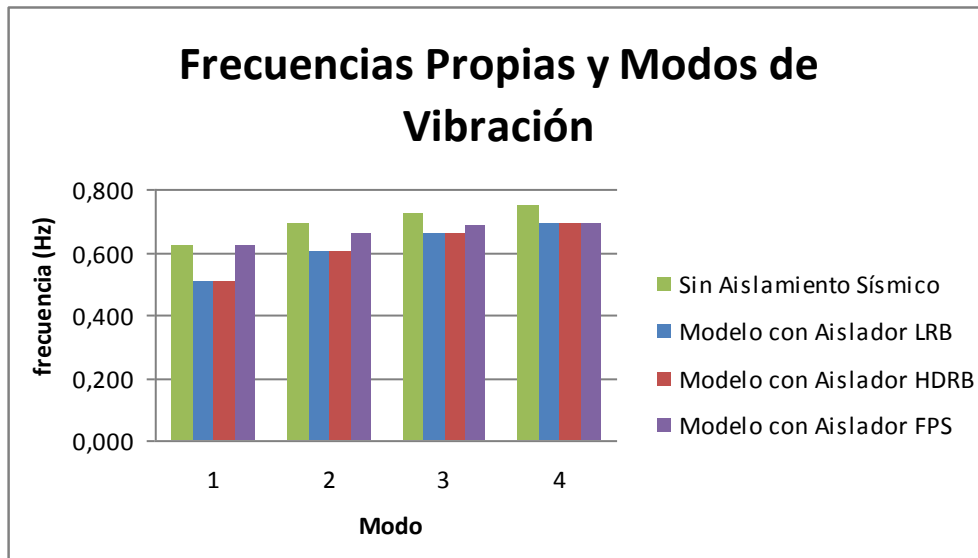
Tabla 6. 3. Comparación de Frecuencias y periodos, FPS y modelo sin Aislador.

Modo N°	Modelo con Aislador FPS		Sin Aislamiento Sísmico	
	T (S)	f (Hz)	T (S)	f (Hz)
1	1,613	0,620	1,599	0,625
2	1,514	0,660	1,449	0,690
3	1,464	0,683	1,386	0,721
4	1,442	0,693	1,339	0,747

Se puede observar un cambio en la frecuencia de cada uno de los modos de vibración, notándose la disminución de esta bajo condiciones de aislamiento de base, y por tanto un aumento del período de oscilación.

A continuación, se presenta un gráfico en el cual se pueden comparar las soluciones obtenidas en cada uno de los casos presentados anteriormente.

Figura 6. 17. Frecuencias Propias y Modos de Vibración.



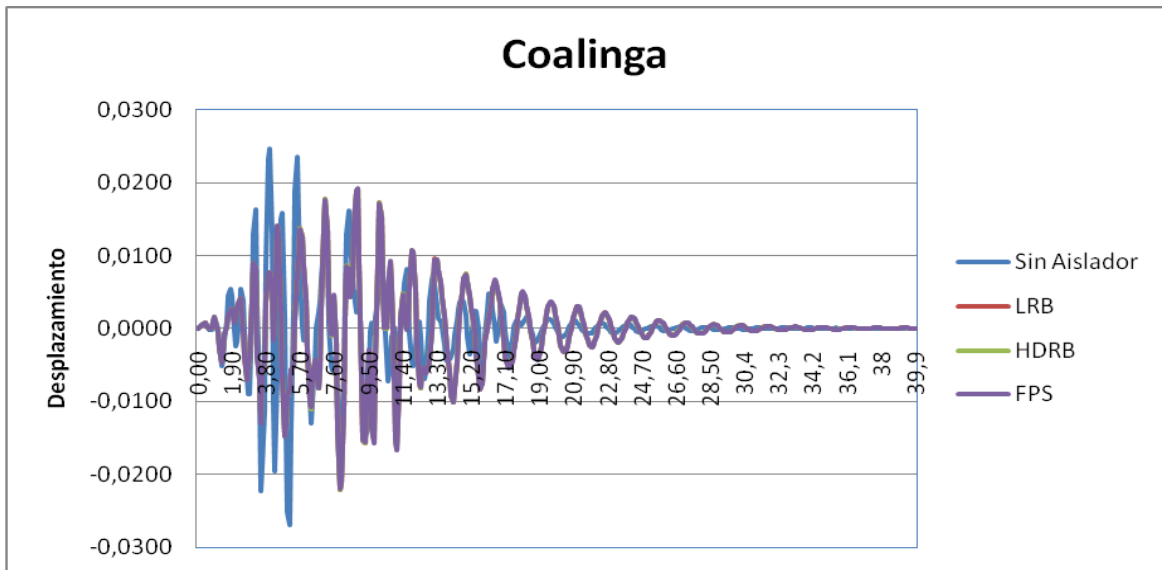
Como se ha dicho, en la gráfica se puede detallar la disminución de las frecuencias bajo la implementación de sistemas de aislamiento de base para todos los casos, pudiéndose observar que en general, se registra una disminución mayor tras la utilización de los sistemas HDRB y LRB.

6.2. DESPLAZAMIENTOS

Por medio del software Sap2000 se obtuvieron los desplazamientos para cada uno de los sismos correspondientes a la Zona 2 para la Falla Frontal y la Falla Bucaramanga-Santa, obteniendo los desplazamientos que se muestran a continuación para cada uno de los eventos sísmicos. Estos desplazamientos se calcularon para un punto de control ubicado en la parte superior de la pila más alta del Viaducto La Flora, en la interacción Subestructura-Superestructura para el modelo sin aislamiento sísmico y en la interacción Subestructura-Aislador para los modelos bajo condiciones aisladas.

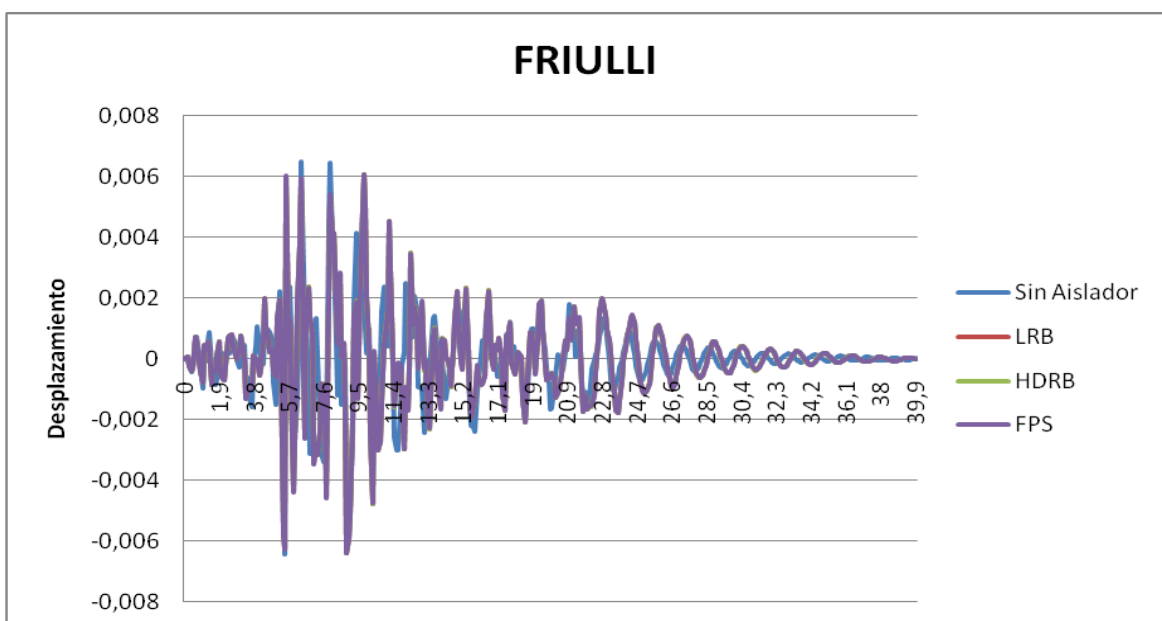
6.2.1. Resultados para sismos de la Falla Bucaramanga-Santa Marta

Figura 6. 18. Desplazamientos para Coalinga.



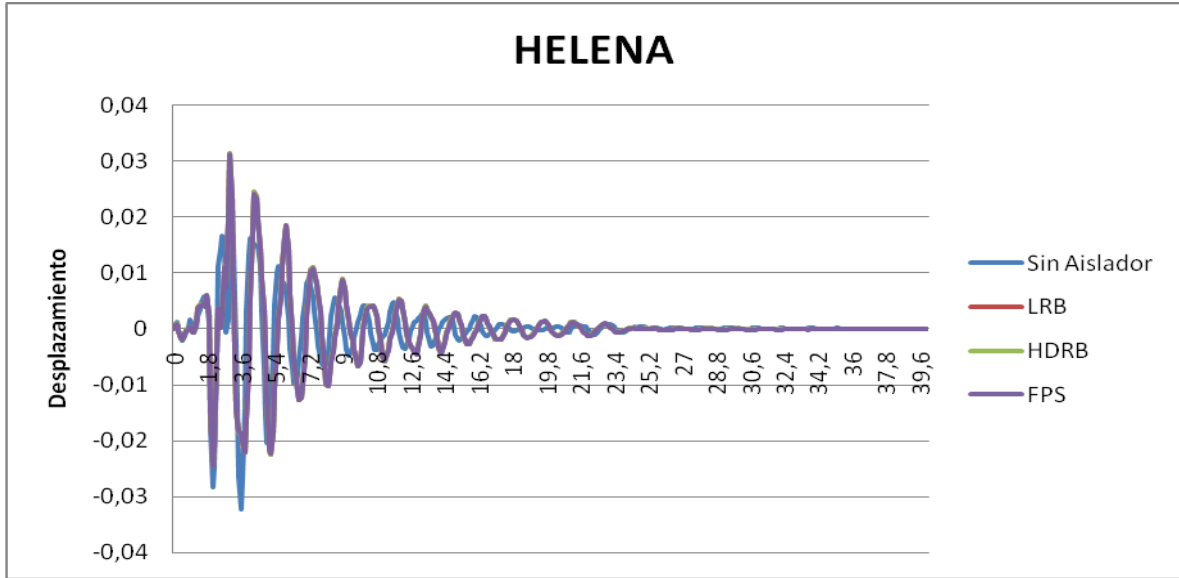
Desplazamientos Máximos [m]			
Sin Aislador	LRB	HDRB	FPS
0,0269	0,0221	0,02209	0,02198

Figura 6. 19. Desplazamientos para Friulli.



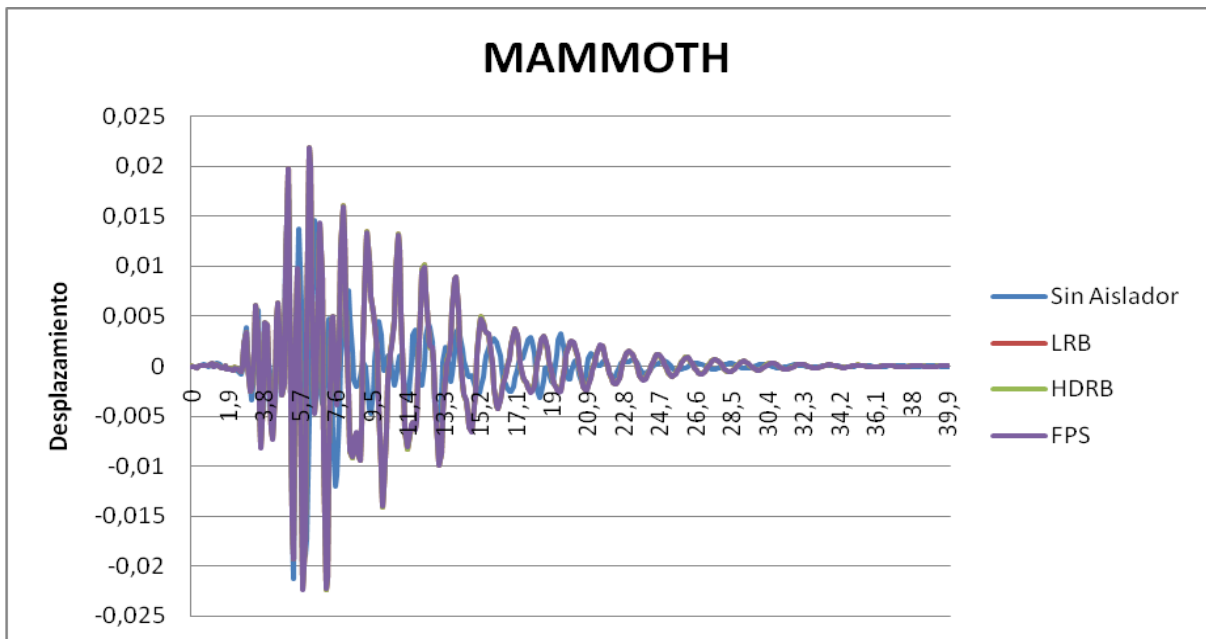
Desplazamientos Máximos [m]			
Sin Aislador	LRB	HDRB	FPS
0,00648	0,0064	0,0064	0,00638

Figura 6. 20. Desplazamientos para Helena.



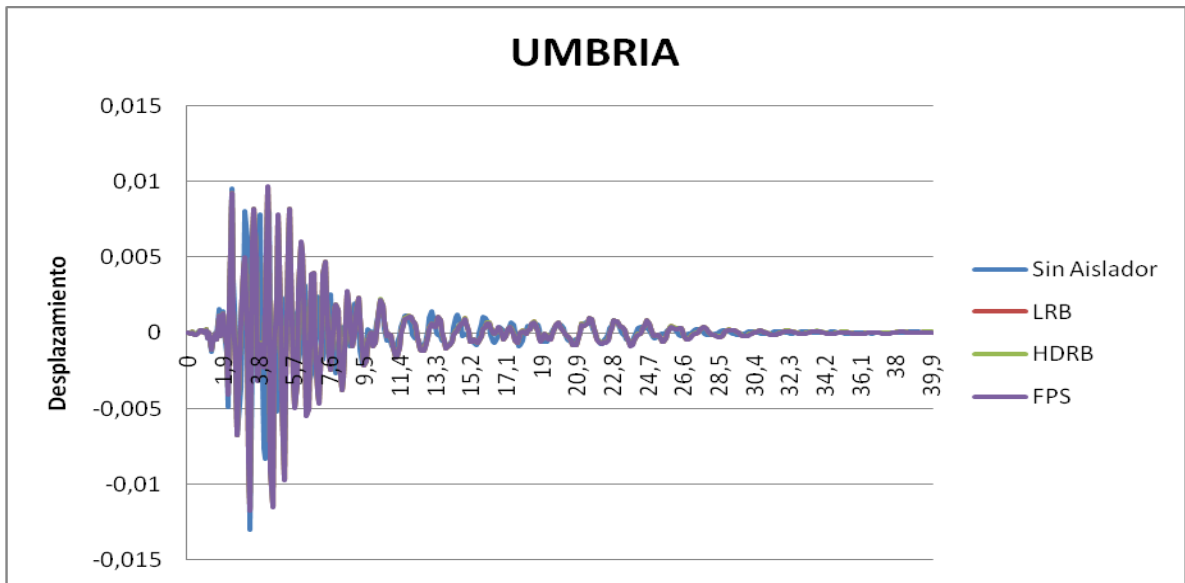
Desplazamientos Máximos [m]			
Sin Aislador	LRB	HDRB	FPS
0,03236	0,03135	0,03135	0,03127

Figura 6. 21. Desplazamientos para Mammoth.



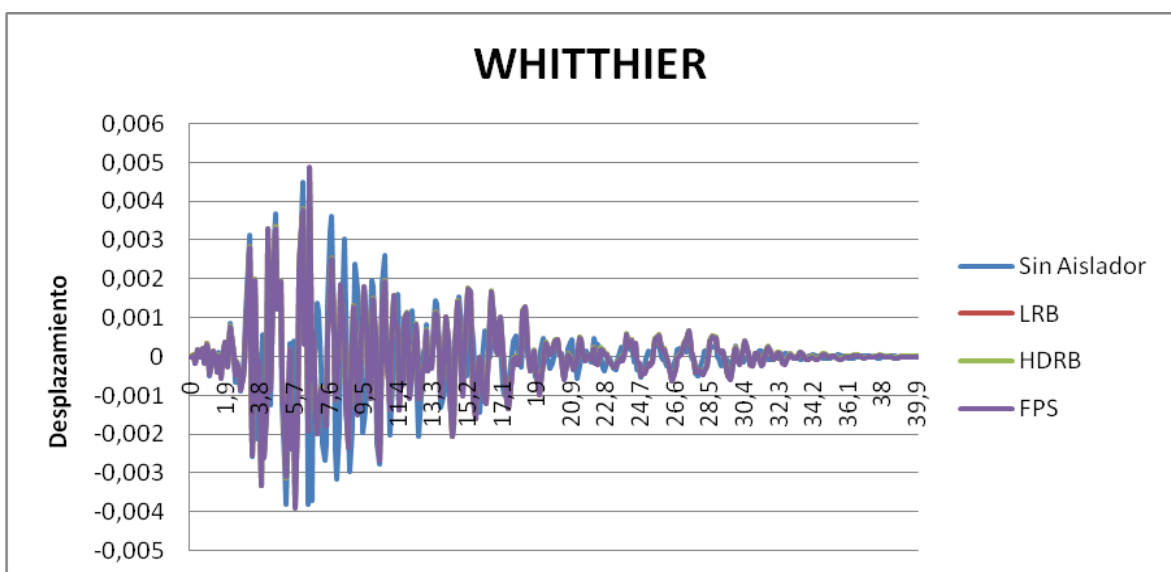
Desplazamientos Máximos [m]			
Sin Aislador	LRB	HDRB	FPS
0,02106	0,02235	0,02235	0,02234

Figura 6. 22. Desplazamientos para Umbria.



Desplazamientos Máximos [m]			
Sin Aislador	LRB	HDRB	FPS
0,01302	0,01169	0,0117	0,01174

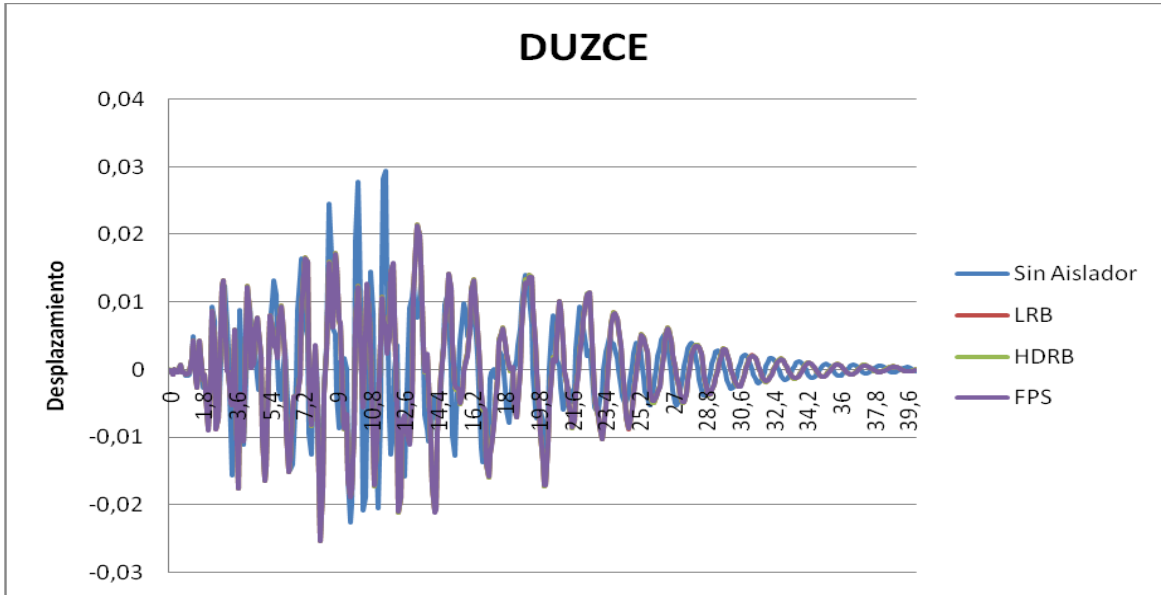
Figura 6. 23. Desplazamientos para Whittier.



Desplazamientos Máximos [m]			
Sin Aislador	LRB	HDRB	FPS
0,0045	0,00484	0,00484	0,0049

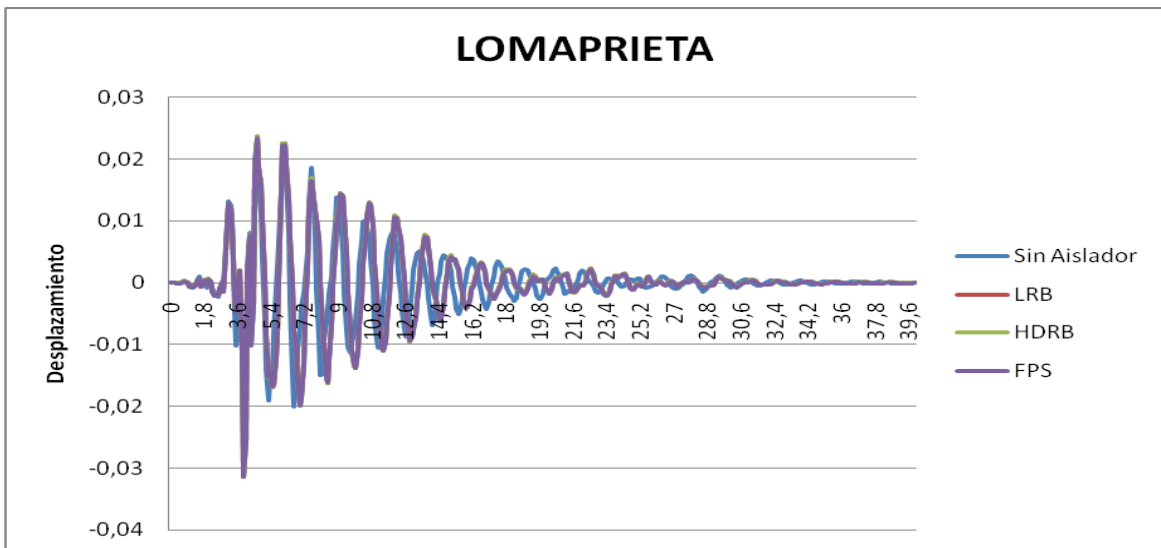
6.2.2. Resultados para los sismos de la Falla Frontal

Figura 6. 24. Desplazamientos para Duzce.



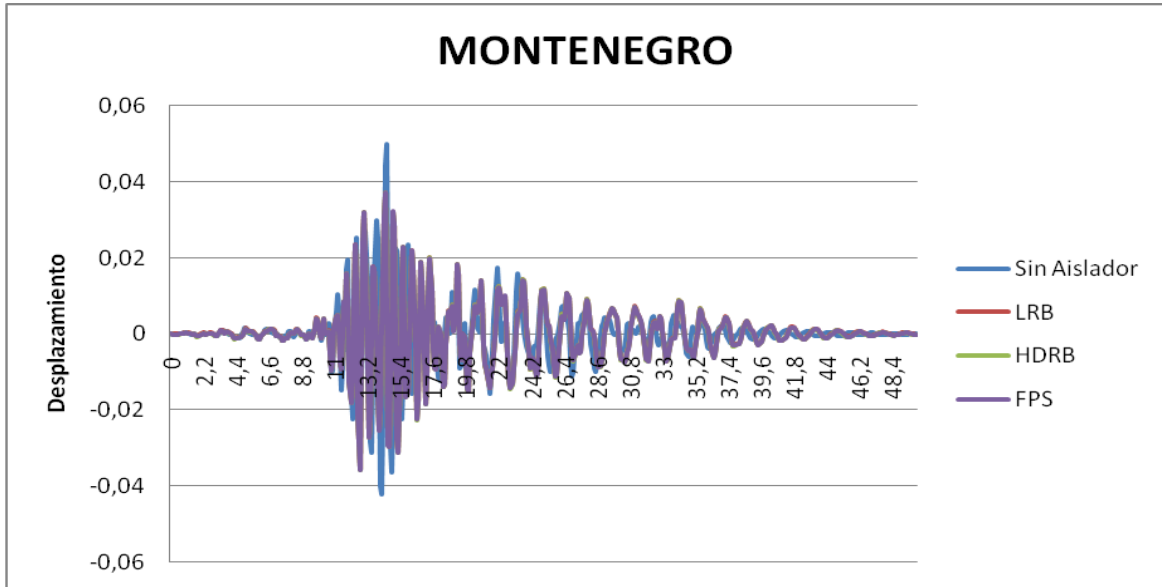
Desplazamientos Máximos [m]			
Sin Aislador	LRB	HDRB	FPS
0,02947	0,02533	0,02533	0,0253

Figura 6. 25. Desplazamientos para Loma Prieta.



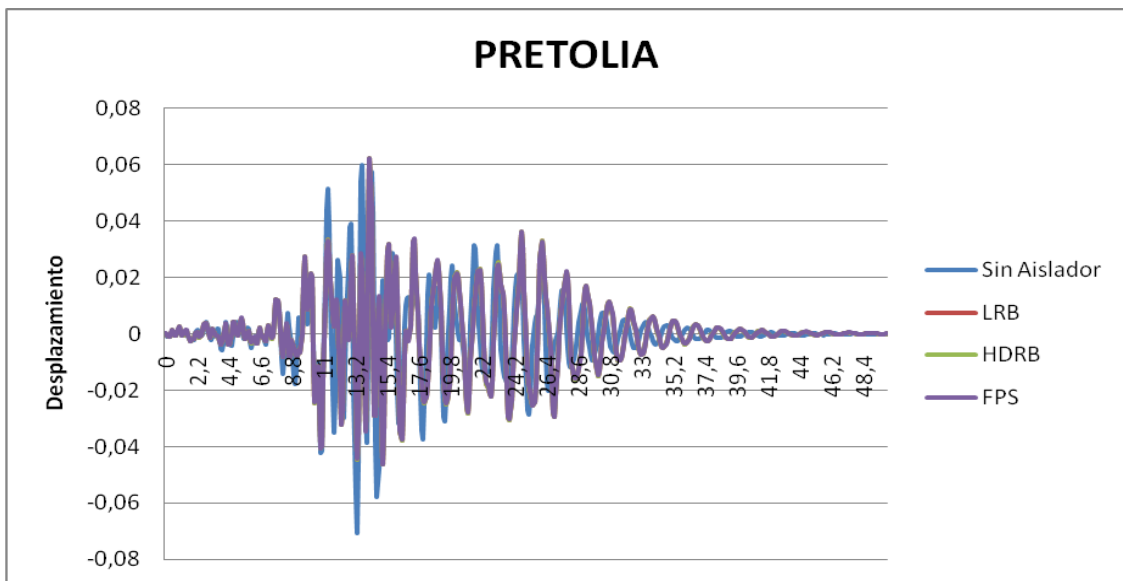
Desplazamientos Máximos [m]			
Sin Aislador	LRB	HDRB	FPS
0,0235	0,03143	0,03143	0,03135

Figura 6. 26. Desplazamientos para Montenegro.



Desplazamientos Máximos [m]			
Sin Aislador	LRB	HDRB	FPS
0,04983	0,03706	0,03707	0,03727

Figura 6. 27. Desplazamientos para Pretolia.



Desplazamientos Máximos [m]			
Sin Aislador	LRB	HDRB	FPS
0,07056	0,06224	0,06223	0,06208

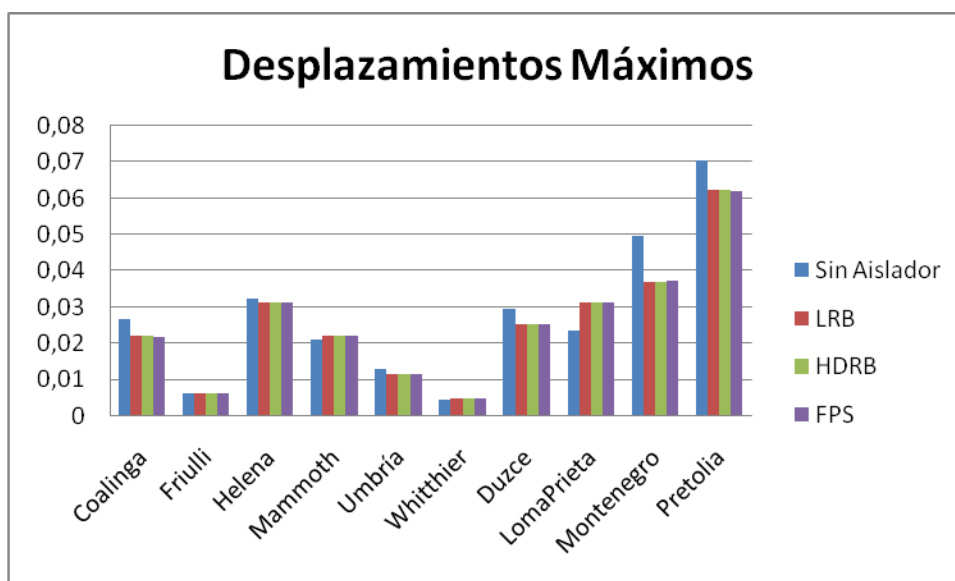
La siguiente tabla, es una tabla resumen que muestra los desplazamientos máximos obtenidos para cada uno de los sismos mostrados anteriormente

Tabla 6. 4. *Desplazamientos máximos.*

	Desplazamientos Máximos [m]			
	Sin Aislador	LRB	HDRB	FPS
Coalinga	0,0269	0,0221	0,02209	0,02198
Friulli	0,00648	0,0064	0,0064	0,00638
Helena	0,03236	0,03135	0,03135	0,03127
Mammoth	0,02106	0,02235	0,02235	0,02234
Umbría	0,01302	0,01169	0,0117	0,01174
Whittier	0,0045	0,00484	0,00484	0,0049
Duzce	0,02947	0,02533	0,02533	0,0253
Loma Prieta	0,0235	0,03143	0,03143	0,03135
Montenegro	0,04983	0,03706	0,03707	0,03727
Pretolia	0,07056	0,06224	0,06223	0,06208

Para finalizar, se muestra un gráfico de barras con la comparación en los desplazamientos máximos obtenidos.

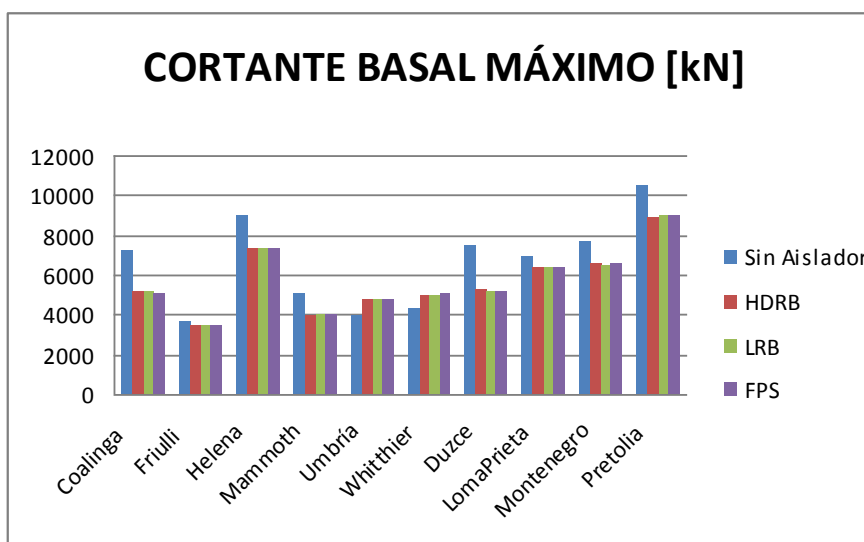
Figura 6. 28. Desplazamientos Máximos.



De la misma forma, se hizo necesario realizar el cálculo de los cortantes basales experimentados por la estructura tras la aplicación de los diferentes sismos, obteniéndose los siguientes resultados:

	CORTANTE BASAL MÁXIMO [kN]				
	Sin Aislador	HDRB	LRB	FPS	%
<i>Coalinga</i>	7214,379	5119,393	5110,128	5045,505	30
<i>Friulli</i>	3690,441	3427,089	3435,823	3434,931	7
<i>Helena</i>	8985,464	7338,758	7331,001	7285,646	19
<i>Mammoth</i>	5096,228	3980,213	3998,507	3989,616	22
<i>Umbria</i>	3920,766	4790,065	4796,725	4798,852	-22
<i>Whitthier</i>	4357,957	5015,33	5006,866	5017,411	-15
<i>Duzce</i>	7469,608	5216,687	5176,92	5191,364	31
<i>LomaPrieta</i>	6965,684	6331,109	6366,24	6342,705	9
<i>Montenegro</i>	7678,207	6551,138	6515,173	6535,02	15
<i>Pretolia</i>	10526,71	8945,093	8979,156	8986,467	15

El siguiente gráfico de barras muestra la comparación de los diferentes cortantes basales máximos obtenidos



6.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con base en los resultados obtenidos en el capítulo anterior, se observa lo siguiente:

- Las tres soluciones de aislamiento de base, para los tres dispositivos, HDRB, LRB y FPS, tienen un comportamiento similar, ya que sus propiedades de rigidez calculadas son iguales en el caso de los dispositivos elastoméricos, y muy parecidas entre estos y el péndulo friccional, debido a la gran rigidez de la subestructura, la oscilación del puente no permite que los dispositivos sobrepasen el rango lineal de deformación, lo cual permitiría deformaciones distintas para los dispositivos LRB y FPS.
- La reducción de las frecuencias de oscilación para los cuatro modos de vibración analizados fueron: Para el primer modo de un 18,9% para los aisladores elastoméricos y de un 0,8% para el péndulo friccional. Para el segundo modo de vibración se obtuvo una reducción del 12,8% para los aisladores elastoméricos y un 4,5% para el péndulo friccional. Para el tercer modo de vibración se obtuvo un 8,3% de reducción en la frecuencia para los dispositivos elastoméricos y un 5,3% de reducción

para el péndulo friccional. Finalmente, en el cuarto modo de vibración se obtuvo una reducción en la frecuencia del 7,1% para los dispositivos HDRB y LRB, y una disminución del 7,3% para el dispositivo FPS.

- Las frecuencias vibracionales de la estructura, disminuyen tras la implementación de dispositivos de aislamiento de base, lo cual proporciona una estructura menos rígida ante la acción sísmica con un aumento del período de oscilación.
- Aunque lo esperado tras la implementación de sistemas de aislamiento de base, es una disminución en los desplazamientos de la subestructura, para los sismos de Mammoth, Whittier y Lomaprieta, se obtuvo un aumento del 6,2% para Mammoth, 7,6% para Whittier y un 33,7% para Lomaprieta.
- En todos los sismos a excepción de los tres mencionados anteriormente, se obtuvo una reducción en los desplazamientos de 17,8% para Coalinga, 1,3% para Friulli, 3,1% para Helena, 10,21% para Umbria, 14,1 para Duzce, 25,6% para Montenegro y un 11,8% para Pretolia.
- Los desplazamientos del puente sin condiciones de aislamiento de base son bastante pequeños no superando los 8,0 [cm] en el caso más desfavorable, el cual, sería el sismo de Pretolia con 7,056 [cm]. Esto debido a la gran rigidez proporcionada al puente por la subestructura.
- Tras la implementación de los aisladores, se obtuvo una reducción en la fuerza cortante experimentada en la base por la estructura hasta de un 31% para el sismo de Duzce, 30% para Coalinga, 22% para Mammoth, 19% para Helena, 15% para Montenegro y Pretolia, 9% para LomaPrieta y un 7% para Friulli.

- Aunque se esperaba una disminución de las fuerzas para todos los caso, se encontró un aumento de los cortantes de un 22% para Umbria y 15% para Whittier.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

- La implementación de aisladores sísmicos es favorable a la estructura ya que al aumentar el periodo de vibración esta se hace más flexible, lo cual implica una mayor disipación de energía.
- En la estructura analizada se vio que el comportamiento bajo la acción de los diferentes tipos de aisladores fue muy similar, esto debido a que los sismos utilizados, a pesar de ser los apropiados, no afectan la estructura del viaducto La Flora de una forma significativa gracias a la gran rigidez de esta.
- La respuesta obtenida con el HDRB y el LRB fue casi la misma debido a que el aislador LRB no alcanzo el rango no lineal en su respuesta por lo mencionado anteriormente.
- El diseño y dimensionamiento de los aisladores HDRB y LRB se basa fundamentalmente en la rigidez horizontal de la estructura y el núcleo de plomo presente en el LRB nos permite tener un aislador de menor tamaño con el mismo comportamiento que el HDRB.
- La solución analizada en este estudio muestra un mejoramiento del comportamiento de la estructura, lo cual era el resultado esperado, pero también pudimos ver como por las características propias del viaducto La Flora, no se vio una mejora significativa en desplazamientos, aunque, hablando en términos de fuerza cortante, la reducción fue significativa en ciertos casos.
- Una forma más eficaz de aislación sísmica sería ubicando los aisladores en la interfaz viga cabezal - pila, pero debido al sistema estructural del viaducto La Flora no hace viable esta opción.

- Se recomienda a quien se interese en el tema, analizar los comportamientos que difieren con la respuesta esperada en el estudio, más específicamente las respuestas de fuerzas obtenidas para los sismos de Umbria y Whittier.

BIBLIOGRAFÍA

TESIS

- **FERREIRA MARQUES DE ABREU, J. T.** Análise Comparativa de Soluções de Sistemas de Isolamento Sísmico em Pontes: Aplicação a um caso de Estudo. 2007. Tesis de Maestría (Ingeniería Civil). Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa.
- **ORTIZ APONTE, R. A., GÉLVEZ MUNEVAR, J. F.** Espectros Generalizados de Deriva para Bucaramanga Usando un Modelo Continuo. Trabajo de Grado (Ingeniero Civil). 2008. Universidad Industrial de Santander. Facultad Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil.

REVISTAS, FOLLETOS, ARTICULOS Y NOTAS

- **TRUMMER, D. J., SOMMERS, S. C.** Overview of Seismic Base Isolation Systems, Applications, and Performance During Earthquakes. August, 1993. Lawrence Livermore National Laboratory.
- **JANGID, R.S., DATTA, T.K.** Seismic Behaviour of Base-Isolated Buildings: A State-of-the-Art Review. 1995.
- **MORENO, D. M., YAMÍN, L.E., REYES, J.C.** Estudio Experimental de Aisladores Sísmicos Tipo Péndulo de Fricción en Modelos a Escala Reducida. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

- **DE LA LLERA, J. C., ÁLVAREZ, M., LÜDERS, C.** Norma de Aislamiento Sísmico: Sismos Bajo Control. Revista BIT, Mayo 2004.
- **MATSAGAR. V. A., JANGID, R. S.,** Seismic Response of Simply Supported Base-Isolated Bridge with Different Isolators. Internacional Journal Of. Applied Science and Engineering. 2006. 4, 1: 53-69.
- **INGEOMINAS (2001).** Zonificación Sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga

SIMPOSIOS, SEMINARIOS, CONFERENCIAS Y PONENCIAS Y APUNTES DE CLASE

HURTADO, J. C., SUÁREZ, V. A. Implementación del Diseño Directo Basado en Desplazamientos para Puentes con Sistemas de Aislamiento Sísmico. XIX Jornadas Nacionales de Ingeniería Estructural, Riobamba, Ecuador, 11-13 de Abril.