

**DISIPADORES Y AISLADORES SÍSMICOS, MODELO DE PUENTE
VEHICULAR CON DISIPADOR Y SIN DISIPADOR DE ENERGÍA,
COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA.**



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

LAURA TATIANA LEON JOYA

**FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
VISITA TECNICA INTERNACIONAL
BOGOTA D.C.**

2016

**DISIPADORES Y AISLADORES SÍSMICOS, MODELO DE PUENTE
VEHICULAR CON DISIPADOR Y SIN DISIPADOR DE ENERGÍA,
COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA.**

LAURA TATIANA LEON JOYA

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Civil

**Director
ING. MARISOL NEMOCON RUIZ
Ingeniera Civil**

**Co-Director
ING. JAIME ERASMO GARZON MORENO
Ingeniero Civil**

**UNVIERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
BOGOTA D.C.
2016**



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5 CO)

This is a human-readable summary of (and not a substitute for) the [license](#).

[Advertencia](#)

Usted es libre para:



Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

Adaptar — remezclar, transformar y crear a partir del material

El licenciente no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe darle crédito a esta obra **de manera adecuada**, proporcionando un enlace a la licencia, e **indicando si se han realizado cambios**. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo del licenciente.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con **finés comerciales**.

Nota de Aceptación

Director de Investigación
Ing. Marisol Nemocón Ruiz

Co-Director
Ing. Jaime Erasmo Garzón Moreno

Firma del jurado

Bogotá D.C., 22 de noviembre de 2016

*A Dios, a mis padres por su amor incondicional,
mi hermano Sebastián por ser el pilar de mi vida.
A Nicolás y Lina María por su absoluto apoyo.
¡Este logro es para ustedes!*

Especialmente, en memoria de Mérida Pinilla.

AGRADECIMIENTOS

A la ingeniera Marisol Nemocón Ruiz, por su paciencia, tiempo y dedicación para lograr la ejecución de este proyecto. Quien brindo amablemente su colaboración en cada fase de esta investigación.

Al Ingeniero Jaime Erasmo Garzón Moreno, quien gracias a su conocimiento y amplia experiencia en la aplicación de estos sistemas reforzó amablemente los conceptos necesarios para cumplir este objetivo.

A los docentes influyentes durante mi proceso de formación profesional, familia y amigos que presenciaron cada pasó de este camino.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	14
1. GENERALIDADES	15
1.1 ANTECEDENTES.....	16
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
1.2.1 Descripción del problema	18
1.2.2 Formulación del problema	18
1.3 OBJETIVOS.....	19
1.3.1 OBJETIVO GENERAL:.....	19
1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS:	19
1.4 JUSTIFICACION.....	20
1.5 DELIMITACION	21
1.5.1 Espacio.....	21
1.5.2 Tiempo.....	21
1.5.3 Contenido	21
1.5.4 Alcance.....	21
2. MARCO DE REFERENCIA.....	22
2.1 MARCO TEORICO	22
2.1.1 Uso de sistemas de control sísmico.	22
2.1.1.1 A nivel Mundial.	22
2.1.1.2 América Latina.	24
2.1.1.4 A nivel nacional.	25
2.2 MARCO CONCEPTUAL.....	26
2.2.1 Sismo.	26
2.2.2 Sistemas de control pasivo.....	26
2.2.3 Aisladores de base.....	26
2.2.5 Espectro de diseño.....	27

2.2.6 Microzonificación sísmica.....	27
3. SISTEMAS DE CONTROL SISMICO	28
3.1 SISTEMAS DE CONTROL PASIVO:.....	28
3.1.1 Aisladores.....	29
3.1.2 Disipador de energía	31
3.1.2.1 Disipadores histeréticos	31
3.1.2.2 Disipadores viscoelásticos	32
4. ESTADO DEL ARTE.....	33
5. METODOLOGIA	34
6. DESCRIPCION DEL MODELO MATEMATICO DEL PUENTE A ANALIZAR....	36
7. ASPECTOS A CONSIDERAR EN EL ANALISIS DEL PUENTE	40
7.1 COMPARACION NORMA DE DISEÑO COLOMBIA- PANAMA.....	40
7.2 PARAMETROS DE DISEÑO.....	45
7.2.1 Materiales.....	45
7.2.2 Dimensiones.....	47
7.2.3 Cargas.....	50
7.2.4 Neopreno.....	53
7.2.5 Características del aislador	54
7.2.6 Espectro de aceleraciones	56
8. MODELO Y ANALISIS DE PUENTE CON AISLADOR Y SIN AISLADOR	66
9. ANALISIS DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES	80
10. CONCLUSIONES	92
11. RECOMENDACIONES.....	95
12. BIBLIOGRAFIA	96

TABLA DE IMÁGENES

Imagen 1. Caída de techo y muros de una vivienda del casco urbano.	17
Imagen 2. Biomuseo, Ciudad de Panamá.	25
Imagen 3. Aislador elastómero de alto amortiguamiento. LRB	29
Imagen 4. Aislador elastómero con núcleo de plomo.	30
Imagen 5. Sistema péndulo de fricción.	31
Imagen 6. Esquema comportamiento histerético.	32
Imagen 7. Diseño en planta puente vehicular.	36
Imagen 8. Sección longitudinal puente a diseñar.	36
Imagen 9. Dimensionamiento sección transversal. Fuente. Autora, 2016.	37
Imagen 10. Sección transversal puente a diseñar.	38
Imagen 11. Esquema viga tipo 1 - 2.	39
Imagen 12. Velocidad de diseño y factor de dirección del viento-REP2004.	42
Imagen 13. Vista panorámica Ciudad de Panamá.	44
Imagen 14. Definición resistencia de concreto para vigas.	45
Imagen 15. Resistencia de concreto para estribos, losas y pilas.	46
Imagen 16. Definición de sistema de coordenadas SAP2000.	47
Imagen 17. Esquema básico viga tipo en zona central-apoyo.	48
Imagen 18. Dimensionamiento pilas.	49
Imagen 19. Dimensionamiento viga cabezal.	49
Imagen 20. Camión de diseño C-14.	51
Imagen 21. Teorema de Barre aplicado a C-14 y Tándem.	52
Imagen 22. Diagrama de cortante viga-1.	53
Imagen 23. Reacciones viga-1.	53
Imagen 24. Dimensionamiento de neopreno.	54
Imagen 25. Esquema aislador LRB.	54
Imagen 26. Comparación de sistemas de aislación.	55
Imagen 27. Mapa de valores. PGA.	57
Imagen 28. Mapa de valores Ss.	58
Imagen 29. Mapa de valores S1.	59
Imagen 30. Espectro de aceleraciones manual.	64
Imagen 31. Dimensionamiento en software puente de losa y viga.	66
Imagen 32. Esquema dimensionamiento para vigas.	67
Imagen 33. Revisión vista en 3D.	68
Imagen 34. Definición de apoyo de neopreno en software.	70
Imagen 35. Apoyo de neopreno acoplado.	71
Imagen 36. Esquema, vista en 3D apoyo neopreno en software.	72
Imagen 37. Chequeo de datos en software.	73
Imagen 38. Espectro de diseño en software.	74
Imagen 39. Esquema espectro de aceleraciones, ciudad Pereira.	74
Imagen 40. Definición de cargas en el modelo.	75
Imagen 41. Carga de frenado, total de cargas en el modelo y simulación de eventos sísmicos.	76
Imagen 42. Esquema general modelo convencional finalizado.	77
Imagen 43. Resultado Pila 1 - Pila 2.	78

Imagen 44. Definición aislador en software.	79
Imagen 45. Diagrama de fuerzas internas modo 1 con sistema.	80
Imagen 46. Fuerzas internas modo 1 Sin sistema de aislación.	80
Imagen 47. Esquema general sobre modelo convencional modo 1.	81
Imagen 48. Fuerza internas modo 10 Con sistema de control.	81
Imagen 49. Esquema general fuerzas internas sin sistema, modo 10 y diagrama de cortante.	82
Imagen 50. Esquema general fuerzas internas con sistema modo 10.	82
Imagen 51. Modo 1 con sistema de disipación.	85
Imagen 52. Modo 2 con sistema de disipación.	85
Imagen 53. Modo 3 con sistema de disipación.	85
Imagen 54. Modo 4 con sistema de disipación.	86
Imagen 55. Modo 5 con sistema de disipación.	86
Imagen 56. Modo 6 con sistema de disipación.	86
Imagen 57. Modo 7 con sistema de disipación.	86
Imagen 58. Modo 8 con sistema de disipación.	87
Imagen 59. Modo 21 con sistema de disipación.	87
Imagen 60. Modo 23 con sistema de disipación.	88
Imagen 61. Comparación periodos obtenidos sin aislación y aplicando LRB.	89
Imagen 62. Cortante en pilas modelo convencional.	90
Imagen 63. Cortante en pilas modelo con LRB.	90
Imagen 64. Desplazamientos vs. Modos de vibración.	91

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos espectro de aceleraciones.....	63
Tabla 2. Análisis modal, periodos y frecuencias SAP2000 modelo convencional.	83
Tabla 3. Análisis modal, periodos y frecuencias SAP2000 modelo con LRB.....	84
Tabla 4. Resumen porcentaje de participación de masa en sismo..	92

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Catalogo AGOM International – Seismic Isolation.

RESUMEN

En este documento se relaciona una breve descripción de los sistemas de control sísmico tal como se ha desarrollado e implementado alrededor del mundo. Se realiza un consolidado de la serie de pasos a desarrollar para la ejecución de un modelo matemático de puente vehicular de losa y viga empleando un aislador elastómero por medio de software, simulando la acción de sismo. Se elabora una comparación de modo cuantitativo de la respuesta sísmica obtenida entre el modelo con aislador y el modelo convencional simulado a una ciudad de alta vulnerabilidad sísmica.

Palabras Clave: Control sísmico, disipador de energía, sismo.

INTRODUCCION

En la actualidad, las estructuras abarcan una serie de parámetros que rigen la construcción sismo resistente, por medio de reglamentos que exigen según Zonas de Amenaza Sísmica definidas, en las cuales se encuentran cada una de las ciudades del país, siendo el caso de Colombia. A raíz del sismo registrado en Popayán el 31 de marzo de 1983 de 5.5 grados en la escala de Richter que cobró aproximadamente 287 muertos y 7248 heridos afectando más de 100.000 habitantes (Caribe-CEPAL, 2006) además de tardar su reconstrucción tres años, por ello, se identificó la necesidad de crear un documento en respuesta a esta tragedia, de modo que el país disponga de un reglamento moderno y actualizado en todo momento.

Partiendo de este suceso, se logra identificar el sismo como uno de los riesgos más tenebrosos que afectan las construcciones, pues este es un fenómeno natural cuyo momento de ocurrencia, magnitud y ubicación geográfica es aún difícil de identificar, ya que afecta la estabilidad en las construcciones, aunque el objetivo sea resistir los efectos que trae a su paso, evitando el colapso generado por acumulación de energía que proviene del movimiento entre las placas tectónicas, ocasionando vibraciones, es necesario la implementación de nuevas tecnologías aplicadas al diseño estructural con el fin de disminuir el grado de vulnerabilidad, la pérdida de vida humana resistiendo consigo al colapso de la misma y mejorando su respuesta antes, durante y después en un evento sísmico.

De esta circunstancia nace el hecho de que, dado que en cualquier momento podría ocurrir un evento sísmico de alta o media magnitud, estas estructuras demandan el uso de nuevas metodologías con el fin de brindar mayor seguridad y durabilidad, por ello es necesario trabajar en la investigación de la aplicación de sistemas de control sísmico como aisladores o disipadores de energía logrando describir algunos de ellos, función y aplicación en el desarrollo de un modelo de puente vehicular de losa y viga realizado en el software SAP 2000 con ayuda de profesionales expertos. Además de la descripción de los datos encontrados en Ciudad de Panamá en términos de sismicidad.

1. GENERALIDADES

En Colombia, así como a nivel mundial, se han presentado catástrofes debido a los daños generados y/o deterioro en los elementos estructurales a causa de eventos sísmicos, ya que absorben la energía de entrada del sismo (Karavasilis T., 2012), teniendo como primera instancia pérdidas de vida, ya que cuando estos movimientos actúan pueden generar grandes afectaciones, considerando que no todas las edificaciones construidas en el país cuentan con el actual Reglamento de Construcciones Sismo Resistentes NSR-10, o en el peor de los casos con ninguna especificación de las normas anteriores.

A causa de estos fenómenos, países que se han visto realmente afectados partieron de la necesidad de disminuir el riesgo sísmico planteando, investigando y ejecutando nuevos métodos que permitan garantizar estructuras más seguras, es el caso de los aisladores y disipadores de energía, dispositivos situados en la superestructura e infraestructura de edificaciones y puentes permitiendo disminuir el daño causado por estos fenómenos aumentando la protección sísmica, sistema que aunque no es muy reciente, por lo tanto, no ha tenido gran aceptación debido a la necesidad de investigación, aspectos económicos, además de confiabilidad para los especialistas pues ha sido aplicado en países de alta sismicidad, con un ejemplo cercano en Latinoamérica siendo el caso de Chile, quien ha implementado estos métodos ya que es uno de los países de mayor sismicidad en el mundo. Por consiguiente, se dará a conocer los beneficios y resultados obtenidos a nivel mundial en cuanto al uso de estos elementos, con el propósito de localizar nuevas alternativas de diseño sismo resistente que pueda ser aplicada a las estructuras del país buscando constantemente la mejora en cuanto al comportamiento estructural se refiera, evitando primordialmente pérdidas de vida, una vez que se presenten fenómenos ya sea de alta o baja sismicidad.

Ahora bien, en cuanto al Canal de Panamá, este se encuentra en el Istmo de Panamá, el cual está situado sobre la “Micro placa de Panamá”, a su vez está rodeada por cuatro placas tectónicas mayores: la Placa del Caribe al norte, la Placa de Nazca al sur, la placa Sudamericana al este y Placa de Coco al suroeste. La placa tectónica de Nazca que cruza exactamente la zona del canal y es allí donde se junta con la placa del Caribe, cuando estas placas entran en fricción, se libera energía que al dirigirse a las fallas activas que se presentan cerca al Canal, generan un evento sísmico. Históricamente se han presentado sismos de gran intensidad (los máximos están entre 6 y 7 en la escala de Richter), sin embargo no han impactado la zona del canal.

1.1 ANTECEDENTES

En la China, hasta hace 5 años, se contaba con más de 450 edificaciones con aislamiento en la base y con más de 50 edificaciones con disipadores pasivos de energía, principalmente con fines de rehabilitación o reforzamiento estructural. Dentro de los dispositivos pasivos, los disipadores viscosos son los más comunes, seguidos de los disipadores metálicos de tipo X (X-shaped) o placas triangulares (Higashino y Okamoto, 2007; Tsai et al., 1993).

Taiwán, por su lado, también ha estado muy comprometido y activo en el desarrollo de nuevos dispositivos de control, especialmente disipadores metálicos de tipo histerético y estructuras inteligentes. Hasta mediados de 2003 se contaba con cerca de 20 edificaciones con diferentes dispositivos de control pasivo y 50 con aislamiento basal. El mayor número de aplicaciones corresponde a puentes, colegios, centros médicos, viviendas y oficinas. Entre los dispositivos de acero más utilizados se destacan las riostras metálicas con pandeo restringido y placas triangulares (Higashino y Okamoto, 2006).

En búsqueda de conocer el estado actual de las investigaciones realizadas en el país además del concepto de los profesionales se evidencio que Colombia A diferencia de países latinoamericanos como México, Chile y Argentina, los cuales han demostrado que nuevas tecnologías de protección sísmica pueden ser desarrolladas y aplicadas en países latinoamericanos, aún requiere mayor investigación para ser considerado un país de vanguardia en el uso de sistemas de control de respuesta sísmica. Ya que muchos promotores desconocen las técnicas, otros desconfían de sus ventajas tanto económicas como estructurales, por lo tanto, hacen falta proyectos de investigación y aplicación donde se diseñen edificaciones con los mismos criterios sísmicos, con control de respuesta sísmica y sin él y se haga una comparación económica y técnica que permita verificar o derrumbar estos preconceptos. Además se necesita de programas de capacitación para los calculistas y constructores. (Juan Andrés Oviedo, 2010). Esto, sin contar aun el reciente avance a nivel nacional con la ejecución del viaducto Dos Quebradas-Risalda en cabeza del Ingeniero Gregorio Rentería.

En cuanto a sismo se refiere Colombia, por medio del Servicio Geológico Colombiano en la búsqueda de sismicidad histórica de Colombia quien ha sido el ente encargado de recopilar los efectos más relevantes de estos fenómenos, se encuentra que el primer sismo del cual existe información sobre efectos en el actual territorio colombiano data del año 1566, cuando los pueblos de Popayán y

Cali fueron estremecidos por un fuerte temblor que destruyó algunas casas de tapia y teja (Ramírez, 1975). Los eventos que a la fecha se han estudiado inician en el año 1644 (sismo de Pamplona), hasta el 2008 (sismo de Quetame). No es la primera vez que en Colombia se realizan esfuerzos por recopilar y analizar la información relacionada con los sismos históricos que han afectado el país, pues autores como Jesús Emilio Ramírez (Colombia, 1975), Armando Espinosa Baquero (Historia sísmica de Colombia 1550-1830, entre otros), Elkin de Jesús Salcedo y Augusto Gómez Capera (Atlas macro sísmico de Colombia, entre otros), y otros más, han llevado a cabo importantes estudios que han permitido conocer con mayor profundidad, la historia sísmica del país.

Imagen 1. Caída de techo y muros de una vivienda del casco urbano.



Fuente. Sismo 18/10/1992, Frontino, 1992.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1 Descripción del problema

Colombia, es un país que requiere implementar nuevas tecnologías en cuanto a la protección sísmica con el fin de brindar mayor seguridad a las construcciones, evitando consigo posibles desastres que generen primordialmente pérdida de vida “Es un gran reto y responsabilidad para los ingenieros y todas las personas involucradas en el desarrollo de la infraestructura del país colaborar para la búsqueda de soluciones acordes con nuestras condiciones locales que otorguen una protección adicional a la infraestructura y a la comunidad. Las técnicas de control de respuesta sísmica constituyen acciones preventivas, ya que se le está dando un mejor manejo y control al deterioro estructural causado por posibles terremotos futuros” (Juan Andrés Oviedo, 2010). Por lo anterior, el planteamiento consiste en la creación de un diseño de puente vehicular empleando un sistema de control pasivo, que permita demostrar un posible método donde se logre identificar mejora en cuanto a la respuesta estructural frente a un evento sísmico, que contemple las consecuencias inesperadas después de su construcción. Tomando como referencia el primer puente de Latinoamérica (Viaducto Dos Quebradas) en el cual se aplicó este sistema.

1.2.2 Formulación del problema

Dadas las condiciones sísmicas presentes en el país ¿una solución viable en el diseño de puentes es el uso de aisladores sísmicos? ¿En qué magnitud disipa la energía sísmica en comparación con un puente convencional?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL:

Describir aisladores sísmicos y disipadores de energía, realizar un modelo matemático aplicando sistema de control pasivo que permita identificar las posibles ventajas, en desplazamientos y esfuerzos, al implementar estos sistemas.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- ✓ Realizar revisión bibliográfica e indagar sobre el uso de aisladores sísmicos, con el fin de obtener una visión más clara acerca de la posición de Colombia frente al contenido de la investigación.
- ✓ Crear un modelo de un puente de losa y viga que simule la acción del sismo aplicando un sistema de control pasivo comparando el diseño convencional sobre apoyos de neopreno, mediante el uso del software SAP2000 v.18.
- ✓ Evaluar y comparar fuerzas internas y deformaciones.
- ✓ Realizar comparación frente a la normatividad Colombiana y de Panamá.

1.4 JUSTIFICACION

Debido a que los sistemas de control sísmico son utilizados para la protección de diversos tipos de estructuras, tanto nuevas como estructuras existentes que requieren de refuerzo o rehabilitación, la finalidad de este proyecto es identificar por medio de la ejecución de un modelo que simula la acción del sismo en puentes vehiculares, planteando el desarrollo de sistemas modernos ante la acción de un posible evento de alta, media o baja magnitud, logrando así proponer y demostrar por medio de resultados concretos con ayuda del software SAP2000, ventajas al emplear un sistema de aislación o disipación de energía, buscando así, reducir esfuerzos que puedan ser resistidos por una estructura existente, partiendo de los requerimientos para desarrollar técnicas o métodos de rehabilitación estructural conociendo su aplicación en contexto, requerimiento que se justifica en dos aspectos: la mayoría de ciudades de Colombia se encuentran ubicadas en zona de amenaza sísmica intermedia y alta; por otro lado, muchas de las edificaciones existentes no fueron diseñadas para soportar cargas sísmicas, por lo tanto, nace la necesidad de indagar, investigar y analizar la implementación de sistemas que permitan diseñar estructuras, en este caso un puente que brinde mayor seguridad resaltando aquellas zonas que puedan presentar alto riesgo de vulnerabilidad sísmica en búsqueda de disminuir el riesgo y preservar la vida de cada uno de los habitantes, quienes usarán dichas estructuras.

Además, es importante resaltar la necesidad de promover la búsqueda e investigación de metodologías que permitan crear retos para los diseñadores estructurales, no solo abarcar los métodos convencionales, pues si bien es cierto, en cuanto exista mayor desarrollo, se podrán brindar estructuras con mayor nivel de seguridad y confiabilidad de modo, que a la hora de ocurrir un evento sísmico, esta se comporte de manera aceptable, siendo capaz de absorber y disipar la energía en este caso, al plantear un método alternativo de control sísmico durante un tiempo considerable.

1.5 DELIMITACION

1.5.1 Espacio

Esta investigación se desarrolla teniendo en cuenta las especificaciones indicadas en las normas colombianas; el puente se diseña considerando que será para la ciudad de Pereira.

1.5.2 Tiempo

El proyecto se desarrolla durante el semestre académico en el cual está inscrita la asignatura Trabajo de Grado.

1.5.3 Contenido

Durante el desarrollo del documento, se indicarán algunos de los sistemas de control sísmico, su clasificación, información general a nivel mundial a cerca de su implementación, finalizando con la ejecución de un modelo de puente vehicular modelado por medio de software SAP 2000 V.18 con el fin de aplicar un disipador de energía que permita identificar la favorabilidad de la respuesta sísmica al aplicar este sistema comparándolo con un modelo convencional apoyado sobre neopreno. Además, se realiza una comparación de la actual normal para diseño de puentes CCP-14 con la norma de diseño sismo resistente de la República de Panamá, según datos encontrados en la visita técnica Internacional realizada al Canal y Ciudad de Panamá.

1.5.4 Alcance

Se evaluará el comportamiento de un puente vehicular de losa y viga con disipador de energía tipo LRB y sin disipador respectivamente, teniendo en cuenta los parámetros de diseño en Colombia. Además se realizó una revisión bibliográfica existente en Panamá y Colombia sobre el uso de los aisladores sísmicos. Realizando consigo una comparación de las anteriores normas de diseño respecto a la implementación de dispositivos de control sísmico.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1 MARCO TEORICO

Hoy en día, existe una alta demanda a nivel mundial, acerca de la necesidad de creación de nuevas metodologías de diseño estructural ya que por medio de la protección sísmica se pretende lograr disminuir el riesgo, además de la pérdida de vida, pues ya se ha demostrado en diversos países las ventajas de su aplicación, donde gracias al uso de aisladores y disipadores se ha logrado disminuir el riesgo a nivel mundial, en especial en aquellos países de alta sismicidad donde continuamente se presentan este tipo de eventos.

A continuación se presentará una breve descripción del uso de estos sistemas según su ubicación, partiendo con una vista rápida a nivel mundial, pasando por el chequeo de datos encontrados en Panamá y finalizando en Colombia.

Los sistemas de control sísmico se han implementado como elementos altamente confiables, pues generan mayor certidumbre a la hora de observar, identificar y analizar el comportamiento de las estructuras en caso de encontrarse vulnerables por eventos de esta magnitud, esperando así que a la hora de implementarlos, estos demuestren alto desempeño en cuando a la protección sísmica refiera teniendo en cuenta los datos encontrados de sucesos anteriormente mencionados, que causaron la pérdida de vida, además de graves afectaciones a nivel estructural.

2.1.1 Uso de sistemas de control sísmico.

2.1.1.1 A nivel Mundial. Japón, país afectado constantemente por su alta amenaza sísmica tuvo que dar urgente respuesta a la necesidad de disminuir el riesgo, implementando nuevas tecnologías de control sísmico, tanto para las edificaciones como para los puentes vehiculares. (Juan Andrés Oviedo, 2010)

En los años 60s, debido a los daños ocurridos luego de un evento de alta sismicidad, registrado en 1964 conocido como Niigata, Japón. Uno de los fenómenos naturales más dramáticos de la historia dio paso a identificar la necesidad de iniciar con el desarrollo e implementación de nuevas tecnologías de control sísmico.

Pronto en los años 70s comenzó la implementación de amortiguadores viscosos, estos son elementos que funcionan a base de un pistón hidráulico que opera con aceite de silicona y válvulas mecánicas. Su función era disipar la energía con el periodo natural controlados por cables pretensados entre el tablero y la subestructura esto es Kyoto, Japón.

Para 1995, se registró el terremoto de Kobe con una magnitud local de 7.2 grados en la escala de Richter, El terremoto fue particularmente devastador porque había un foco superficial. El sismo tuvo un “mecanismo de desgarre”. La ruptura de la superficie resultante tenía un desplazamiento horizontal promedio de alrededor de 1,5 metros en la falla Nojima. Esta falla que corre a lo largo de la costa noroeste de la isla de Awaji. “ *Los expertos japoneses que, desde el gran terremoto de Kyoto de 1923 fueron perfeccionando los reglamentos y métodos de construcción antisísmica (hubo una revisión de las normas en 1971 y otra en 1981) confiaban en que los daños ocurridos en otras partes del mundo no sucederían en el Japón. Sin embargo, la realidad demostró otra cosa: alrededor de 400.000 edificios y viviendas resultaron dañados. Las edificaciones con daños más severos fueron las construidas con los reglamentos anteriores a 1970, mientras que las construidas según el reglamento de 1981, fueron más resistentes.*

Debido a la acción de las vibraciones sísmicas, los suelos arenosos de la región perdieron su capacidad de soportar cargas. Esta fue una de las mayores causas de destrucción de estructuras e instalaciones en las áreas costeras de la Bahía de Osaka, especialmente en las áreas ganadas al mar e islas artificiales como Port Island y Rokko.” (Sato, 1996)

En cuanto a los dispositivos deslizantes de apoyo, ya que estos no tienen un alto nivel de amortiguamiento, poca fuerza de restauración, su uso terminó en un dislocamiento después de un sismo y continuaría dislocándose durante las réplicas, generando consigo una superficie de desplazamiento plana. Por consiguiente, se presentó vulnerabilidad en los apoyos móviles y fijos, identificando fallas en los apoyos de los puentes. A causa de estos eventos se encontró que en los dispositivos de apoyo de acero, se presentan deficiencias en cuanto a resistencia, debilidad en estructuras con capacidad de resistencia lateral e insuficiente longitud de movimiento. (Freddy Duran, 2015). Una vez implementado este sistema, en la actualidad Japón cuenta con estrictos lineamientos que solicitan el reforzamiento de sus edificaciones, implementando estos sistemas desde las viviendas.

2.1.1.2 América Latina. En la actualidad, países como Argentina, México y Chile han implementado estos sistemas según cada de una de las necesidades en sus ciudades. Argentina ha implementado sistemas de aislamiento sísmico de base por medio de aisladores compuestos por cajas de resortes helicoidales y amortiguadores viscosos (Juan Andrés Oviedo, 2010). Uno de los países que actualmente sobresale por implementar en gran parte estos sistemas, debido a eventos sísmicos repetitivos, de alta magnitud con graves consecuencias a nivel social como económico es Chile, el cual luego de sufrir una serie de sismos de alta magnitud, ha optado por implementar en sus estructuras sistemas de aislación de base, implementando sistemas de alto amortiguamiento y de neopreno como el caso del Edificio Andalucía en 1992, pronto se implementó este sistema en el Viaducto Marga-Marga en 1996, logrando así reducir considerablemente el número de pilotes de fundación, con el fin de disminuir los efectos a causa de estos eventos. También se ha encontrado aplicaciones con aisladores elastoméricos logrando así edificios de gran altura como el rascacielos Titanium el cual incorpora 13 disipadores de energía.

Una obra importante es el Puente Amolanas, ya que se empleó en sus estribos amortiguadores visco elásticos, además de una red de acelerógrafos para obtener información detallada sobre el comportamiento frente a sismos de gran magnitud.

El puente Marga Marga corresponde a la primera obra de infraestructura vial en Chile que incluye bajo el tablero un sistema de aisladores sísmicos. Investigadores de la universidad de Chile e ingenieros del departamento de puentes del MOP instalaron una red de 21 acelerógrafos para monitorear su comportamiento sísmico. (Daniela Maldonado, 2009)

2.1.1.3 Panamá. En ciudad de Panamá, especialmente en el Canal, se encontró que no requiere grandes sistemas de control, ya que se encuentra ubicado estratégicamente sobre su propia Placa, es decir que posiblemente presenta una baja vulnerabilidad sísmica, aun así Ciudad de Panamá cuenta con redes instrumentadas por acelerógrafos que mantienen al día los datos de la red sísmica permanente así como en conjunto la información con países cercanos en los cuales se encuentra Colombia ya que es uno de sus limitantes, gracias a la Red Sismológica Nacional operada por INGEOMINAS.

Durante la visita técnica al Canal y Ciudad de Panamá, se encontraron datos de sismos ocurridos en años anteriores sin representar alto impacto, el dato más relevante en cuanto a sismicidad data el 22 de abril de 1991, donde 79 personas murieron a causa del terremoto de 7.9 grados en la escala de Richter, sucedió en Bocas del Toro.

Imagen 2. Biomuseo, Ciudad de Panamá.



Fuente: Autora.

2.1.1.4 A nivel nacional. En estos tiempos, Colombia, pionero en Suramérica en cuanto a puentes vehiculares con aisladores sísmicos se refiere, siendo un gran exponente de ello, el Puente Helicoidal de Dos Quebradas - Risaralda, con una longitud de 400m aproximadamente. La apertura helicoidal del viaducto tiene un diámetro de 180m, 7 luces distanciadas a 50m, dos voladizos terminales de 28m apoyado sobre aisladores sísmicos de péndulo por fricción con una capacidad de desplazamiento lateral máximo de 35 cm a cada lado, para un desplazamiento total de 70 cm colocando 2 aisladores en cada pila, permitiendo movimientos del mismo por efectos de temperatura, aislando la superestructura de la

infraestructura además de funcionar como disipador de energía, pues permite el desplazamiento y la elevación de la superestructura en caso de un sismo. (GRISA, 2015)

En cuanto a los Viaductos se tiene el de La Estampilla, el cual está sobre la falla geológica activa (entre pilas), de Neira y la falla Gaviones, representando un increíble aumento en los esfuerzos y desplazamientos a los cuales se puede someter una estructura local, que luego de evaluar la respuesta sísmica local de la zona, arrojó resultados que hacía de esta obra casi inviable. Como solución del estado del arte, con el fin de garantizar su integridad y vida útil, se llevó a investigar sobre diseño en cuanto al uso de aisladores sísmicos usado en otras partes del mundo, permitiendo transformar la energía generada por el sismo.

2.2 MARCO CONCEPTUAL

2.2.1 Sismo. Se denomina sismo o terremoto a las sacudidas o movimientos bruscos del terreno producidos en la corteza terrestre como consecuencia de la liberación repentina de energía en el interior de la Tierra o a la tectónica de placas. Esta energía se transmite a la superficie en forma de ondas sísmicas que se propagan en todas las direcciones. El punto en que se origina el terremoto se llama foco o hipocentro; este punto se puede situar a un máximo de unos 700 km hacia el interior terrestre. El epicentro es el punto de la superficie terrestre más próximo al foco del terremoto. (Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, 2003)

2.2.2 Sistemas de control pasivo. El control pasivo de estructuras es una de las estrategias que se han propuesto en los últimos años para controlar los desplazamientos y las fuerzas de inercia que se generan en los puentes durante un temblor. El concepto en el que se basa el control pasivo se orienta a la reducción de la demanda sísmica en la estructura y a mejorar su capacidad de disipar energía, más que en tratar de incrementar su capacidad de resistencia o de deformación. (Casas., 2002)

2.2.3 Aisladores de base. Estos elementos estructurales se denominan aisladores sísmicos y son dispositivos que absorben mediante deformaciones elevadas la energía que un terremoto transmite a una estructura. Estos dispositivos pueden ser de diferentes tipos y formas, los más conocidos son los basados en goma de alto amortiguamiento, goma con núcleo de plomo, neoprenos o friccionales. Estos sistemas pretenden aislar la superestructura del suelo, esto

con el fin de reducir al mínimo la energía que ingresa al sistema a causa de las ondas del sismo. Los dispositivos más utilizados son los aisladores elastómeros reforzados, deslizantes por fricción y basculantes por fricción. (Patiño, 2007)

2.2.4 Disipador de energía. Tienen como función disipar las acumulaciones de energía asegurándose que otros elementos de la estructura no sean sobre solicitados, evitando daños a la estructura. Es decir, los disipadores sísmicos ofrecen un incremento de la amortiguación a la estructura, cumpliendo su función de recibir inicialmente la energía que producen los movimientos sísmicos por acción de la concentración de fuerzas generadas por los límites de las placas tectónicas.

2.2.5 Espectro de diseño. Es el medio por el cual se sustenta el estudio estadístico de espectros de respuesta de registros acelerográficos, simulando los movimientos correspondientes a un sismo de diseño. (CCP-14, 2014) Un espectro de diseño, entonces, es la herramienta, que permite calcular las construcciones, teniendo en cuenta la actividad sísmica de la región, las condiciones locales de la respuesta del suelo, y las características de la estructura (periodo de vibración). (Davila, Microzonificación sísmica de Pereira, Dosquebradas y Santa Rosa., 2016)

2.2.6 Microzonificación sísmica. Consiste en establecer zonas de suelos con comportamiento similar durante un sismo, de manera que puedan definirse allí, recomendaciones precisas para el diseño y construcción de edificaciones sísmo resistentes. Para cada una de las zonas, además de especificarse la fuerza sísmica posible, deben identificarse los tipos de fenómenos asociados que pueden desencadenarse a raíz del sismo, como son los deslizamientos, la ampliación exagerada del movimiento o la posibilidad de la licuación del suelo. (Davila, Microzonificación sísmica., 2008).

2.2.7 Histéresis. Fenómeno por medio del cual dos, o más, propiedades físicas se relacionan de una manera que depende de la historia de su comportamiento previo. En general hace referencia al comportamiento de los materiales estructurales cuando se ven sometidos a deformaciones o esfuerzos que están fuera del rango lineal, o elástico, de comportamiento. Una gran parte de la energía que es capaz de disipar el material estructural en el rango inelástico de respuesta se asocia con el área comprendida dentro de los ciclos de histéresis. (CCP-14, 2014)

3. SISTEMAS DE CONTROL SISMICO

Estos sistemas se clasifican en tres categorías: Sistemas activos, sistemas semi-activos, sistemas pasivos. En este caso se investigarán los sistemas de control pasivo, ya que a esta categoría corresponden los aisladores sísmicos y disipadores de energía.

3.1 SISTEMAS DE CONTROL PASIVO:

Un sistema de control pasivo, puede estar constituido por apoyos de tipo friccional histérico o una combinación de ambos. Su fuerza de control tiene como objetivo la reducción del desplazamiento de la base siendo calculada por medio de una ley de control que garantice estabilidad al sistema estructural.

Uno de los más importantes sistemas de control pasivo es el aislamiento de base, el cual desacopla parcialmente la estructura del movimiento del terreno mediante mecanismos que incrementan la flexibilidad del sistema global estructura-base y, al mismo tiempo producen un amortiguamiento apropiado (Amaya, 2003). Esta nueva metodología se ha implementado en los últimos años debido a los resultados obtenidos durante un evento sísmico, pues se ha encontrado que realmente reduce el riesgo aumentando su capacidad de disipación de energía además de incrementar la resistencia de un sistema estructural. Su función básicamente es recibir la energía inducida de forma parcial por el sismo antes de llegar a la superestructura, por medio del uso de dispositivos que se instalan en cimentación en caso de los edificios o en los apoyos en caso de puentes vehiculares. Estos aisladores de base podrían ser aisladores flexibles o aisladores de fricción basculantes que pueden contar con la implementación de amortiguadores según su diseñador.

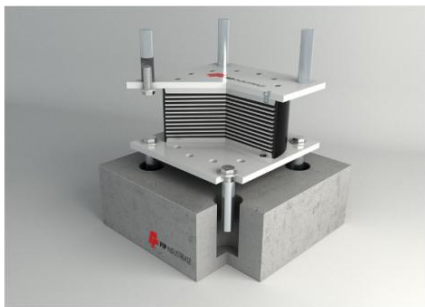
Teóricamente, la no linealidad de una estructura aislada de su base proviene de dos fuentes: las deformaciones inelásticas en el sistema de resistencia sísmica de la estructura y el sistema de aislación: sin embargo, considerando que el sistema de resistencia sísmica es más rígido que el sistema de aislación, se espera que las deformaciones inelásticas se encuentren localizadas en los aisladores y la estructura sobre estos presente un comportamiento lineal (Leocadio Rico Pradilla, 2012). Durante la ejecución del proyecto se llevará a cabo el diseño de un puente vehicular de losa y viga en la ciudad de Pereira, ciudad elegida con el fin de extraer del CCP-14 los parámetros de diseño del espectro de aceleraciones para simular el efecto de sismo en el software ya que esta ciudad representa alta

sismicidad según sección 3.10 (NSR-10, 2010), con valores aceleración pico horizontal (PGA), coeficiente de aceleración espectral horizontal (Ssh) ubicada en la zona 6, coeficiente de aceleración horizontal para periodos largos (S1) . Con estos valores se realizará el diseño de un puente sin el uso de aisladores sísmicos, es decir solo con apoyo de neopreno previamente diseñado según sus cargas, y un modelo empleando el sistema de aislador de base, esto con el fin de identificar si existe o no, reducción en cuanto a sus desplazamientos.

3.1.1 Aisladores. Se fundamenta en el ideal de apartar la estructura del movimiento directamente recibido por la energía proveniente del suelo, a través de elementos flexibles ubicados entre la superestructura y el ancho del estribo en este caso. Disminuyendo así la rigidez del sistema aumentando considerablemente el periodo de vibración.

3.1.2.1 Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDRB). Son aisladores de neopreno zunchado que intercalan placas delgadas de acero en un bloque cúbico o cilíndrico de neopreno, una imagen y un esquema de un aislador HDRB se muestran. La rigidez vertical del HDRB aumenta considerablemente, manteniendo su flexibilidad lateral (Kelly, J. C. Simo and J. M., 1978) Los aisladores de alto amortiguamiento están hechos de un compuesto especial de goma conocido como neopreno de alta resistencia, obtenido con la adición de carbono extra fino, aceite negro, o resinas, que permite alcanzar valores más altos de amortiguamiento. El espesor de las capas de caucho varía, normalmente, entre los 8 mm y 20 mm, y el espesor de la capa de acero oscila entre los 2 mm y los 4 mm. Este elemento consiste en apoyo de neopreno reforzado con láminas de acero en su sección longitudinal, las cuales son vulcanizadas entre sí.

Imagen 3. Aislador elastómero de alto amortiguamiento. LRB

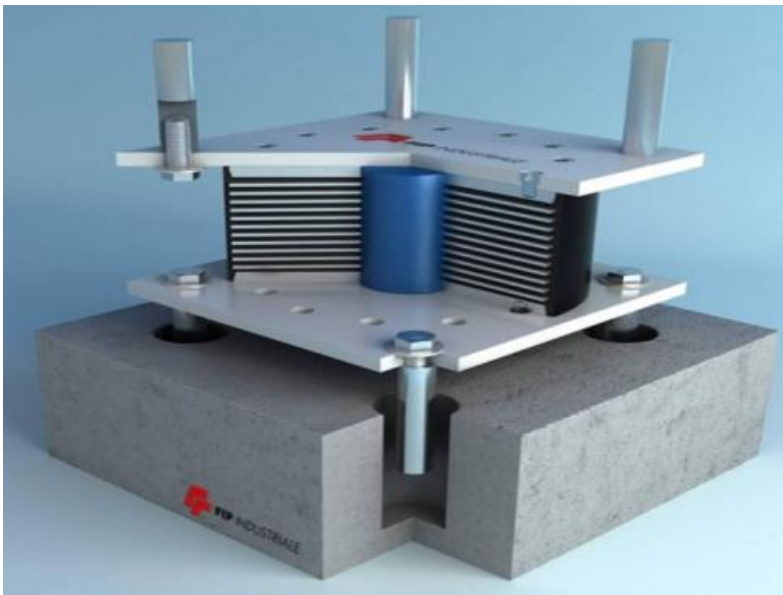


Fuente. Lead Rubber Bearings. Cambridge, 2015.

3.1.2.2 Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB)

Estos aisladores son muy similares a los HDRB, con la diferencia que usan un núcleo de plomo que le proporciona una capacidad adicional de disipar energía y le brinda una rigidez inicial un poco más alta respecto a los anteriores, disminuyendo los desplazamientos para pequeños sismos y fuerzas de viento que actúen sobre la estructura (R. I. Skinner, 1975). Elemento implementado en el modelo a diseñar.

Imagen 4. Aislador elastómero con núcleo de plomo.



Este elemento consiste en apoyo de neopreno reforzado con láminas de acero en su sección longitudinal, las cuales son vulcanizadas entre sí, con un núcleo de plomo que permite aumentar su capacidad de amortiguamiento.

Fuente. Leed Rubber Bearings. Cambridge, 2015.

3.1.2.3 Sistema de péndulo de fricción (FPS)

El concepto de sistemas de deslizamiento se utiliza junto con la noción de una respuesta de tipo péndulo, por medio de un control deslizante articulado en una superficie esférica cóncava (V. A. Zayas, 1990). El sistema de péndulo de fricción está compuesto por un deslizador articulado sobre una superficie de acero inoxidable. La parte del apoyo articulado que está en contacto con la superficie esférica, está rodeada por una película de un material compuesto de baja fricción Tefón (Politetrafluoroetileno PTFE),

Imagen 5. Sistema péndulo de fricción.

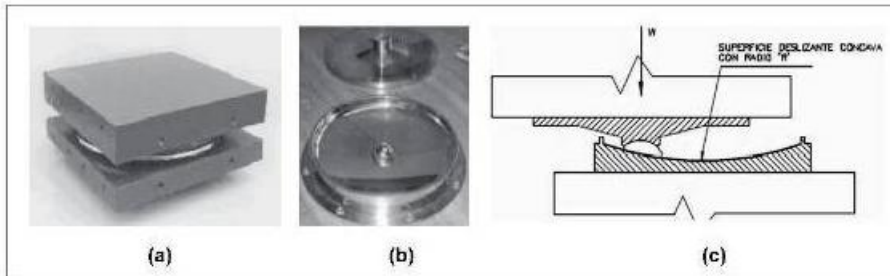


Figura 9. Sistema de péndulo de fricción (FPS). (a) Vista exterior. (b) Componentes internos. (c) Esquema de una sección transversal.

Fuente. Leocadio Rico Padilla, 2012.

3.1.2 Disipador de energía. Estos elementos son empleados para recoger de una u otra manera la energía entregada por un evento sísmico, aunque este no se encuentra separado de la estructura, su función es proteger y disminuir al mínimo los posibles daños que puedan ocurrir, aumentando así el nivel de amortiguamiento de esta.

Los disipadores de energía se clasifican en:

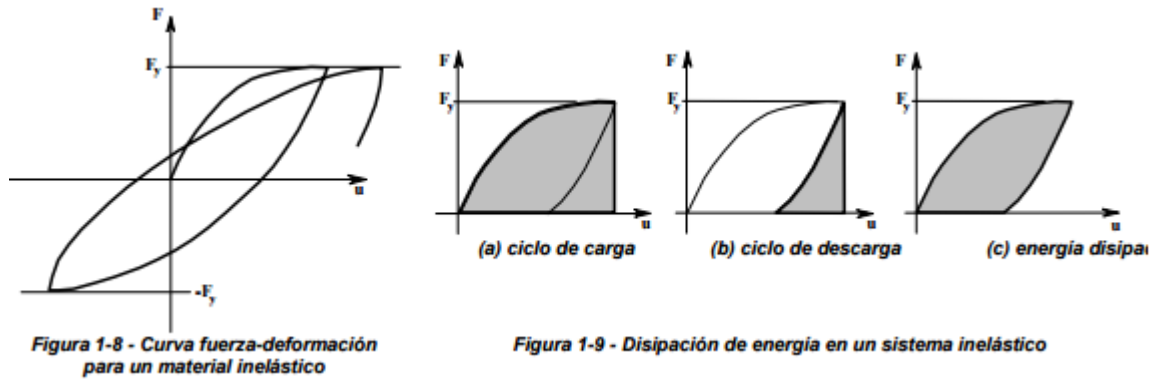
- Dispositivos histeréticos.
- Dispositivos viscoelásticos.

3.1.2.1 Disipadores histeréticos. Estos son reconocidos debido a la consecución de su movimiento, ya que refiere al continuo movimiento en este caso del amortiguador, aislador o elemento empleado para el control sísmico. Generando así una pérdida de energía recibida en cada uno de sus movimientos.

Es importante definir el comportamiento histerético, para ello se consultó encontrando que la histéresis es un fenómeno por medio del cual dos, o más, propiedades físicas se relacionan de una manera que depende de la historia de su comportamiento previo. Este tipo de amortiguamiento se presenta cuando un elemento estructural es sometido a inversiones en el sentido de la carga aplicada cuando el material del elemento se encuentra en el rango inelástico o no lineal. El hecho de que la curva de carga tenga una trayectoria diferente a la curva de descarga conduce a que no toda la energía de deformación acumulada en el elemento se convierta en energía cinética en el ciclo de descarga. Dependiendo del tipo de material la forma tanto de la curva de carga como la de descarga varía. A modo ilustrativo, en la Figura 1-8 se muestra el comportamiento, en términos de

fuerza-deformación, de un elemento estructural construido con un material inelástico durante unos ciclos de carga y descarga, incluyendo reversión del sentido de las fuerzas aplicadas.

Imagen 6. Esquema comportamiento histerético.



Fuente. GARCÍA. Luis. Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico.1998.

La acumulación de energía de deformación corresponde al área bajo la curva de carga, Figura 1-9(a). Cuando el sistema descarga la energía que el sistema transfiere para convertirse en energía cinética corresponde al área bajo la curva de descarga, Figura 1-9(b). La diferencia entre las dos áreas corresponde a energía disipada por el sistema y que se convierte en calor, ruido u otros tipos de energía. (Luis Enrique Garcia, 1998).

3.1.2.2 Disipadores viscoelásticos. Han sido empleados con éxito, durante los últimos treinta años, para reducir la respuesta de edificios altos ante la acción del viento. De forma más reciente se ha estudiado su utilización con fines sismo resistente. Los disipadores viscoelásticos sólidos están formados con chapas metálicas unidas con capas finas de material viscoelásticos y presentan unos ciclos histeréticos característicos elípticos. (Dr. Genner Villarreal Castro, 2008)

4. ESTADO DEL ARTE

Se realiza una recopilación de información en cuanto a las investigaciones realizadas respecto al tema, el más relevante es el uso de aisladores de base en puentes de concreto simplemente apoyados (Leocadio Rico Pradilla, 2012), en este artículo se presenta una comparación del comportamiento sísmico de puentes de concreto reforzado simplemente apoyados, usando aisladores de base de tres tipos, los aisladores de elastoméricos de alto amortiguamiento HDRB por sus siglas en inglés (High Damping Rubber Bearings), los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo LRB (Lead Rubber Bearings) y el sistema de péndulo de fricción FPS (Friction Pendulum System). Se tomó como caso de estudio el viaducto la flora, definiéndose la geometría y su correspondiente modelamiento en SAP2000.

Así mismo, se definieron las propiedades mecánicas de los tres aisladores usando un modelo bilineal; para el modelo del viaducto se realizó un análisis dinámico no lineal de historias en el tiempo, considerando la no linealidad en los aisladores, usando los sismos de la falla Frontal y la falla Bucaramanga-Santa Marta, escalados a nivel de superficie. Se compararon los resultados del modelo sin aislamiento sísmico versus los tres modelos con sistema de aislamiento sísmico, y se encontró que los diferentes sistemas de aislamiento sísmico reducen significativamente la demanda de los desplazamientos y fuerzas cortantes en las pilas del puente que le inducen los probables terremotos que puedan ocurrir. Los investigadores documentan la respuesta dinámica del puente en cuanto a los modos de vibración pues al aplicar aislamiento de base, las fuerzas cortantes y desplazamientos varían totalmente su comportamiento en los modelos ejecutados, obteniendo mejor respuesta con el aislador HDRB.

Históricamente los países en los cuales se ha desarrollado el tema con mayor relevancia, indiscutiblemente es en el continente asiático, pues si bien es cierto, a nivel mundial han presentado mayor afectación a causa de eventos sísmicos tal como lo aseguran los autores del artículo: “*Situación de las técnicas de control de respuesta sísmica en Colombia*” (Juan A. Oviedo y Ma. Del Pilar Duque) al pesquisar los sistemas implementados en países como Japón, China, Taiwán y pasando por el desarrollo de esta temática en los Estados Unidos.

5. METODOLOGIA

Una edificación debe ser capaz de resistir, además de las fuerzas sometidas en su uso, temblores de poca intensidad sin daño, temblores moderados sin daño estructural, pero posiblemente con algún daño a los elementos no estructurales y un temblor fuerte con daños de elementos estructurales y no estructurales, pero sin colapso, es decir evitando pérdidas de vida, de igual manera sucede con los puentes vehiculares, los cuales son de gran importancia y por ello este documento se base en la evaluación de un puente con y sin aislador sísmico. A continuación, se dará a conocer metodología implementando un aislador de tipo LRB con núcleo de plomo, con el fin de brindar mejores condiciones de seguridad al sistema estructural.

Con el fin de lograr los objetivos planteados para la óptima ejecución del proyecto, teniendo en cuenta el tiempo de trabajo una vez realizada la visita internacional, se realizará mediante las siguientes fases:

FASE I:

Consta de la fase de indagación y revisión bibliográfica a cerca de aisladores, amortiguadores y disipadores de energía, además de la búsqueda del uso actual de estos dispositivos en Colombia.

FASE II:

Visita técnica internacional al Canal de Panamá, consultando expertos que por medio del acompañamiento durante las conferencias, en búsqueda de información sobre el tema de sismicidad y el uso de sistemas de control sísmico alternativo tales como: aisladores, amortiguadores y disipadores. Además de su normatividad vigente, puedan brindar la información necesaria a recolectar en este país.

FASE III:

Adicionalmente, se crearan dos modelo por medio del software SAP2000 v18, uno convencional de puente de losa y viga diseñando apoyos de neopreno usados comúnmente entre los estribos y la losa, A demás de un modelo con un sistema de disipación de energía LRB quien proporcione 25% de amortiguamiento conforme a la ficha técnica anexada, se diseñó la ciudad de Pereira según microzonificación sísmica registrada en la normatividad Colombiana. Esto con el fin de comparar desplazamientos, evaluar si existe o no variación en el tiempo que

tarda una oscilación en otra, entre otros parámetros que serán registrados en análisis y conclusiones.

FASE IV:

Comparación y evaluación de la existente en las normas de diseño REP2006 de Panamá y NSR-10 (Norma sismo resistente 2010), (Norma Colombiana de diseño de Puentes) CCP-14. Una vez termina la etapa de creación de diseño continua la evaluación de cuantías y comportamiento de los modelos ejecutados, análisis de resultados y conclusiones.

FASE V:

Generación de documento final incluyendo conclusiones y recomendaciones.

Elaboración del artículo y Poster.

6. DESCRIPCION DEL MODELO MATEMATICO DEL PUENTE A ANALIZAR

6.1 DEFINICION DE MATERIALES:

Se emplean diferentes resistencias de concreto, acorde al sistema estructural:

Vigas	$f'c = 35\text{N/mm}^2$
Losa y Pilas	$f'c = 28\text{ N/mm}^2$
Estribos	$f'c = 21\text{ N/mm}^2$

Acero:

$$F_y = 420\text{ N/mm}^2$$

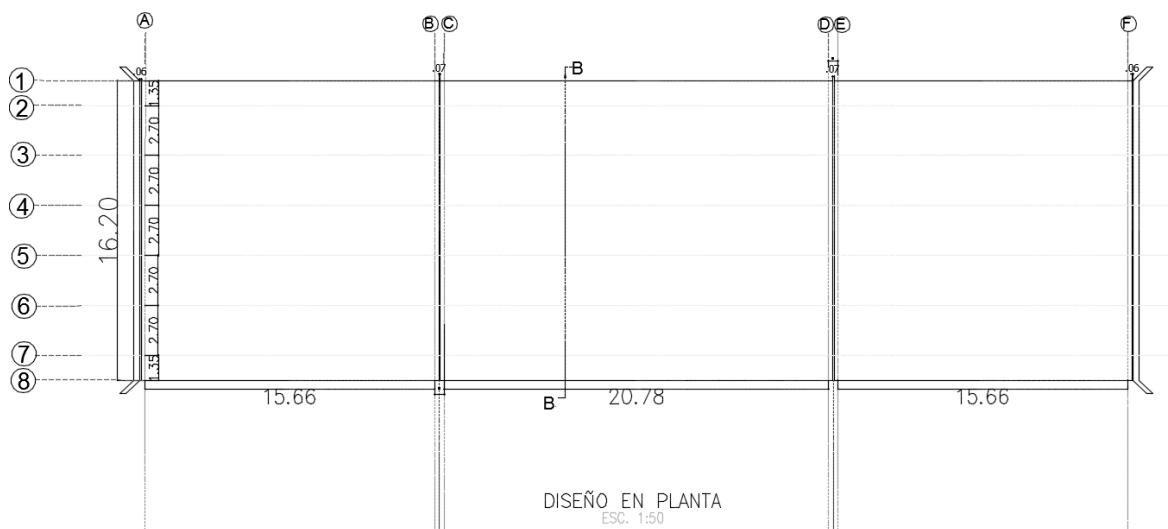
Ubicación:

Pereira, Colombia.

6.2 PREDIMENSIONAMIENTO INICIAL:

Se realiza un primer esquema del diseño en planta indicando ancho y longitud del puente, además de las dimensiones de cada luz según requerimientos de condiciones según ubicación, ya que es un ejercicio académico se plantean dimensiones de diseño.

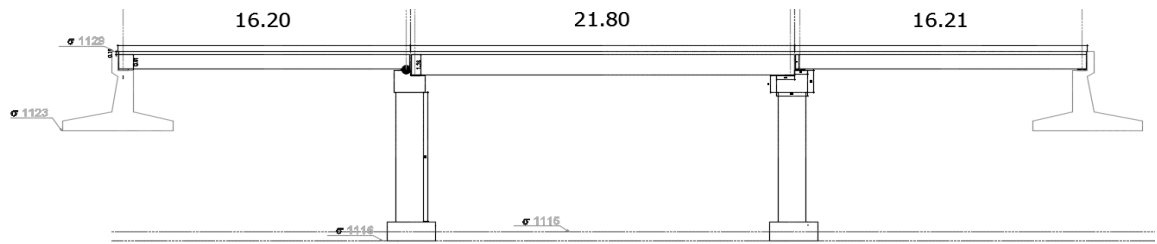
Imagen 7. Diseño en planta puente vehicular.



Fuente. León, Laura T., 2016.

En la sección longitudinal se define con detalle la longitud de cada vano, longitud de las pilas según topografía y ubicación de estribos.

Imagen 8. Sección longitudinal puente a diseñar.



SECCION LONGITUDINAL CORTE A-A'

Fuente. León, Laura T., 2016.

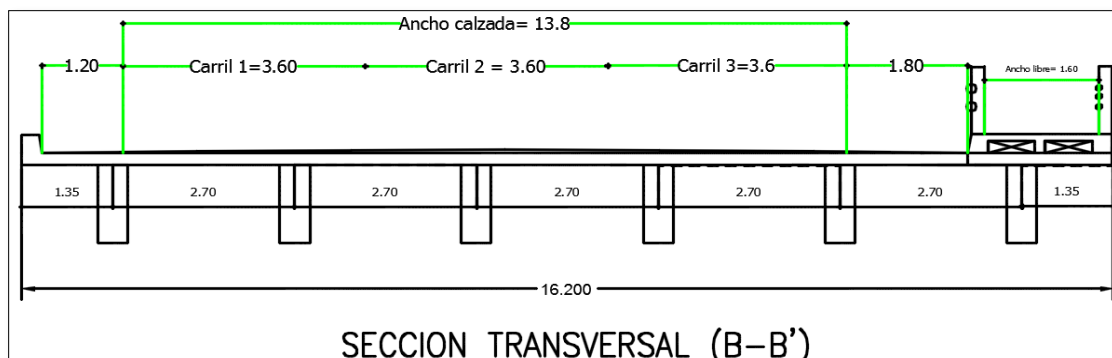
Para la dimensiones de esta sección se debe tener en cuenta el número de vigas y su separación para lo cual se recomienda que los vanos exteriores sean de igual o mayor longitud a la mitad de la longitud de los vanos interiores. Verificando de la siguiente manera: Separación entre vigas (sv)

- Longitud total sección transversal=

- Longitud anden = 2.10m (Incluye baranda vehicular y peatonal con ancho libre de 1.60m)
- Baranda peatonal = 0.3 m
- Ancho de calzada con 3 carriles de 3,6 m y dos bermas de 1,2m – 1,8m)=
(3,6 x 3 + 1,20 + 1,80 = 13,8 m)

$$\checkmark \text{ Total sección trasversal} = 2.10 + 0.3 + 13.8 = 16.20\text{m}$$

Imagen 9. Dimensionamiento sección transversal.



SECCION TRANSVERSAL (B-B')

Fuente. León, Laura T., 2016.

Para definir el número de vigas se realiza el siguiente procedimiento:

$S_v = 2,7 \text{ m}$ (6 vigas – 5 espacios)

$$5 \text{ espacios} \times 2,7 \text{ m} = 13,5 \text{ m}$$

$$16,20 \text{ m} - 13,5 \text{ m} = 2,7 \text{ m}$$

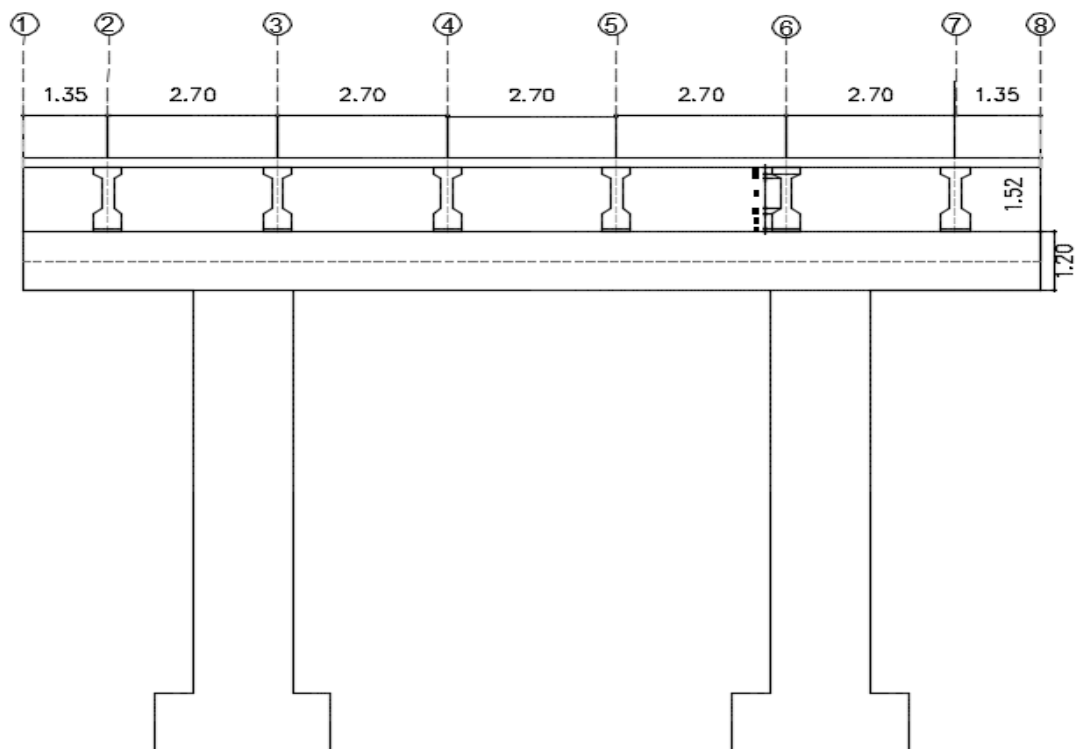
$$\text{Voladizos} = \frac{2,7 \text{ m}}{2} = 1,35 \text{ Cumple ya que la luz del voladizo es } \leq s_v/2$$

Por medio de la ecuación para alturas mínimas losas o vigas de la sección 2 del CCP-14 (2.5.2.6.3-1):

$$t_l \geq \frac{2700 \text{ mm} + 3000}{30} = 19 \text{ cm de espesor}$$

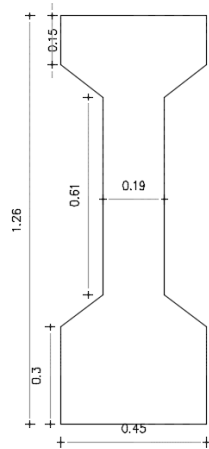
Por lo tanto una vez verificadas dimensiones se obtiene el siguiente esquema:

Imagen 10. Sección transversal puente a diseñar.

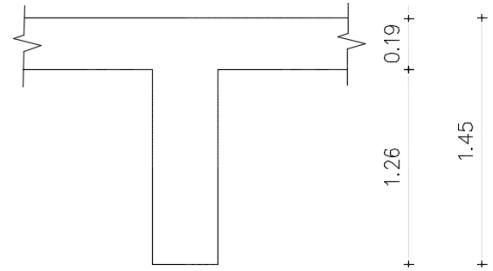


Fuente. León, Laura T., 2016.

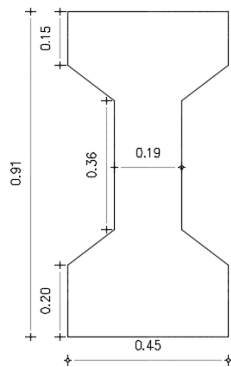
Imagen 11. Esquema viga tipo 1 - 2.



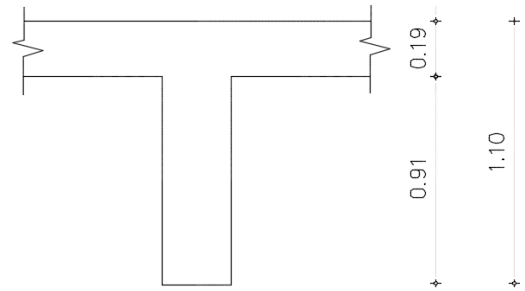
SECCION VIGA-1 CORTE A-A'
ESC. 1:50



SECCION MACIZA CORTE B-B' VIGA-1
ESC. 1:50



SECCION VIGA-2 CORTE A-A'
ESC. 1:50



SECCION MACIZA CORTE B-B' VIGA-2
ESC. 1:50

Fuente. León, Laura T., 2016.

7. ASPECTOS A CONSIDERAR EN EL ANALISIS DEL PUENTE

En los parámetros de diseño se tomó en cuenta el código Colombiano de Diseño de Puentes CCP-14 y se realizó una evaluación de lo existente en términos de normatividad en Panamá, además de complementar esa actividad con la recolección de datos encontrados en la visita técnica internacional, donde se evidencio el por qué este país fue elegido para construir una obra de gran envergadura como lo es el canal de Panamá, gracias a sus ventajas en términos de sismicidad como uno de los puntos a considerar en aquella época.

Ahora bien, retomando el diseño a plantear del puente vehicular para Colombia, quien se ha visto un poco más vulnerable en comparación a la República de Panamá, se plantea el diseño para la ciudad de Pereira debido a su alta amenaza sísmica registrada en los últimos años según lo indica el servicio Geológico Colombiano y lo afianza la normativa para construcción tanto para puentes como edificaciones que actualmente rige en Colombia.

7.1 COMPARACION NORMA DE DISEÑO COLOMBIA- PANAMA

Ya que un sismo puede generar mayor o menor magnitud de afectación según la energía que este libere a través del suelo producido primordialmente por las placas tectónicas, es necesario crear documentos que registren la variabilidad de amenaza según la ubicación en cada país. Como es el caso de la República de Panamá que por medio del “Reglamento estructural de la República de Panamá REP-04” donde se identifica el reglamento de construcción sismo resistente que designa cada uno de los aspectos estructurales a intervenir según el desarrollo en el mejoramiento del diseño estructural empleado allí.

Por lo tanto, esta sección del documento será dedicada específicamente a evaluar y comparar brevemente algunos detalles del título A del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, por medio del cual se describen los requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente, así como la sección 3 de la norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14 particularmente Sección 3.10- Efectos sísmicos, donde son descritos detalladamente aspectos importantes para el diseño de puentes, con el fin obtener baja probabilidad de

colapso en caso de un evento sísmico, admitiendo consigo que puedan sufrir daños significativos e interrupción del servicio cuando sean sometidos a dichos eventos, prosiguiendo a evaluar si es necesario el reemplazo parcial o total del puente según lo describe la norma. Además, de presentar las evidencias encontradas en la visita técnica internacional pasando un poco por la historia del Canal de Panamá, donde la sismicidad fue parte importante para que hace 100 años fuera elegido para la construcción de esta eminente obra de ingeniería.

En el Código Colombiano de Diseño de Puentes, para identificar la amenaza sísmica se describe por medio del espectro de aceleraciones, donde se determinan los parámetros requeridos así como se realiza extrayendo esos datos del Título A de la NSR-10 para el diseño sismo resistente por medio del método de la fuerza horizontal equivalente, metodología que no se usa en puentes pero que describe el procedimiento y aspectos requeridos en la Sección 3 del CCP-14. Para realizar el análisis de fuerza sísmica en puentes es importante tener en cuenta su origen, identificando la zona de microzonificación a ejecutar el proyecto, esto se ejecuta con el fin de identificar el riesgo, pronto continúa la vulnerabilidad definida por el ingeniero estructural, definiendo parámetros a describir durante la ejecución de documento. Una vez realizado este reconocimiento se inicia el espectro de aceleraciones, donde se podrá comparar la respuesta obtenida al emplear un aislador en el diseño original del puente. Estos parámetros se conocerán e interpretarán más adelante en el capítulo 7 del presente documento.

En el Reglamento Estructural Panameño, inicialmente, el REP2004 define los siguientes conceptos referentes a los sistemas de aislación sísmica:

Sistema de aislamiento: El conjunto de elementos estructurales que incluye todas las unidades individuales de aislamiento, todos los elementos estructurales que transfieren fuerza entre los elementos del sistema de aislamiento, y todas las conexiones a los demás elementos estructurales. El sistema de aislamiento también incluye el sistema de restricción de viento, si se usa ese sistema para cumplir con los requerimientos de diseño de esta sección.

Unidad aisladora: Un elemento estructural del sistema de aislamiento horizontalmente flexible y verticalmente rígido que permite grandes deformaciones laterales bajo carga sísmica. La unidad aisladora se podrá usar tanto como parte o además del sistema que soporta el peso del edificio.

Sismo máximo capaz de ocurrir: El nivel máximo de movimiento sísmico del terreno que se puede esperar en el sitio del edificio dentro del marco geológico conocido. En áreas del mapa con un valor de A, de 0.3 o más, se podrá tomar esta

intensidad como el nivel de movimiento sísmico del terreno que tiene una probabilidad de 10% de excederse en un periodo de tiempo de 100 años.

Adicionalmente definen una velocidad de diseño según tabla 3-2 del Capítulo 3, además del factor de dirección del viento donde se escribe una nota específica respecto a las combinaciones de carga, coincidiendo con la ACI-318 también referenciada en Colombia en algunos aspectos.

Imagen 12. Velocidad de diseño y factor de dirección del viento-REP2004.

Tabla 3-2 Velocidad de Diseño, V	
REGIÓN	VELOCIDAD EN 3 SEGUNDOS (km/h)
Pacífico	115
Atlántico	140

Tabla 3-3 Factor de Dirección del Viento, K_d	
TIPO DE ESTRUCTURA	FACTOR DE DIRECCIÓN, K_d
Edificios	
Sistemas Primarios	0.85
Componentes y fachadas	0.85
Tanques y Estructuras Similares	
Cuadrados	0.90
Hexagonales	0.95
Redondos	0.95
Letreros Cerrados	0.85
Letreros Abiertos	0.85

Nota: El factor de dirección del viento ha sido calibrado con combinaciones de carga especificadas en el ASCE 7. Este factor solo deberá utilizarse cuando se use con las combinaciones de carga especificadas en el ASCE 7. Si se utilizan las combinaciones de carga del ACI 318-02 ó de la Segunda Edición del LRFD, se tomará $K_d = 1$.

Fuente: Reglamento Estructural Panameño, 2014.

Para entrar en materia, el REP2004 define en el capítulo 4 la sección de sismo, por medio del cual referencia ASCE- 7-95- *Cargas mínimas para edificios y otras estructuras*. Iniciando así con la presentación de los criterios de diseño y

construcción de edificios o estructuras similares sometidas a sismo donde los puentes vehiculares, torres de transmisión, muelles y atracaderos, entre otras, hacen parte de las estructuras especiales según lo describe la norma, demandando mayor consideración en cuando a sus características de respuesta requiera.

La norma describe consigo unas provisiones o parámetros así como se ejecuta en Colombia para evaluar el desempeño sísmico, esto es, por medio de la asignación de categorías a las estructuras. También cuenta con mapas de aceleración sísmica del terreno según Capítulo 4.1.4.1 REP2004, donde especifica la aceleración pico efectiva (A_a) y la aceleración pico efectiva relativa a la velocidad (A_v).

En el ítem 4.1.4.2 REP2004 se expresa puntualmente los coeficientes sísmicos, tales como el coeficiente sísmico basado en el tipo de perfil del suelo y el valor A_a determinado (C_a) y el factor de ampliación de deflexión dado por la tabla 4.2.2.2-REP2004, definido como (C_v) teniendo en cuenta el tipo de perfil de suelo, encontrando así similitud en este ítem, tal como lo hace la norma Colombiana. Adicionalmente se designan sistemas sísmicos dentro de edificios para evaluar su funcionamiento antes, durante y después de un sismo, según lo describe el numeral 4.1.4.4 - Categoría de desempeño sísmico. Es importante resaltar que el sismo de diseño según glosario del ítem 4.1.7 es un sismo que produce movimientos del terreno en un sitio bajo consideración, que tiene una probabilidad de 90% de no excederse en 50 años.

Uno de los aspectos más relevantes a resaltar en esta norma, es la implementación de aisladores según la sección 4.2.6- *Provisiones para estructuras sísmicamente aisladas con el fin de diseñar para resistir las deformaciones y los esfuerzos producidos por los efectos de movimientos sísmicos del terreno según se provee en esta sección.* (REP2004, 2004). Definiendo consigo criterios de selección tales como:

4.2.6.2.1 Bases para el diseño.

4.2.6.2.2 Estabilidad del sistema de aislamiento.

4.2.6.2.3 Categoría estructural.

4.2.6.2.4 Requerimientos de configuración.

De los cuales parte la selección de procedimientos para evaluar estructuras con la aplicación de sistemas de control sísmico como la fuerza lateral equivalente según 4.2.6.3, análisis dinámico según 4.2.6.5.3 según especificación del análisis de espectro de respuesta, donde no se requiere para edificaciones con aislamiento a

menos que se encuentren localizadas en un sitio de perfil con condiciones complejas. Complementando con análisis de historial de tiempo según 4.2.6.2.5.3.2 por medio del cual se permite para el diseño de cualquier edificio sísmicamente aislado.

Respecto a los sistemas de aislamiento específicamente describe en la sección 4.2.6.6.2 que desglosando: *4.2.6.6.2.1- condiciones ambientales, además de los requerimientos para cargas verticales y laterales inducidas por viento y sismo, el sistema de aislamiento deberá diseñarse considerando otras consideraciones ambientales, incluyendo efectos de envejecimiento, flujo plástico, fatiga, temperatura de operación, y exposición de humedad o sustancias nocivas.* (REP2004, 2004). Finalmente se logra observar que Panamá a comparación de Colombia, lleva el tema de los sistemas de control sísmico implementado en su normatividad actualmente vigente más avanzado que la actual NSR-10 ya que el CCP-14 aún no lo ha incorporado legalmente como sucede en edificaciones, lo cual promueve para Panamá, un factor de seguridad relevante, disminuyendo el riesgo teniendo en cuenta sus altas edificaciones según lo observado en la visita técnica internacional.

Imagen 13. Vista panorámica Ciudad de Panamá.



Fuente. León, Laura T., 2016.

7.2 PARÁMETROS DE DISEÑO

A continuación se da a conocer un paso a paso de la ejecución del diseño de puente vehicular, teniendo en cuenta normatividad vigente

7.2.1 Materiales

Al plantear el modelo, este inicia con la definición de resistencia de concreto para los diferentes elementos estructurales.

Imagen 14. Definición resistencia de concreto para vigas.

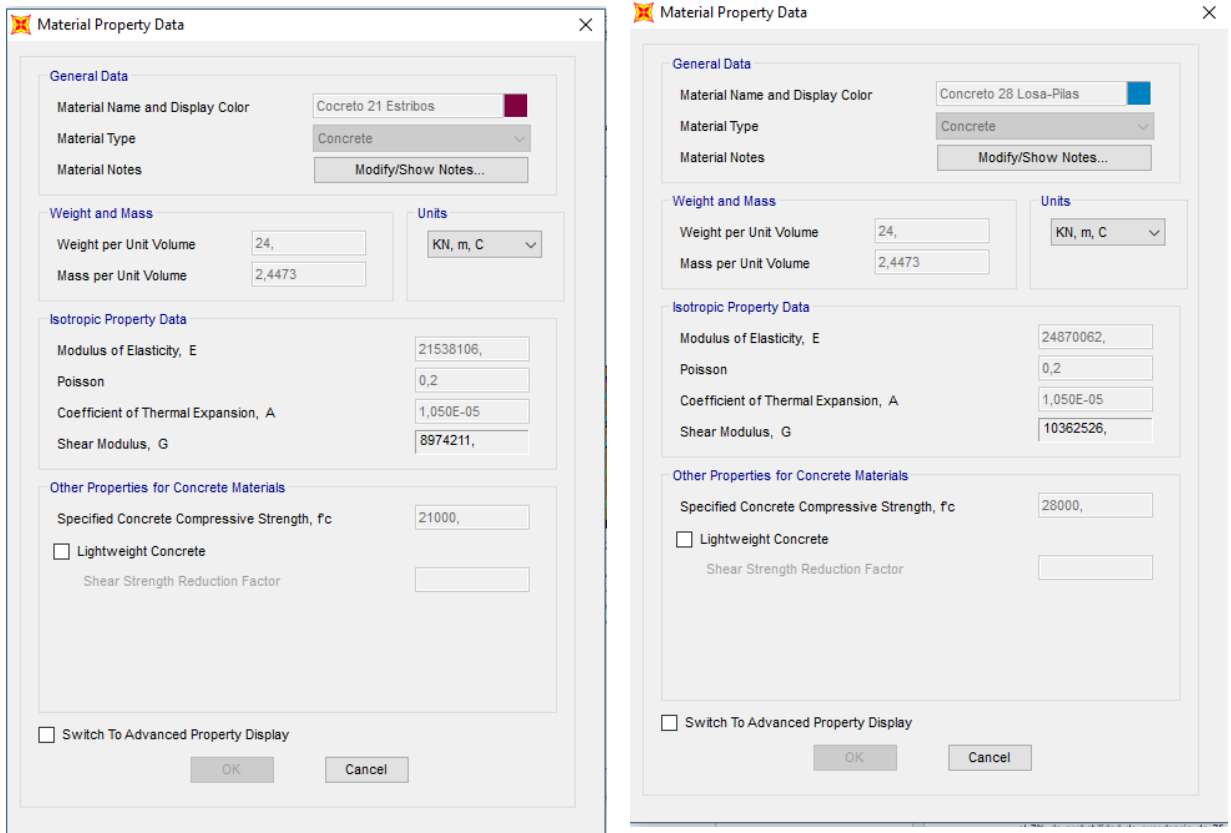
The image shows a software dialog box titled "Material Property Data". It is organized into several sections:

- General Data:** Material Name and Display Color: Concrete 35; Material Type: Concrete; Material Notes: Modify/Show Notes...
- Weight and Mass:** Weight per Unit Volume: 24; Mass per Unit Volume: 2.4473
- Units:** Units: KN, m, C
- Isotropic Property Data:** Modulus of Elasticity, E: 7805574.980568; Poisson: 0.2; Coefficient of Thermal Expansion, A: 1.05E-05; Shear Modulus, G: 11585656
- Other Properties for Concrete Materials:** Specified Concrete Compressive Strength, f_c : 35000; Lightweight Concrete: ; Shear Strength Reduction Factor: [empty field]

At the bottom, there is a checkbox for "Switch To Advanced Property Display" (unchecked) and "OK" and "Cancel" buttons.

Fuente. León, Laura T., 2016.

Imagen 15. Resistencia de concreto para estribos, losas y pilas.



Fuente. León, Laura T., 2016.

Se define el material para los diversos elementos, esto es:

Vigas: Se requiere un concreto de alta resistencia 35 MPa, la cual se empleará para las vigas de apoyo como para la zona central o intermedia de ellas.

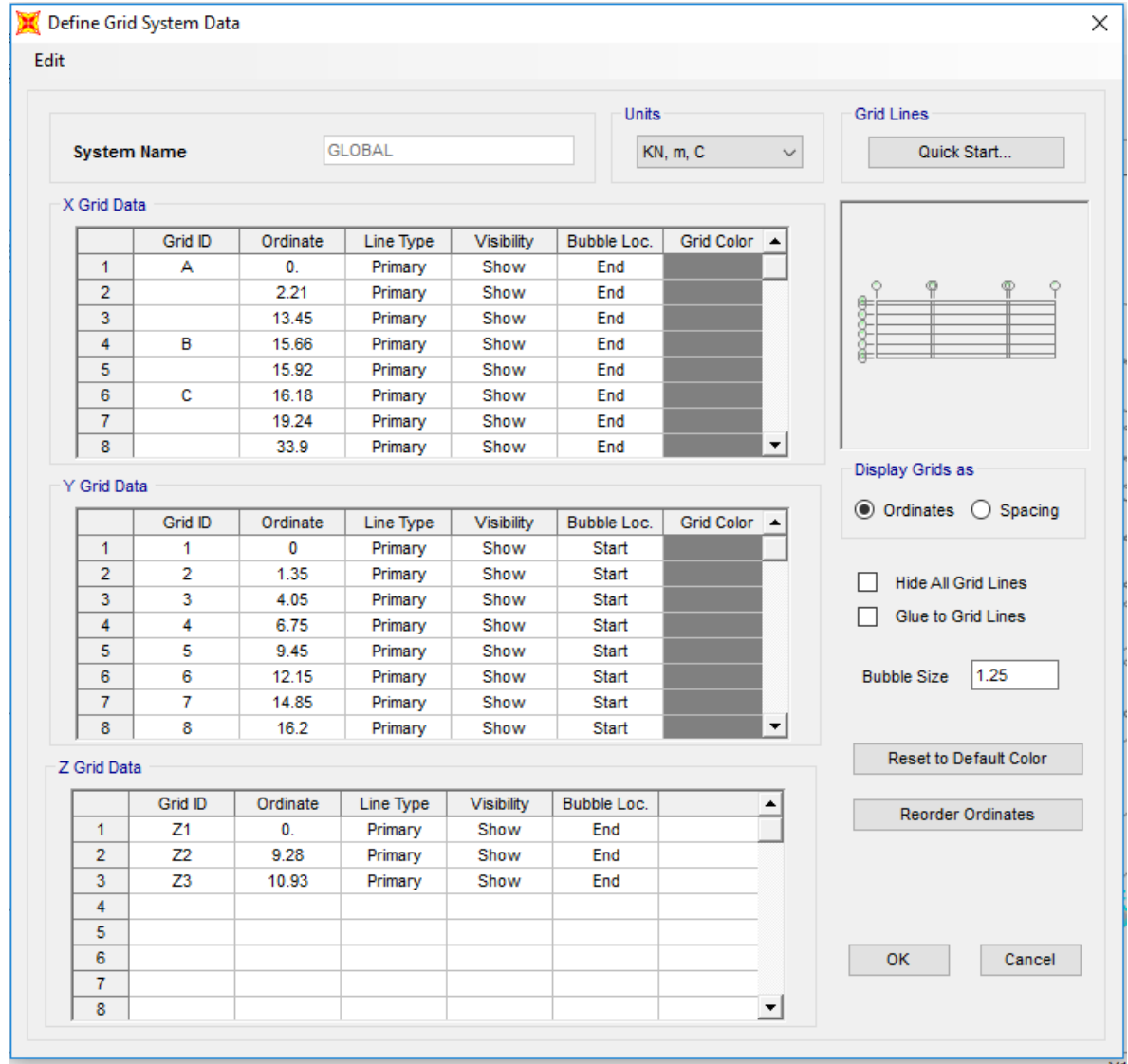
Pilas: Se empleara concreto de 28 MPa para losa y pilas dado que no requieren de alta resistencia como sucede en las vigas.

Estribos: Se empleara concreto de 21 MPa para los estribos ubicados en los costados del puente, quienes pertenecen a la infraestructura del mismo.

7.2.2 DIMENSIONES

De acuerdo a los ejes mostrados anteriormente se procede a alimentar el programa con cada uno de los valores correspondientes, teniendo en cuenta alturas y separaciones en cada uno de los casos.

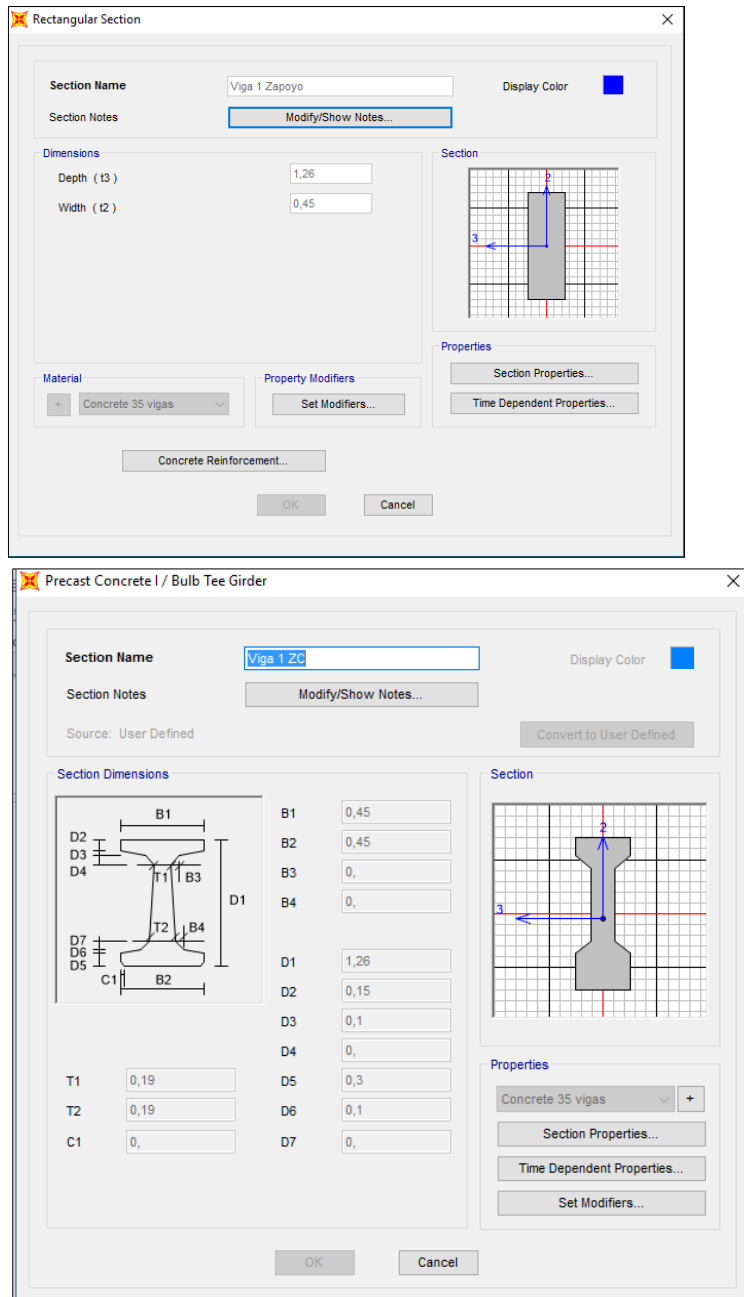
Imagen 16. Definición de sistema de coordenadas SAP2000.



Fuente. León, Laura T., 2016.

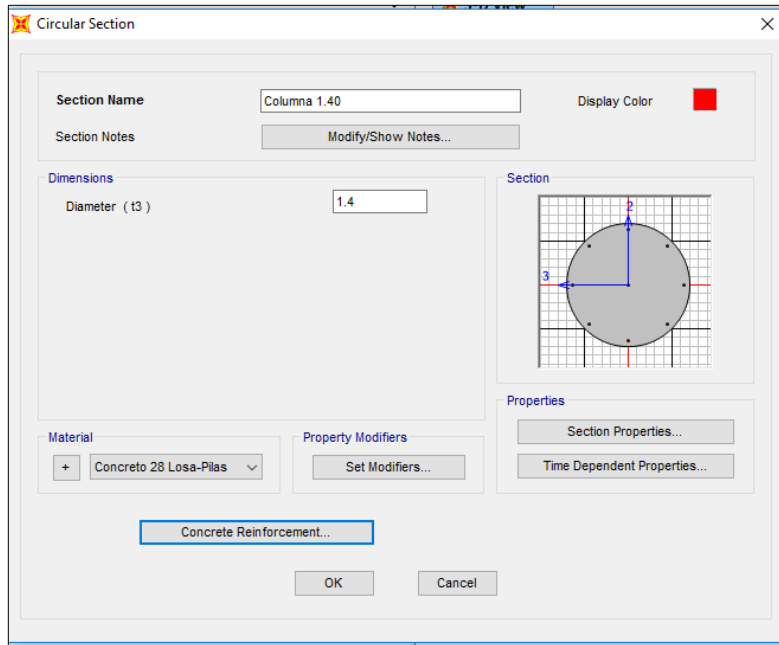
Para especificar brevemente, se diseñaron dos tipos de vigas ya que el puente cuenta con vanos de diferente longitud, para ello se diseñó la zona de apoyo al estribo así como la zona central luego de pasar por la zona de transición.

Imagen 17. Esquema básico viga tipo en zona central-apoyo.



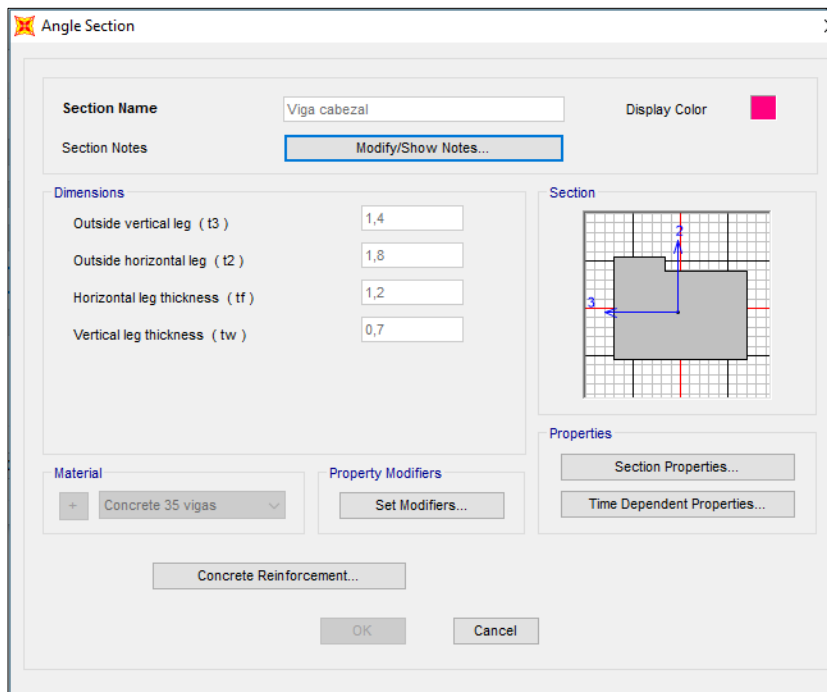
Fuente. León, Laura T., 2016.

Imagen 18. Dimensionamiento pilas.



Fuente. León, Laura T., 2016.

Imagen 19. Dimensionamiento viga cabezal.



Fuente. León, Laura T., 2016.

7.2.3 CARGAS

Ya que las vigas son el elemento principal para lograr la ejecución del modelo aplicando un sistema de control sísmico, se describirán las cargas a emplear en las vigas, los momentos obtenidos de acuerdo a estas cargas y reacciones requeridas para hallar la carga de diseño del neopreno.

7.2.3.1 Carga muerta DC:

Se adicionan valores de cargas muertas posteriores que incluyen elementos del puente con valores previamente diseñados luego de su dimensionamiento.

Barandas vehiculares: $0.75 \text{ kN/m} \times 2 = 1.50 \text{ kN/m}$

Baranda peatonal: 0.50 kN/m

Bordillo: $1,98 \text{ kN/m}$

Anden: $8,22 \text{ kN/m}$

Por lo tanto la suma de estos elementos corresponde a $12,20 \text{ kN/m}$ que se repartirá de manera uniforme sobre las 6 vigas del puente, obteniendo un valor de **$2,03 \text{ kN/m}$** .

Ya que la luz de esta sección corresponde a $16,2\text{m}$ es decir mayor a 15m se añadirá una viga riostra con el fin de amarrar las vigas en el centro de la luz. Este elemento corresponde un peso de **$18,102 \text{ kN/m}$** luego de hallar su volumen por peso unitario del concreto correspondiente a 24 kN/m^3 .

Se debe hallar el peso propio de las vigas centrales y vigas de apoyo, al hallar el área de cada elemento por el peso unitario del concreto, en este caso la Viga-1 Zona de apoyo tendrá un valor de **$13,61 \text{ kN/m}$** apoyada en los extremos y en su zona central ya que presenta una geometría diferente, su carga equivale a **$9,24 \text{ kN/m}$** .

Finalmente el peso propio de la losa evaluando una viga interior, equivale a **$12,31 \text{ kN/m}$** .

7.2.3.2 Carga pavimento DW:

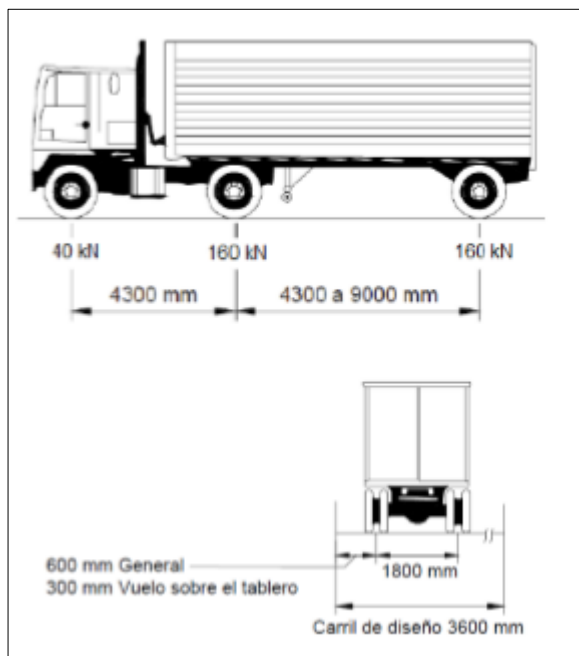
Teniendo en cuenta al ancho de la sección transversal correspondiente a los 3 carriles de 3,6m cada uno y dos bermas correspondientes a 1,20 y 1,80 m para un total de 13,8 m por 5 cm de espesor de pavimento proyectado y el paso unitario correspondiente a 22 kN/m³ según lo define la Sección 3.5.1- Cargas muertas del CCP-14, se obtiene un valor de 15,18 kN/m repartido de manera uniforme en las 6 vigas del puente. Procediendo consigo a encontrar sus reacciones y momentos correspondientes.

7.2.3.3 Carga viva:

En este caso se emplearan dos combinaciones para encontrar los valores más críticos, al continuar ya sea con $W_{\text{carril}} + \text{Camion C-14}$ o $W_{\text{carril}} + \text{Tandem}$.

Según sección 3.6.1.2.2-Camio de Diseño:

Imagen 20.Camión de diseño C-14.



Fuente: CCP-14.

El tándem de diseño según Sección 3.6.1.2.3-Tandem de Diseño, corresponde a un camión de dos ejes cada uno de 125Kn, separados a 1.20m entre sí.

Por medio del Teorema de Barre, en el cual se simula mover un camión de tres ejes con 4.3m de distancia entre ellos para el C-14 en este caso cada metro, se hallarán los valores correspondientes al camión de diseño.

Imagen 21. Teorema de Barre aplicado a C-14 y Tándem.

TEOREMA BARRE CAMION C-14				
Buscar el momento maximo a una distancia $x_1 =$ (m)			10,39	
Lv=	20,78		Mmax=	1449,13 Kn.m
Lv/2=	10,39		Mmax(x)=	0 Kn.m
a C-14=	1,43			
a/2	0,715			
x=	9,675			
Buscar el momento maximo a una distancia $x_1 =$ (m)			10,39	
Lv=	15,66		Mmax=	1124,8 Kn.m
Lv/2=	7,83		Mmax(x)=	0 Kn.m
a C-14=	1,43			
a/2	0,715			
x=	9,675			

Fuente. León, Laura T., 2016.

De acuerdo a los valores obtenidos, el mayor lo presenta el camión C-14 por lo tanto la carga viva se empleará con el momento correspondiente a 1449,13 kN.m.

7.2.3.4 Carril de diseño:

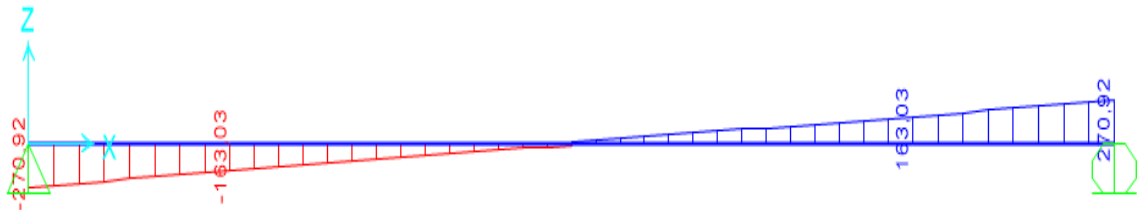
Finalmente se debe hallar la carga **W carril** la cual corresponde a **10,30 kN/m** uniformemente distribuida en la sección longitudinal según sección 3.6.1.2.4 – Carga de Carril de Diseño CCP-14.

7.2.4 Neopreno:

Una vez definidas las cargas se hallan las reacciones correspondientes por medio del programa SAP2000 para la carga DC, DW, W carril, para el camión C-14 por medio del teorema de Barre, obteniendo los siguientes valores:

Para para carga DC, se obtuvo valor de 270,92 kN según lo muestra a imagen.

Imagen 22. Diagrama de cortante viga-1.



Fuente. León, Laura T., 2016.

Para las demás cargas se muestra un cuadro resumen con los valores obtenidos:

Imagen 23. Reacciones viga-1.

REACCIONES	DC	DW	C-14	Carril	Impacto	
	270,92	26,29	310,34	107,02	274,96124	
Riostra	18,102					
g			0,886	0,886		
% Impacto					33%	
Sumatoria	289,02	26,29	274,96	94,82	90,74	775,8

Fuente. León, Laura T., 2016.

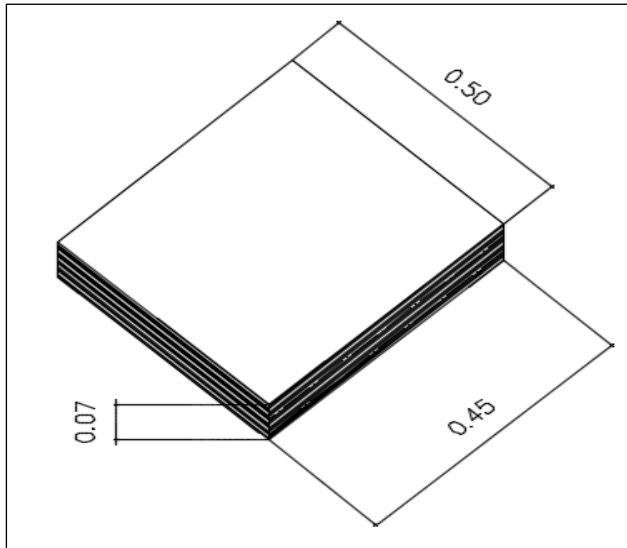
Ya que la sumatoria de cada una de las reacciones correspondientes a las cargas que recibe la viga es 775,8 kN se ejecuta el pre dimensionamiento del apoyo de neopreno por medio de la siguiente fórmula:

$$L \geq \frac{775,8 \text{ kN}}{45 \text{ cm} \times 0,35 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} = 49,26 \text{ cm} \approx 50 \text{ cm}$$

Donde 45 cm es el ancho de la viga y $0,35 \text{ kN/cm}^2$ corresponde al esfuerzo axial.

Por consiguiente el neopreno queda con las siguientes dimensiones:

Imagen 24. Dimensionamiento de neopreno.



Su altura debe ser mayor a dos veces las deformaciones del puente, así que corresponde a 7 cm de espesor.

Fuente. León, Laura T., 2016.

7.2.5 CARACTERISTICAS DEL AISLADOR



Imagen 25. Esquema aislador LRB.

Se emplea un aislador de tipo LRB (Leaded Rubber Bearing) que proporciona la disipación de energía para la respuesta sísmica y la rigidez para cargas estáticas, para un buen sistema de aislamiento. Por estas razones, cuenta con una barra de plomo centrada en su interior. El plomo-caucho se han utilizado ampliamente en la aplicación práctica a estructuras de puente. (AGOM International SRL, 2016)

Fuente: AGOM Metal Rubber Engineering, 2016.

Imagen 26. Comparación de sistemas de aislación.

	LRB lead core rubber bearing	HDRB high damping rubber bearing	MLRB multi layer low damping rubber bearings
Damping ratio	25-30%	10-16%	4%
Horizontal stiffness	High	Low-Medium	Low-Medium
Vertical load	High	High	High
Horizontal displacement	Medium-High	High	Medium
Recentering capacity	Medium	High	High

Fuente: AGOM Metal Rubber Engineering, 2016.

Como se observa en la Imagen 25 el aislador LRB tiene capacidad de disipar entre 25-30% tal como afirmo anteriormente.

Las razones por las que el plomo es un material apropiado están relacionados con sus propiedades mecánicas, que permiten una buena combinación con las características de los cojinetes laminados: bajo límite elástico de cizalladura [aproximadamente 10 MPa (1450 psi)], suficientemente alta rigidez de corte iniciales [G aproximadamente iguales a 130 MPa (18,8 ksi)], un comportamiento adecuado en cuanto a la respuesta a la fatiga para los ciclos en la zona plástica. Teniendo en cuenta las características de caucho, es fácil comprobar que para un tapón de plomo con un diámetro igual a un cuarto del diámetro de un circular elástico-plástico y teniendo, la rigidez horizontal inicial se incrementa alrededor de 10 veces, con ventajas evidentes en virtud de las cargas de viento y de frenado. El plomo responde esencialmente con bucles de plástico elástico-perfectamente. Después de ceder, la rigidez es por lo tanto igual a la rigidez del cojinete de caucho solo. (Priestley, Seible, & Calvi, 1996)

En este caso se plantea un coeficiente de amortiguamiento del 25 % en la estructura entre cada oscilación, es decir que una respuesta óptima indicaría que en cada periodo se disminuye este porcentaje aproximadamente del periodo inmediatamente anterior, lo cual se evaluará durante la etapa de análisis de diseño con apoyo básico de neopreno y al implementar este sistema.

(Ver Anexo 1. Catálogo de aislador, AGOM INTERNACIONAL.)

7.2.6 ESPECTRO DE ACELERACIONES

Con el fin de simular la magnitud de un posible evento sísmico que podría ocasionar afectación de baja o alta magnitud a una estructura, sin importar cuál sea, se requiere diseñar un espectro de aceleraciones que implementa valores altos de aceleraciones, ya que representan la posible magnitud de un sismo, para ello se requiere extraer de la actual Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14 coeficientes que describen tipo de suelo, posibles aceleraciones según el sitio para el cual se requiere el diseño, ya que por lo menos en Colombia hay registro de microzonificación sísmica, en la cual cada una de las ciudades se encuentran clasificadas por regiones según su vulnerabilidad sísmica.

Adicionalmente, se evalúa teniendo en cuenta un amortiguamiento crítico del 5% y el 7% de probabilidad de excedencia de 75 años, es decir con un periodo de retorno de aproximadamente 1000 años expresada en la aceleración de la gravedad, según lo describe la norma en la figura 3.10.2.1-3 de la sección 3 del CCP-14.

En este caso, se empleará el diseño para la ciudad de Pereira, pues si bien es cierto es una ciudad que en los últimos años ha presentado alta vulnerabilidad, según lo registra el Servicio Geológico Colombiano, por lo tanto es óptimo para ejecutar la propuesta de implementar un sistema de control sísmico, ya que sus condiciones permiten analizar las ventajas o desventajas que ocasionan el uso de un aislador sísmico.

PLANTEAMIENTO INICIAL:

Ciudad: Pereira, Colombia.

1) Aceleración pico horizontal de terreno – PGA

Por medio del cual, se define el valor correspondiente a la ciudad de Pereira, ya que corresponde a la Región 5 con valor de $PGA = 0.25$.

Imagen 27. Mapa de valores. PGA.

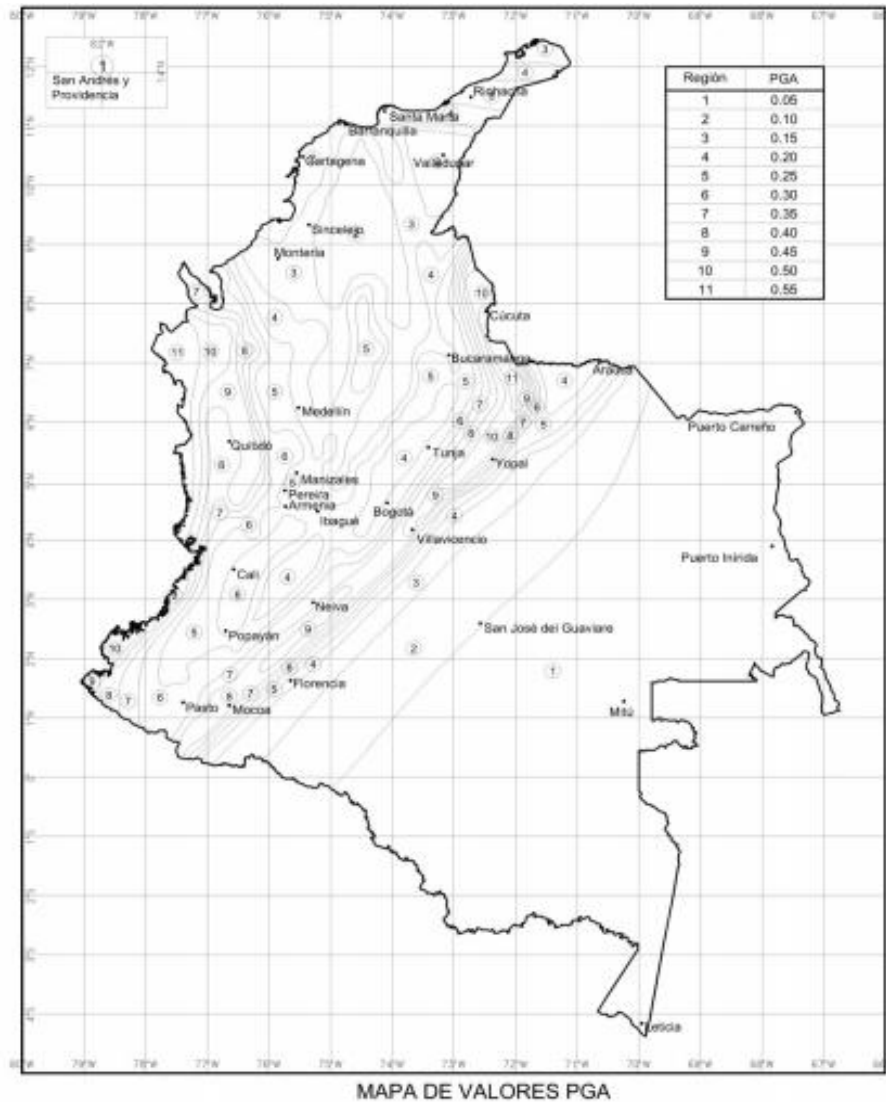


Figura 3.10.2.1-1 — Aceleración Pico Horizontal del Terreno (PGA) con 7% de probabilidad de excedencia en 75 años (aproximadamente 1000 años de periodo promedio de retorno) expresada en la aceleración de la gravedad (g).

Fuente: Código Colombiano de Diseño de Puentes, 2014.

2) Coeficiente de aceleración espectral horizontal – S_s

De la misma manera en que se identificó el parámetro anterior, se localiza el mapa y se extrae el valor para la región a evaluar, obteniendo un valor de $S_s = 0.6$, que en este caso corresponde a la Región 6. También denominado coeficiente espectral para periodos cortos.

Imagen 28. Mapa de valores S_s .

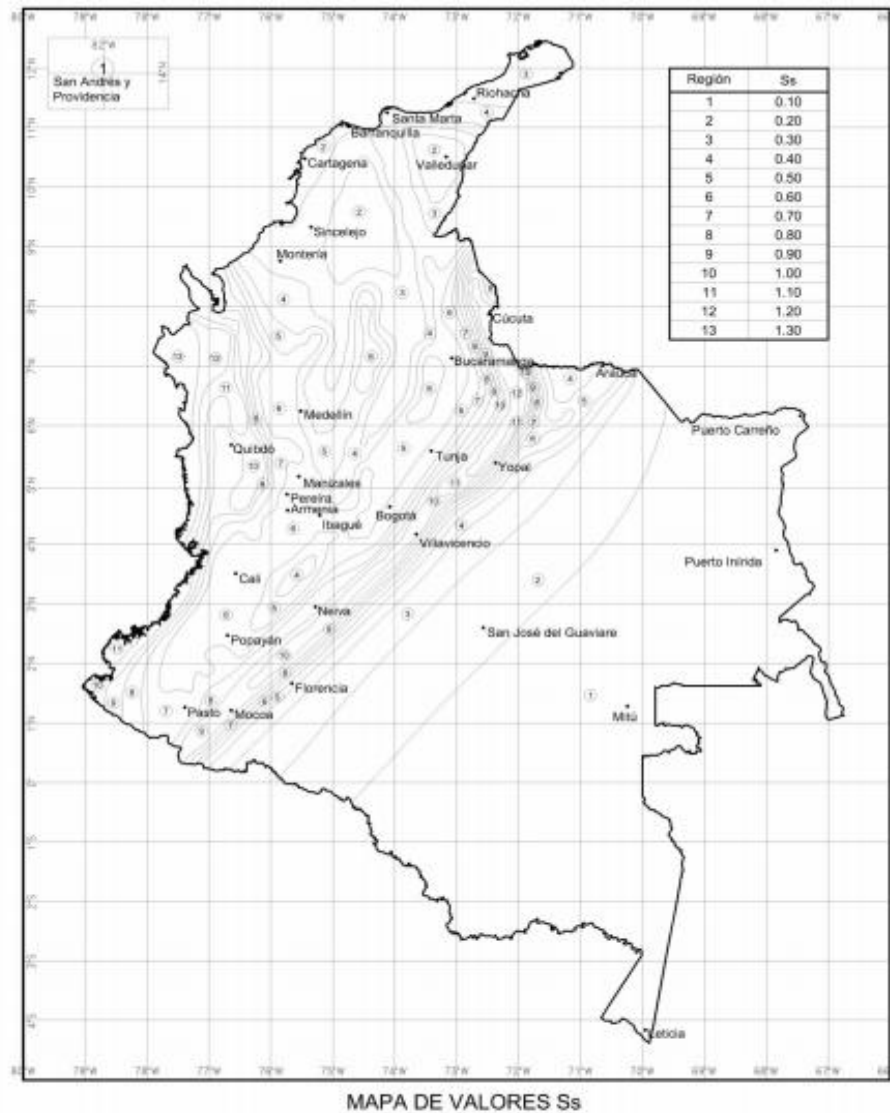


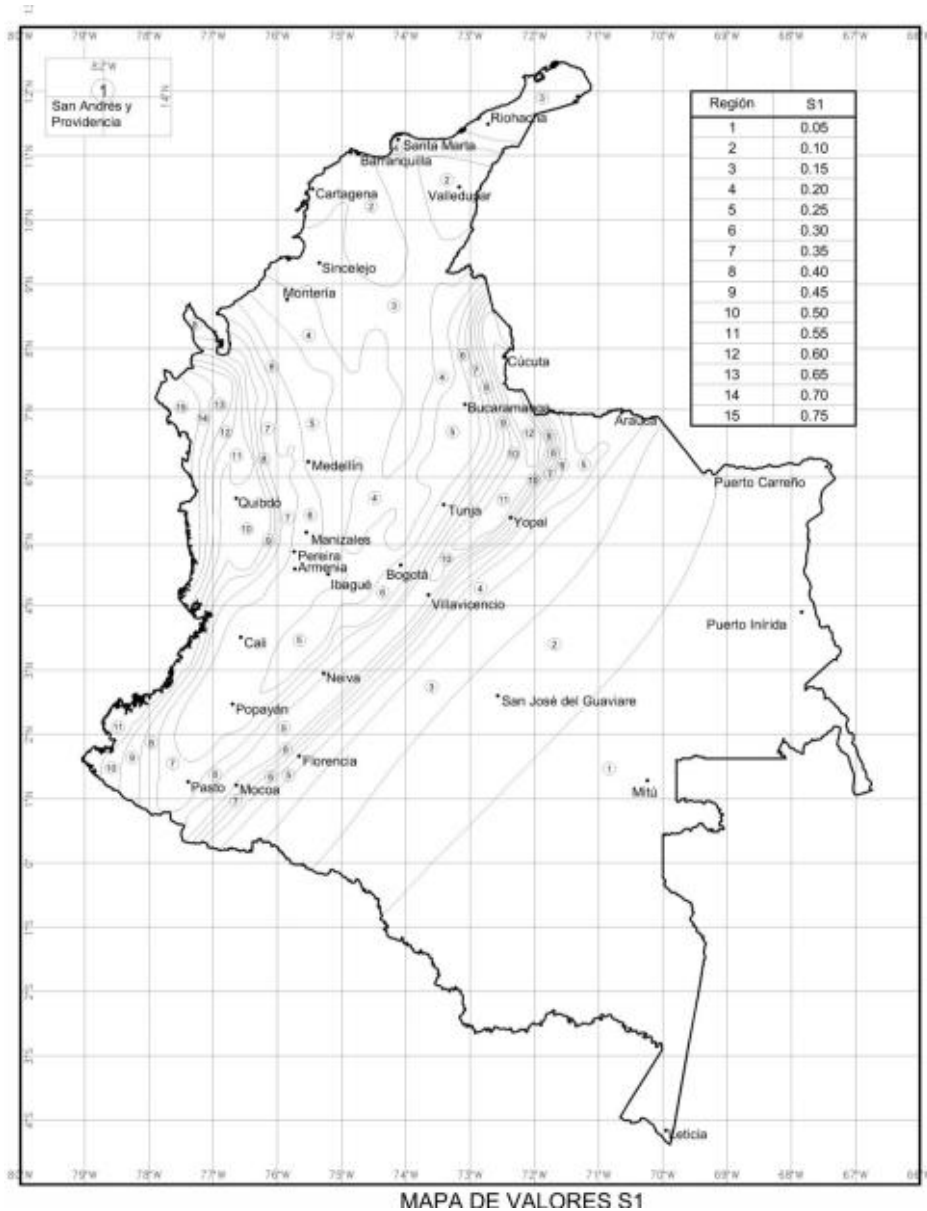
Figura 3.10.2.1-2 — Coeficiente de Aceleración Espectral Horizontal para un periodo de vibración de 0.2 segundos (S_v) para 5% del amortiguamiento crítico y con 7% de probabilidad de excedencia en 75 años (aproximadamente 1000 años de periodo promedio de retorno) expresada en la aceleración de la gravedad (g).

Fuente: Código Colombiano de Diseño de Puentes, 2014.

3) Coeficiente de aceleración espectral horizontal – S1

Una vez identificada la Región 6, posteriormente se localiza en mapa indicado el coeficiente espectral de periodos largos correspondiente a esta zona, obteniendo un valor de $S1 = 0.30$.

Imagen 29. Mapa de valores S1.



Fuente: Código Colombiano de Diseño de Puentes, 2014.

4) Tipo de suelo

Una vez realizado el procedimiento de reconocimiento del terreno para el cual se está diseñando el puente, se considera el estado actual del suelo como uno de los factores principales para ejecutar el espectro de aceleraciones. Gracias a la tabla 3.10.3.1-1 del Código Colombiano de Diseño de Puentes CCP-14. Se logra identificar el tipo de suelo con el cual se ejecuta el diseño. Obteniendo un tipo de suelo C, ya que sus características corresponden a la ciudad a diseñar, pues es indispensable conocer que hay ente el estrato resistente y la superficie o capa de suelo sobre la cual se construirá la infraestructura del puente.

Tabla. Definición de los tipos de perfil de suelo, CCP-14.

Tipo de Perfil de Suelo	Características del perfil
A	Roca competente con velocidad medida de onda de cortante, $\bar{v}_s \geq 1500$ m/s.
B	Perfil de roca de rigidez media con \bar{v}_s en el intervalo $1500 \text{ m/s} > \bar{v}_s \geq 760$ m/s.
C	Perfiles de suelo muy densos o roca blanda con velocidad medida de onda de cortante, \bar{v}_s en el intervalo $760 \text{ m/s} > \bar{v}_s \geq 360$ m/s, o perfiles que cumplan con cualquiera de los dos criterios siguientes: $\bar{N} > 50$ golpes/pie, o $\bar{\sigma}_u > 100$ kPa ($= 1 \text{ kgf/cm}^2$).
D	Perfiles de suelos rígidos con velocidad medida de onda de cortante \bar{v}_s en el intervalo $360 \text{ m/s} > \bar{v}_s \geq 180$ m/s, o perfiles que cumplan con cualquiera de los dos criterios siguientes: \bar{N} en el intervalo 50 golpes/pie $> \bar{N} \geq 15$ golpes/pie, o $\bar{\sigma}_u$ en el intervalo $100 \text{ kPa} (= 1 \text{ kgf/cm}^2) > \bar{\sigma}_u \geq 50$ kPa ($= 0.5 \text{ kgf/cm}^2$).
E	Perfil de suelo con velocidad medida de onda de cortante, $\bar{v}_s < 180$ m/s, o

	perfiles que cumplan con cualquiera de los dos criterios siguientes: $\bar{N} < 15$ golpes/pie, o $\bar{\sigma}_u < 50$ kPa ($= 0.5 \text{ kgf/cm}^2$), o
	cualquier perfil con $H > 3$ m de arcilla blanda, definida como un suelo con $IP > 20$, $w > 40\%$ y $\bar{\sigma}_u < 25$ kPa ($= 0.25 \text{ kgf/cm}^2$) (véase la Nota al final de la Tabla).
F	Suelos que requieren evaluación particular de sitio, tales como: <ul style="list-style-type: none"> Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. Turbas o arcillas altamente orgánicas ($H > 3$ m de turba o arcillas altamente orgánicas donde H = espesor del suelo) Arcillas de alta plasticidad ($H > 7.5$ m con $IP > 75$) Estratos de arcillas con rigidez de media a blanda de gran espesor ($H > 36$ m)

Fuente: Código Colombiano de Diseño de Puentes, 2014.

5) FACTOR DE SITIO

Según lo describe la Norma Colombiana de Diseño de Puentes, estos factores se usan para periodos de vibración cero, cortos y largos, respectivamente, según el tipo de suelo y los valores obtenidos en los anteriores coeficientes descritos por medio de mapas indicativos por regiones, y tabla de clasificación.

1) F_{pga} en el periodo de vibración cero del Espectro de aceleraciones.

Por medio de la tabla 3.10.3.2-1 del CCP-14, se continúa la búsqueda en hallar el coeficiente F_{pga} cruzando el perfil de suelo obtenido y el valor de PGA hallado anteriormente, de la siguiente manera:

Tabla 3.10.3.2-1 — Valores del factor de Sitio, F_{pga} , en el periodo de vibración cero del Espectro de Aceleraciones

Tipo de Perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos <small>(véase la Nota 1)</small>				
	$PGA \leq 0.1$	$PGA = 0.2$	$PGA = 0.3$	$PGA = 0.4$	$PGA \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	véase nota 2	véase nota 2	véase nota 2	véase nota 2	véase nota 2

Fuente: Código Colombiano de Diseño de Puentes, 2014.

Se obtuvo un valor de $F_{pga}=1,15$, luego de realizar la interpolación requerida según lo describe la norma, con el fin de hallar el valor requerido con mayor precisión.

2) F_a en el intervalo de periodos de vibración cortos del Espectro de aceleraciones.

Del mismo modo del caso anterior, relacionando S_s y el tipo de suelo encontrado, se halla el valor de $F_a=1,16$

Tabla 3.10.3.2-2 — Valores del factor de Sitio, F_a , en el intervalo de periodos de vibración cortos del Espectro de Aceleraciones

Tipo de Perfil	Coeficiente de aceleración espectral para periodo de vibración de 0.2s (Véase la Nota 1)				
	$S_S \leq 0.25$	$S_S = 0.50$	$S_S = 0.75$	$S_S = 1.00$	$S_S \geq 1.25$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	véase nota 2	véase nota 2	véase nota 2	véase nota 2	véase nota 2

Fuente: Código Colombiano de Diseño de Puentes, 2014.

3) Fv- En el intervalo de periodos de vibración largos del Espectro de Aceleraciones.

Una vez determinados los coeficientes que describen el tipo de zona y terreno en el cual se ejecuta el proyecto de construcción de puente vehicular, se finaliza a búsqueda de parámetros por medio de la tabla 3.10.3.2.3, relacionando coeficiente de aceleración espectral para periodo de vibración de 1.0s y cruzado el tipo de perfil hallado.

Tabla 3.10.3.2-3 — Valores del factor de Sitio, F_v , en el intervalo de periodos de vibración largos del Espectro de Aceleraciones

Tipo de Perfil	Coeficiente de aceleración espectral para periodo de vibración de 1.0s (Véase la Nota 1)				
	$S_1 \leq 0.10$	$S_1 = 0.20$	$S_1 = 0.30$	$S_1 = 0.40$	$S_1 \geq 0.50$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	véase nota 2	véase nota 2	véase nota 2	véase nota 2	véase nota 2

Fuente: Código Colombiano de Diseño de Puentes, 2014.

Finalmente, se obtuvo un valor de $F_v=1.5$ con el cual se procede a continuar con el diseño del espectro de aceleraciones.

Resumen de valor según coeficientes encontrados:

Tabla 1. Datos espectro de aceleraciones.

ESPECTRO DE ACCELERACIONES	COEFICIENTES	PGA	0,25
		Ss	0,6
		S1	0,3
		Tipo suelo	C
Ciudad: Pereira, Colombia.	FACTOR DE SITIO	FPGA	1,15
		Fa	1,16
		Fv	1,5

Fuente: Código Colombiano de Diseño de Puentes, 2014.

Una vez finalizada la etapa de búsqueda de parámetros según el CCP-14, inicia el diseño del espectro de aceleraciones. Hallando A_s , S_{Ds} , S_{D1} , T_s y T_o respectivamente, donde cada uno de ellos se refiere a:

A_s : Coeficiente de aceleración pico del suelo modificado por factores de sitios para determinar periodos cortos (3.10.4.2) CCP-14.

S_{Ds} : Coeficiente de aceleración de respuesta espectral horizontal para un periodos de 0.2s modificado por un factor de sitio de periodos cortos (3.10.4.2) CCP-14.

S_{D1} : Coeficiente de aceleración de respuesta espectral horizontal para un periodo de 1.0s modificado por un factor de sitio de periodos largos (3.10.4.2) CCP-14.

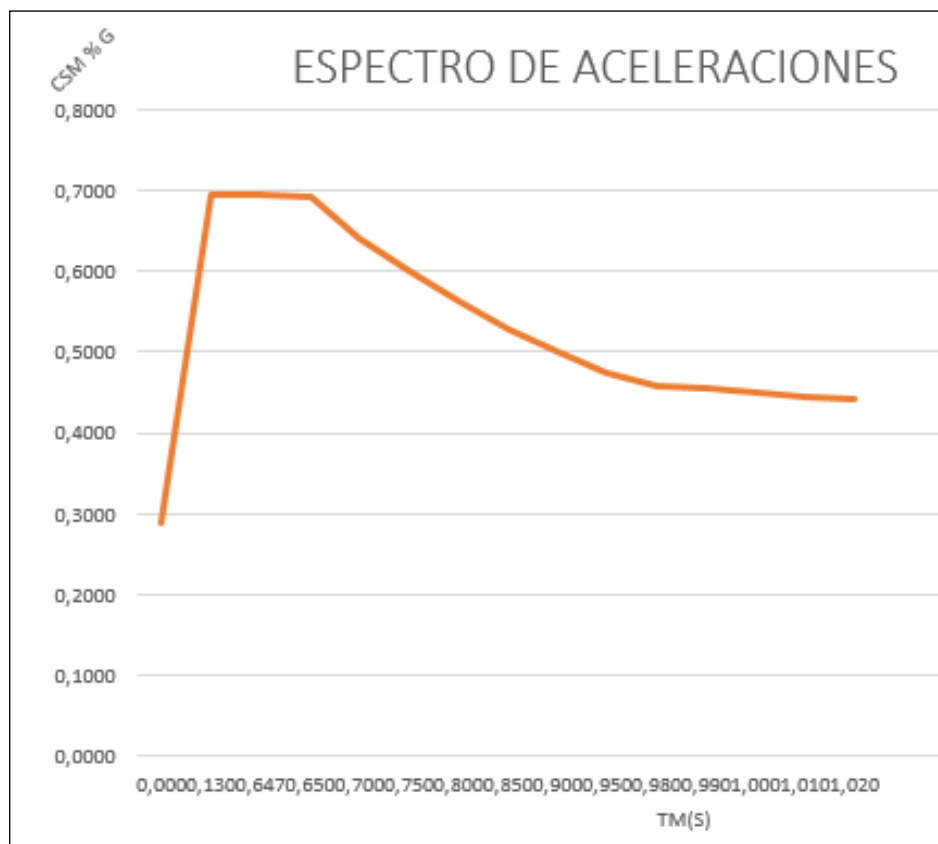
T_s : Periodo característico en el cual el espectro de respuesta de aceleraciones cambia de ser independiente del periodo para ser inversamente proporcional al periodo (s) (3.10.4.2) CCP-14.

T_o : Periodo de referencia usado para definir la forma del espectro de respuesta de aceleraciones (s) (3.10.4.2) CCP-14.

Antes de iniciar cálculos, es importante identificar el motivo de ejecución de un espectro de respuesta sísmica, pues, es indispensable identificar los posibles modos de vibración que puede ocasionar un sismo en este caso al afectar un puente, ya que se pueden encontrar tantos modos de vibración como masas tenga la estructura. La forma o modo de vibración de un puente se analiza en estado de equilibrio dinámico, ya que es la forma natural de moverse cuando se encuentra sometido a fuerza sísmica y cada modo de vibración tiene un periodo.

Teniendo en cuenta que en este caso no es apropiado usar el método de la fuerza horizontal equivalente como sucede en los edificios según lo describe la NSR-10, debido a la acción de una carga puntual simulada a un costado de edificio en función del cortante basal, luego de hallar la masa del edificio y en función del coeficiente de fuerza de piso (C_{vx}). Por lo tanto en puentes es necesario realizar análisis por medio el método de elementos finitos, el cual convierte el tablero en un conjunto de elementos finitos conectados entre sí en nodos situados en su contorno, con el fin de obtener los desplazamientos dentro de cada uno de los elementos que lo conforman en función de los desplazamientos de los nodos.

Imagen 30. Espectro de aceleraciones manual.



Fuente. León, Laura T., 2016.

1) Se halla el coeficiente de aceleración pico del suelo, en término de factor de sitio en periodo de vibración cero y la aceleración pico horizontal de terreno.

$$A_s = F_{pga}PGA$$

$$A_s = 1.15 \times 0.25$$

$$\mathbf{A_s = 0.29}$$

2) Luego, continúa la evaluación del coeficiente de aceleración de respuesta espectral horizontal para un periodos cortos, es importante identificar que para periodos mayores o iguales a T_0 y menores o iguales a T_s , El C_{sm} debe tomar el valor igual a S_{DS} .

$$S_{DS} = F_a S_s$$

$$S_{DS} = 1.16 \times 0.6$$

$$\mathbf{S_{DS} = 0.696}$$

3) Para periodos mayores T_s , el coeficiente sísmico elástico de respuesta sísmica será igual a S_{D1} / T_m . Por lo tanto el coeficiente de aceleración espectral para periodos largos, y los periodos correspondientes a T_0 y T_s son igual a:

$$S_{D1} = F_v S_1$$

$$S_{D1} = 1.50 \times 0.3$$

$$\mathbf{S_{D1} = 0.45}$$

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$$

$$T_s = \frac{0.45}{0.696}$$

$$\mathbf{T_s = 0.647}$$

$$T_0 = 0.2 T_s$$

$$T_0 = 0.2 (0.647)$$

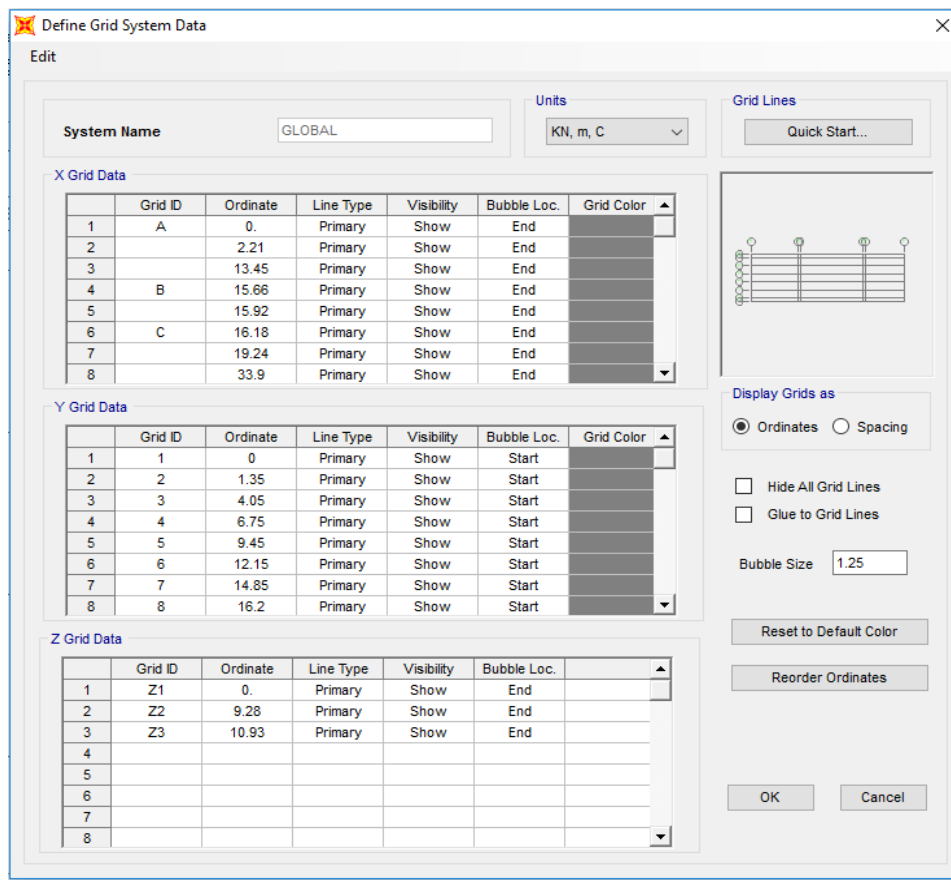
$$\mathbf{T_0 = 0.129}$$

8. MODELO Y ANALISIS DE PUENTE CON AISLADOR Y SIN AISLADOR

Inicialmente se dará a conocer el proceso de modelación para un puente de losa y viga por medio del programa SAP2000, sin ningún tipo de sistema de control sísmico, así que se plantea con apoyos de neopreno ubicados en el ancho del estribo. Esto, con el fin de representar un tipo de diseño convencional generalmente usado en el País, pues si bien es cierto hasta el momento solo el Puente Helicoidal de Dos Quebradas- Risaralda ha implementado este sistema.

El modelo inicia con el dimensionamiento, cuenta con tres vanos y se diseña para la ciudad de Pereira ya que es una ciudad con alta vulnerabilidad sísmica.

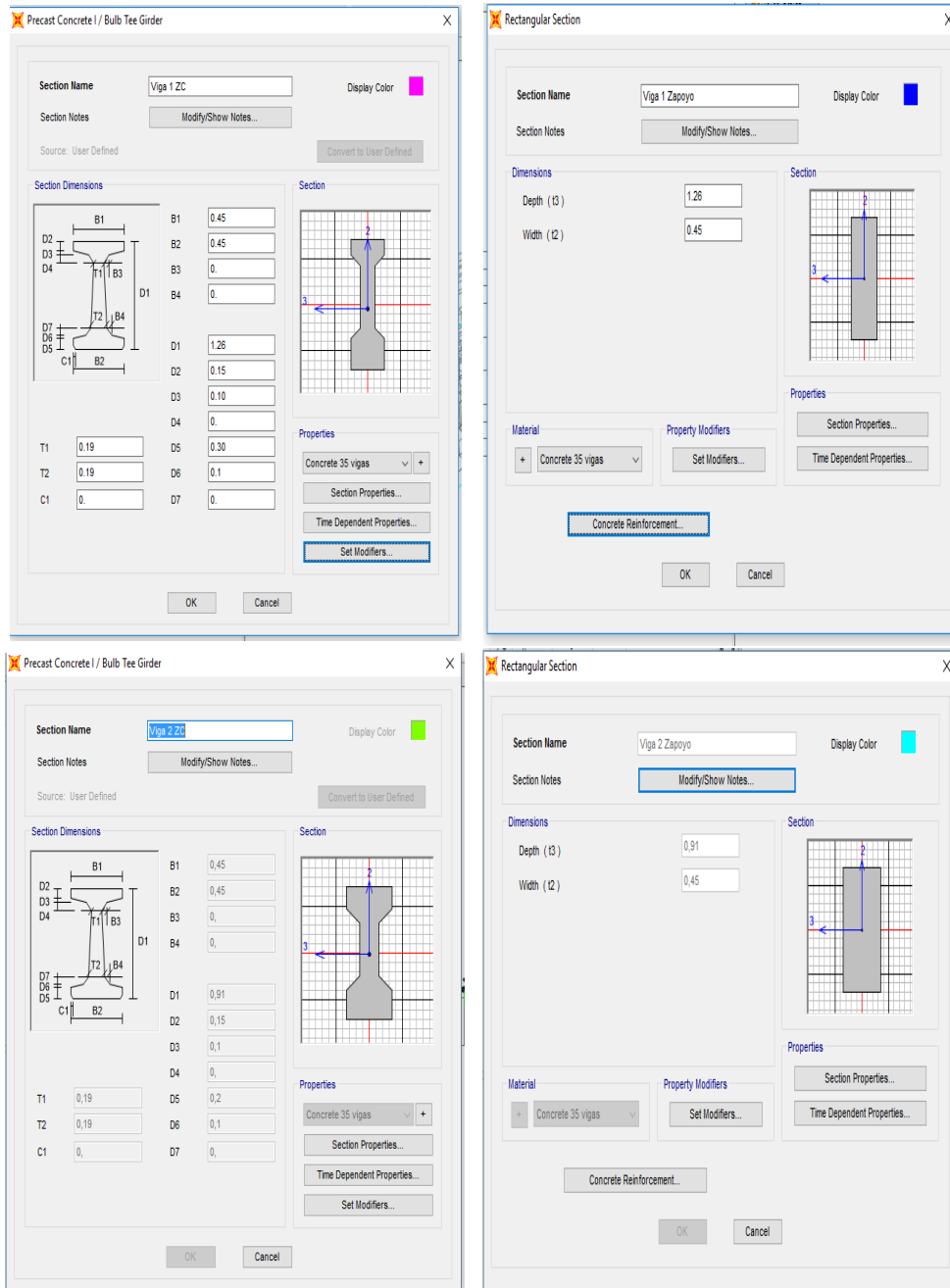
Imagen 31. Dimensionamiento en software puente de losa y viga.



Fuente. León, Laura T., 2016.

Una vez definidas dimensiones iniciales, se procede con la definición de cada uno de los elementos, previamente diseñados como vigas en su zona central (ZN) y su elemento rectangular en la zona de apoyo.

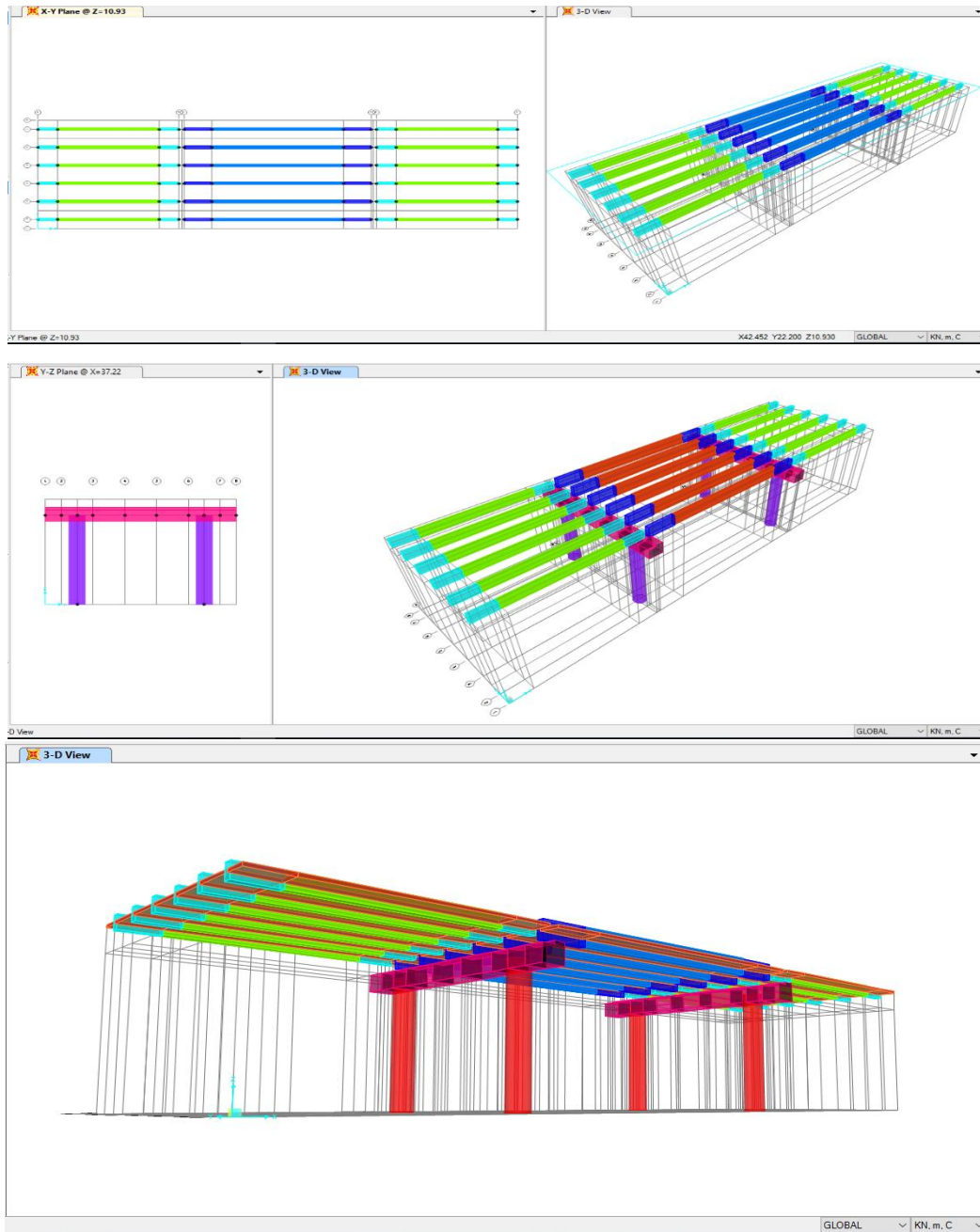
Imagen 32. Esquema dimensionamiento para vigas.



Fuente. León, Laura T., 2016.

Se observa el modelo en 3D, con el fin de verificar el correcto posicionamiento de cada uno de los elementos.

Imagen 33. Revisión vista en 3D.



Fuente. León, Laura T., 2016.

Una vez ubicados carriles, definidas secciones y verificación de elementos, se define el modelo sobre apoyos de neopreno, corriendo nuevamente el modelo para identificar posibles fallas en caso de existir o que la estructura este suelta en algún punto.

Para ello, luego de hallar la carga puntual a cortante que recibe el asiento del estribo, ya que se requiere una almohadilla de neopreno generalmente del mismo ancho de la viga, se halla el espesor para que permita la deformación del neopreno sin que pueda ser afectado, por ello debe ser mayor a dos veces el desplazamiento esperado en un puente. Ya que se recomienda un esfuerzo axial menor o igual que 0.35 kN/cm^2 , para que al aplicar las cargas no supere este valor, por ello se debe realizar un pre dimensionamiento para el neopreno según reacciones obtenidas al diseñar por cortante, obteniendo finalmente un valor de 760.35 kN teniendo en cuenta la carga viva por el factor de distribución y la carga muerta apoyada sobre el estribo, este valor será la carga total apoyada sobre el neopreno. Una vez obtenida la carga se dividirá en WXL para hallar el esfuerzo, el cual debe ser menor a 0.35 kN/cm^2 , despejando de la ecuación la longitud estimada, obteniendo 48,28 cm y aproximando a 49 cm.

Con el fin de modelar este apoyo sobre el estribo del puente se requiere restringir por medio de unos topes laterales construidos en obra ubicados estratégicamente a los extremos de la viga, analizando consigo sus desplazamientos según sus grados de libertad. Si la viga requiere moverse en la dirección x se encuentra libre de moverse pero se tendrá en cuenta una condición con el fin de no liberarlo del todo, el desplazamiento en la dirección Y y Z será restringido por la acción de los topes en la dirección Y y del peso de la viga en la dirección Z, en cuanto a la rotación alrededor del eje X y Z también se restringen, rotación alrededor de Y que en cuestión del modelo se realiza de la siguiente manera:

En la direcciones todas se mantienen ya que el neopreno trabajará en cada una de ellas, luego se define en qué dirección y rotación quedará fija y condicionada. En U_x quedará restringido, en U_y es en la dirección longitudinal por lo tanto permite que se mueva pero debe condicionarse, en U_z será dirección transversal que se verá restringido por lo topes y las riostras. En cuando a la rotación del R_x se limita por lo mismo, R_y por los estribos tampoco, pero en R_z si se permite rotar conjunto a la dirección de estribo. Por lo tanto quedan definidos así:

Imagen 34. Definición de apoyo de neopreno en software.

Link/Support Property Data

Link/Support Type: Linear

Property Name: NEOPRENO

Property Notes:

Total Mass and Weight

Mass	0,	Rotational Inertia 1	0,
Weight	0,	Rotational Inertia 2	0,
		Rotational Inertia 3	0,

Factors For Line, Area and Solid Springs

Property is Defined for This Length In a Line Spring: 1,

Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs: 1,

Directional Properties

Direction	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R1	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>

Properties: Modify/Show for All...

P-Delta Parameters: Advanced...

Buttons: Fix All, Clear All, Advanced..., OK, Cancel

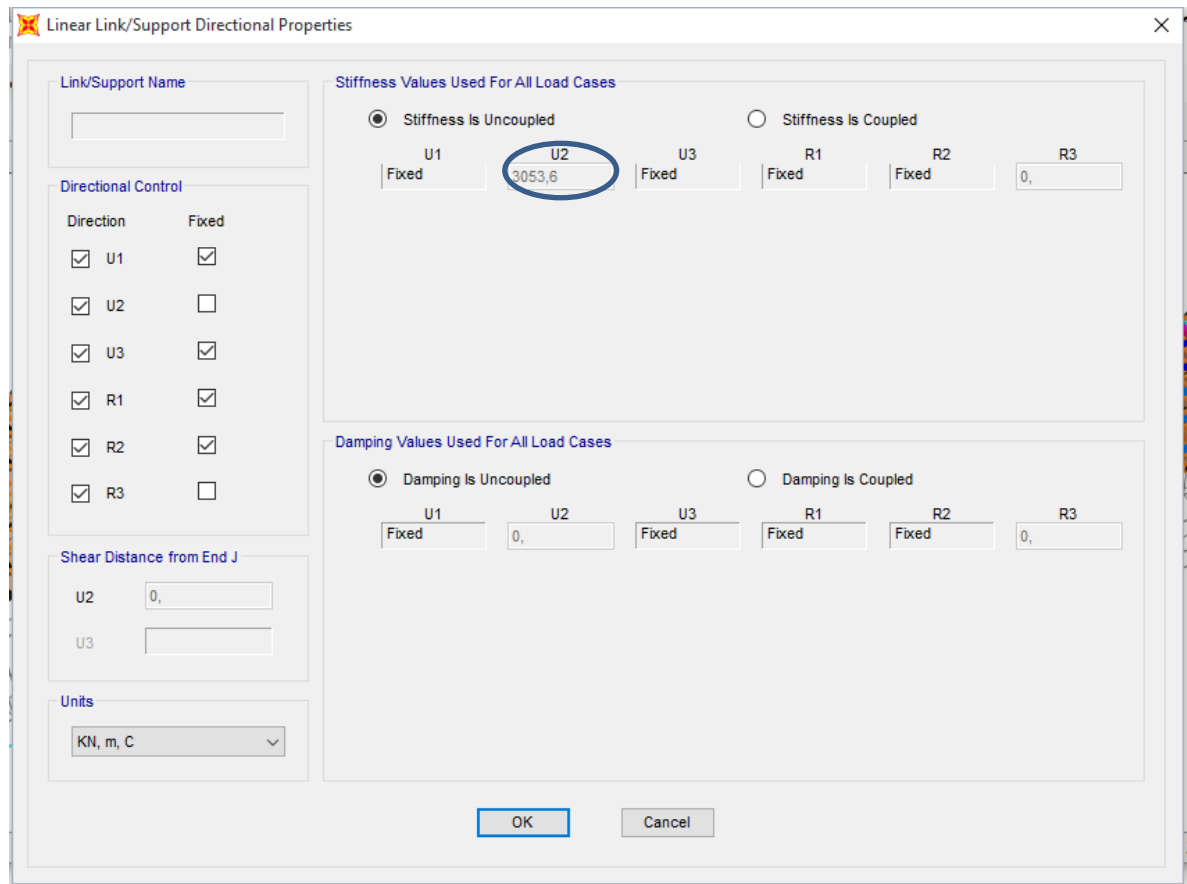
Fuente. León, Laura T., 2016.

Es importante identificar el tipo de link definido, pues por ahora se encuentra lineal ya que no representa algún tipo de aislador o disipador definido.

En el caso del desplazamiento sobre el eje x, se condiciona ya que no se debe mover libremente, pues por acción de la fuerza horizontal donde existe aplicada sobre el neopreno, dividida sobre el desplazamiento producido del neopreno es el modulo G (módulo de cortante de neopreno) igual a 9.5 Kg/cm². Luego se halla el K del resorte a modelar, multiplicando este valor por las dimensiones de ancho y largo correspondientes a 45cm y 50 cm respectivamente, sobre la altura definida que en este caso es de 7cm. De la siguiente manera:

$$K = \frac{9.5 \text{ Kg/cm}^2 \times 45\text{cm} \times 50\text{cm}}{7 \text{ cm}} = 3053.6 \text{ kN/m}$$

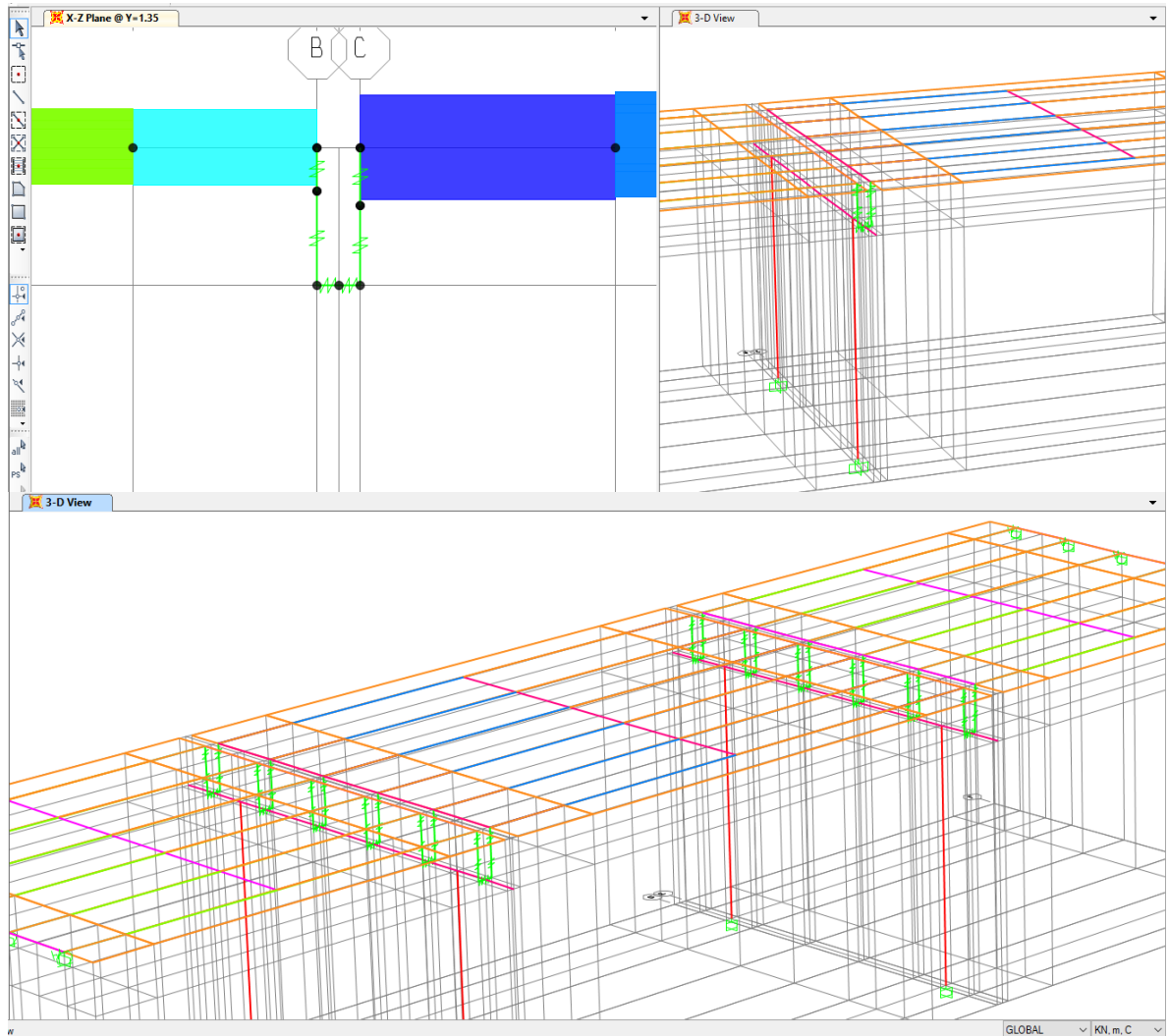
Imagen 35. Apoyo de neopreno acoplado.



Fuente. León, Laura T., 2016.

Una vez definido el neopreno se debe dibujar en los apoyos tanto interiores como exteriores el elemento definido por medio de la función **LINK** en el software, de acuerdo a la medida definida por cálculos anteriormente.

Imagen 36. Esquema, vista en 3D apoyo neopreno en software.



Fuente. León, Laura T., 2016.

Antes de continuar, se recomienda correr el modelo con el fin de verificar el correcto procedimiento hasta el momento.

Imagen 37. Chequeo de datos en software.

```
Analysis Complete - PROYECTO PRIMER CORRER CON NEOPRENO
File Name: C:\Users\Tatis\Documents\PUENTE CLASE COMP...PROYECTO PRIMER CORRER CON NEOPRENO.sdb
Start Time: 8/05/2016 11:14:04 p. m. Elapsed Time: 00:00:00
Finish 8/05/2016 11:14:04 p. m. Run Status: Done - Analysis Complete

NUMBER OF FRAME/CABLE/TENDON ELEMENTS = 139
NUMBER OF SHELL ELEMENTS = 63
NUMBER OF LINK/SUPPORT ELEMENTS = 72
NUMBER OF LOAD PATTERNS = 1
NUMBER OF ACCELERATION LOADS = 9
NUMBER OF LOAD CASES = 1

ELEMENT FORMATION 23:14:03

NUMBER OF COUPLED CONSTRAINT EQUATIONS = 672
REDUCTION OF CONSTRAINTS AND RESTRAINTS:
NUMBER OF
  CONSTRAINT MASTER DOF BEFORE REDUCTION = 384
  COUPLED CONSTRAINT/RESTRAINT MASTER DOF = 312
  CONSTRAINT MASTER DOF AFTER REDUCTION = 72

LINEAR EQUATION SOLUTION 23:14:03
FORMING STIFFNESS AT ZERO (UNSTRESSED) INITIAL CONDITIONS
TOTAL NUMBER OF EQUILIBRIUM EQUATIONS = 660
NUMBER OF NON-ZERO STIFFNESS TERMS = 13870
NUMBER OF EIGENVALUES BELOW SHIFT = 0

LINEAR STATIC CASES 23:14:03
USING STIFFNESS AT ZERO (UNSTRESSED) INITIAL CONDITIONS
TOTAL NUMBER OF CASES TO SOLVE = 1
NUMBER OF CASES TO SOLVE PER BLOCK = 1

LINEAR STATIC CASES TO BE SOLVED:
CASE: DEAD

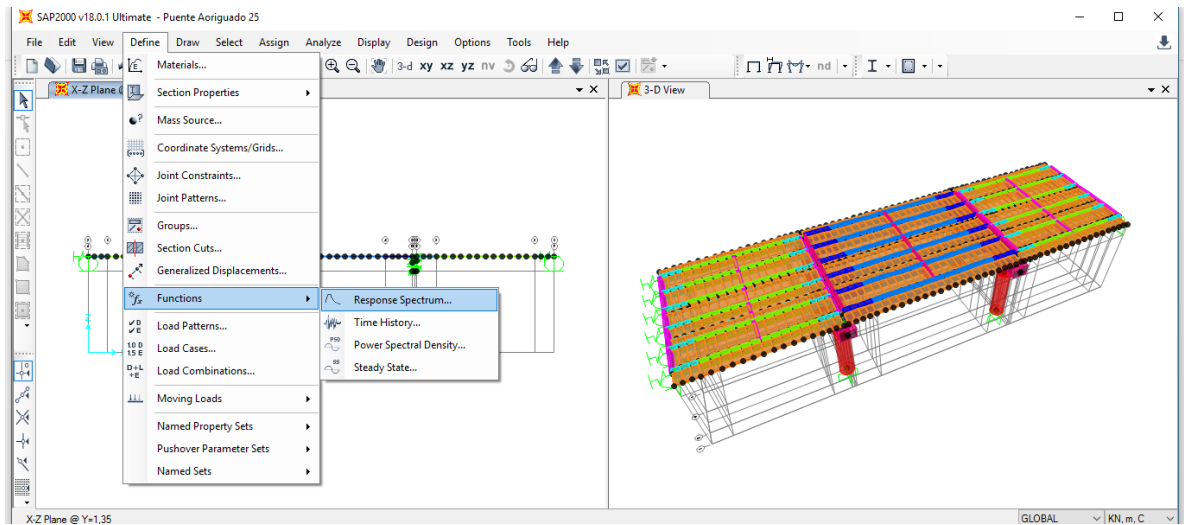
ANALYSIS COMPLETE 2016/05/08 23:14:03
```

Fuente. León, Laura T., 2016.

Una vez examinado el cuadro de resultados que indica el óptimo desarrollo del modelo hasta el momento, Inicia la definición del análisis modal con el espectro de diseño para la ciudad de Pereira, para ello se define el modal según los valores obtenidos al realizar el análisis descrito anteriormente, allí se asigna un 5% de amortiguamiento según lo indicado en el código.

Al crear la tabla de $Tm(s)$ vs Csm (Porcentaje de la gravedad), y teniendo en cuenta periodos cortos, periodos largos, se provee al software los datos encontrados por medio de la función **Response Spectrum**.

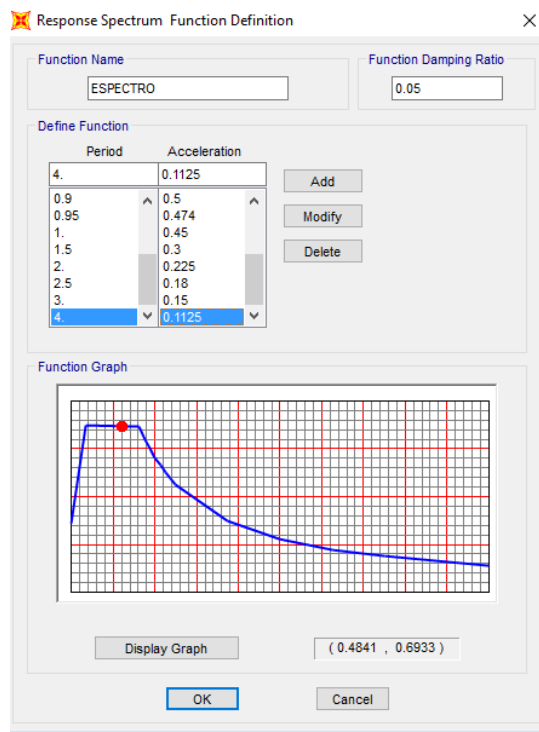
Imagen 38. Espectro de diseño en software.



Fuente. León, Laura T., 2016.

Ya que se evaluaron los parámetros requeridos para el espectro de la ciudad de Pereira, se plantea un amortiguamiento del 5%.

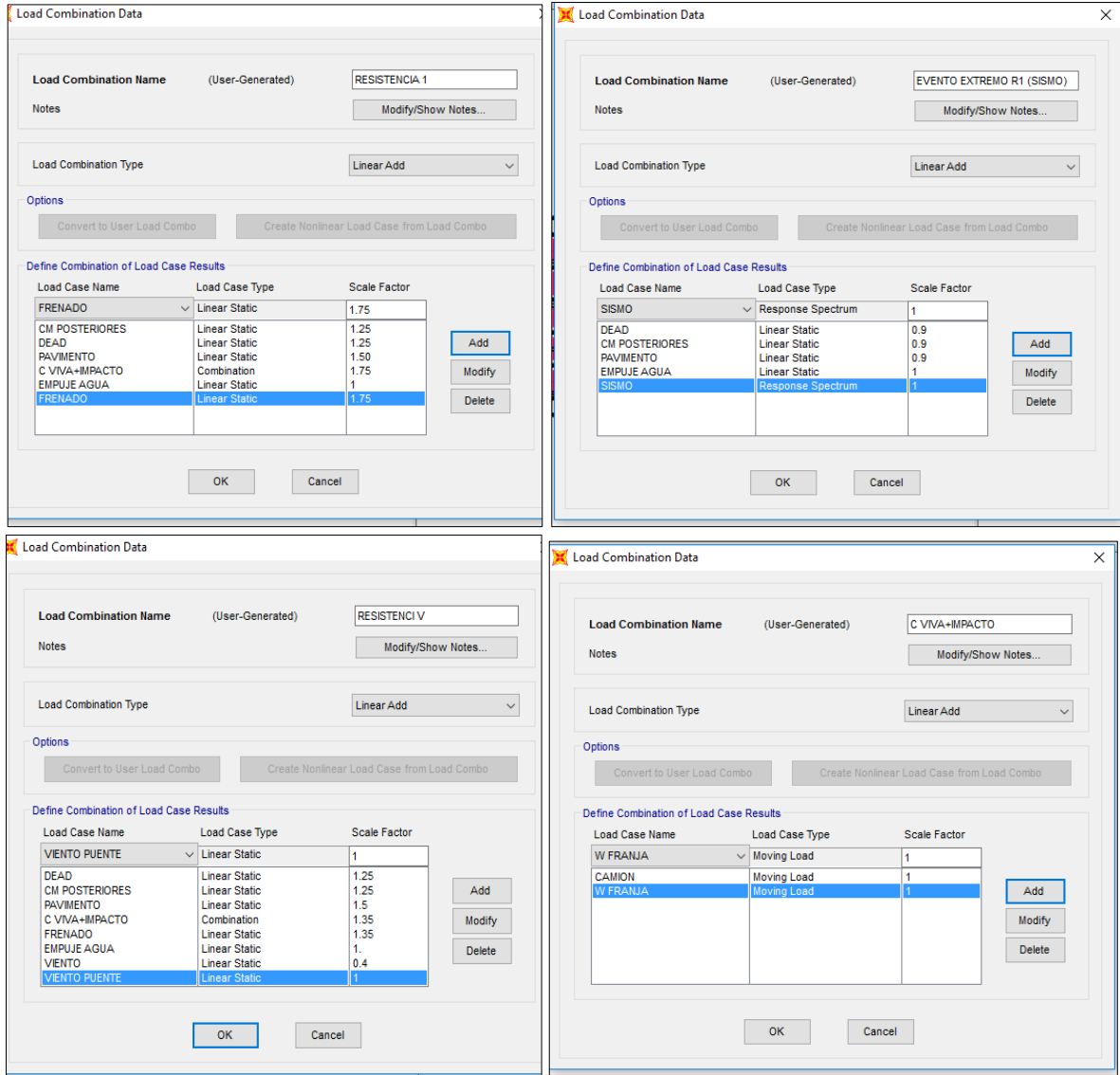
Imagen 39. Esquema espectro de aceleraciones, ciudad Pereira.



Fuente. León, Laura T., 2016.

6. Una vez agregadas las cargas, se definen las resistencias, empuje del agua y frenado.

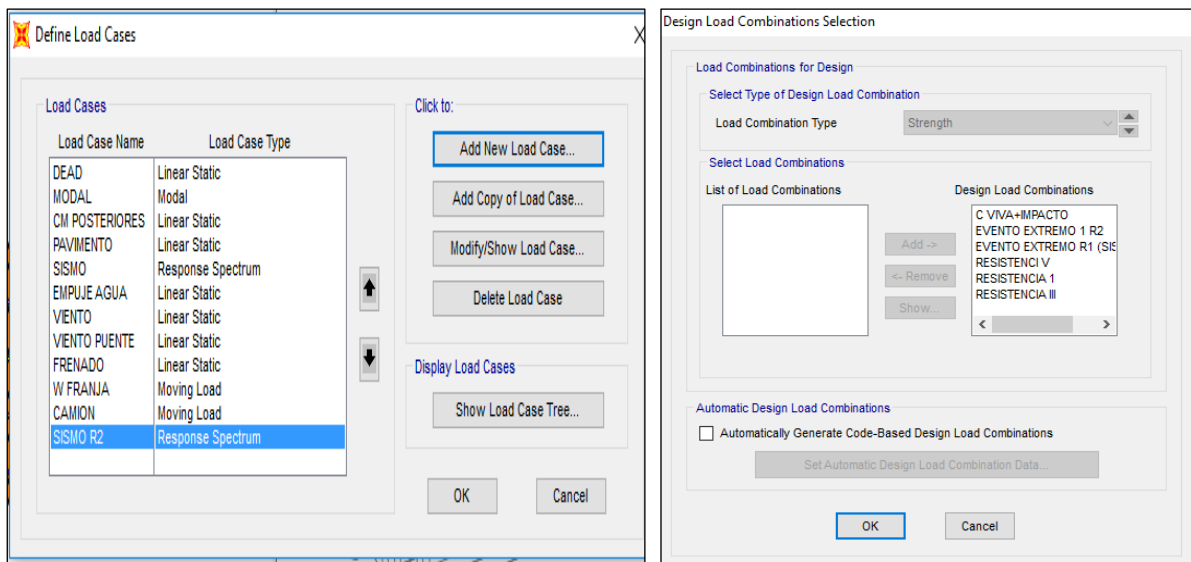
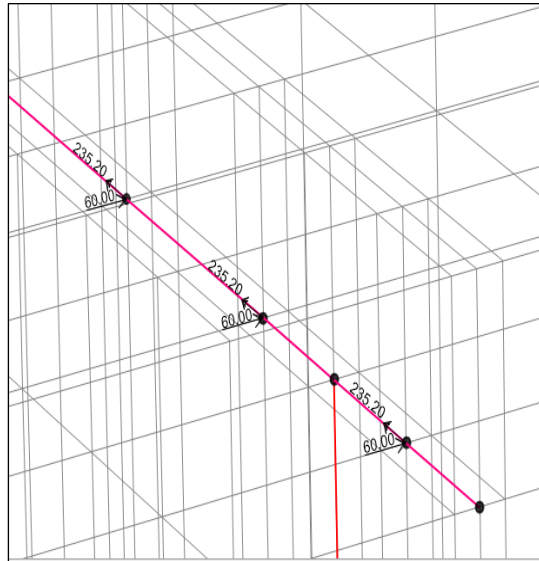
Imagen 40. Definición de cargas en el modelo.



Fuente. León, Laura T., 2016.

Ya que los valores fueron explicados anteriormente, se alimenta el programa y se verifican los datos expuestos.

Imagen 41. Carga de frenado, total de cargas en el modelo y simulación de eventos sísmicos.

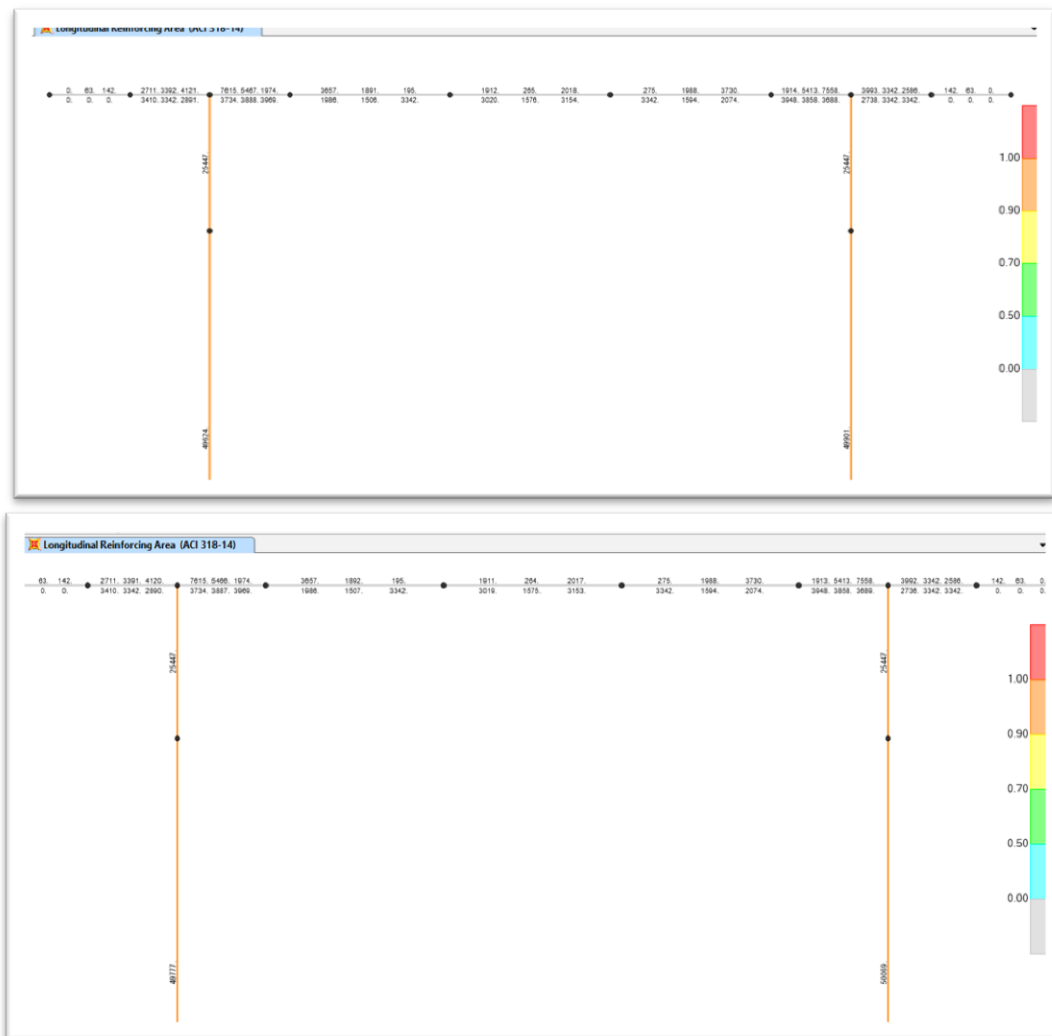


Fuente. León, Laura T., 2016.

Una vez terminado de alimentar el programa, se corre todos los casos de carga definidos, revisando consigo con ayuda de los colores que libera el programa, donde el color más claro representa mejores condiciones y el color rojo identifica condiciones críticas.

Se observa el resultado en las pilas, teniendo en cuenta la gama de colores que presenta el software, ya que entre más rojizo se encuentren los elementos, posiblemente no cumpla el diseño o hay que modificar secciones o material según se requiera:

Imagen 43. Resultado Pila 1 - Pila 2.

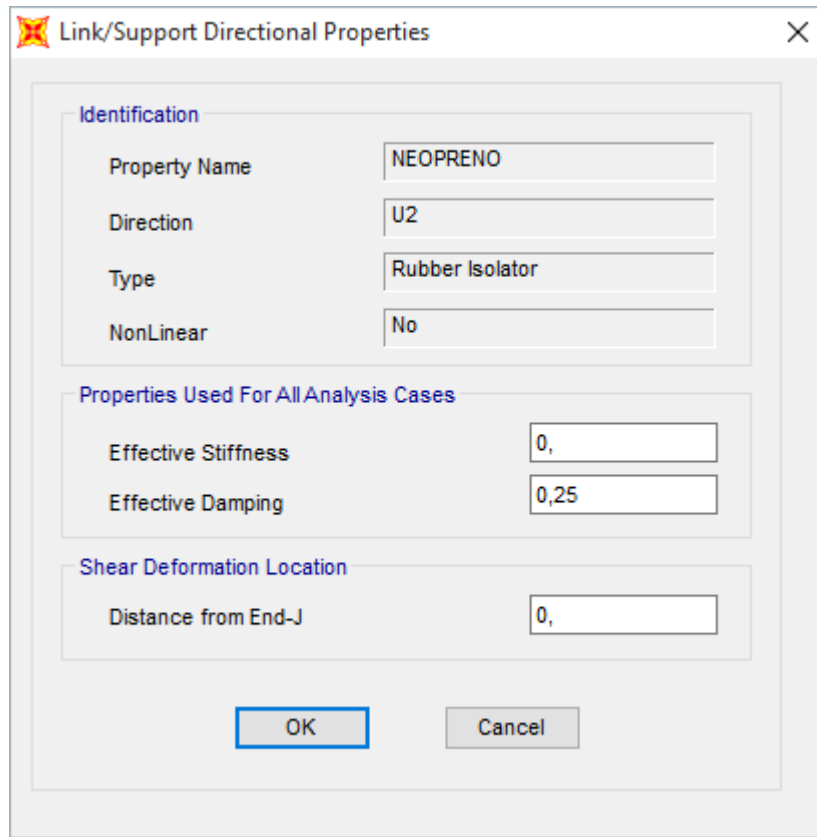


Fuente. León, Laura T., 2016.

Una vez finalizado el modelo convencional, se procede a realizar el modelo con sistema de control pasivo tipo LRB, el cual cuenta con un sistema de disipación según catálogos del 25%, entre cada oscilación.

Ya que no es un análisis lineal, se cambia el tipo por **Rubber Isolator** y se especifica el porcentaje indicado.

Imagen 44. Definición aislador en software.



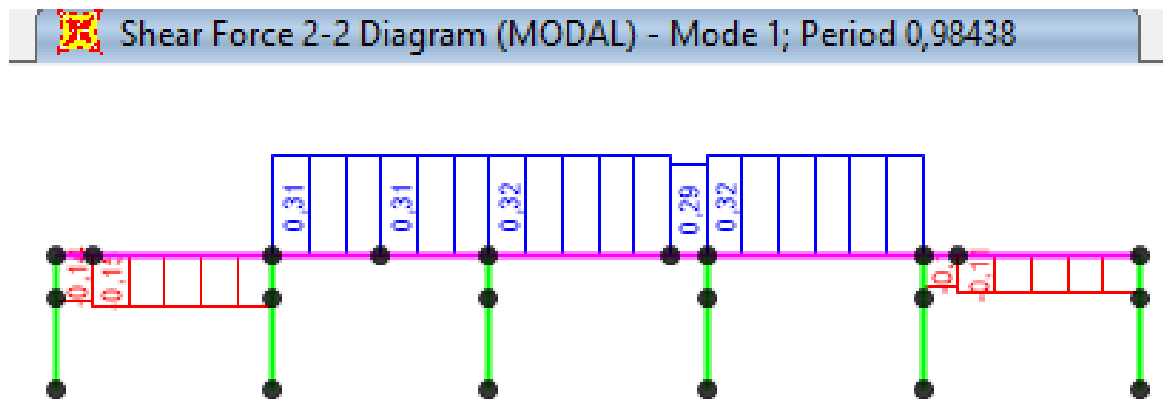
Fuente. León, Laura T., 2016.

9. ANALISIS DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES

Para lograr analizar los resultados obtenidos en el software, al realizar análisis modal se indicaron 50 modos de vibración de tal manera que cada uno de ellos indicara un valor de periodo y frecuencia, una vez ejecutado el análisis en los dos casos planteados, se obtuvieron los siguientes resultados:

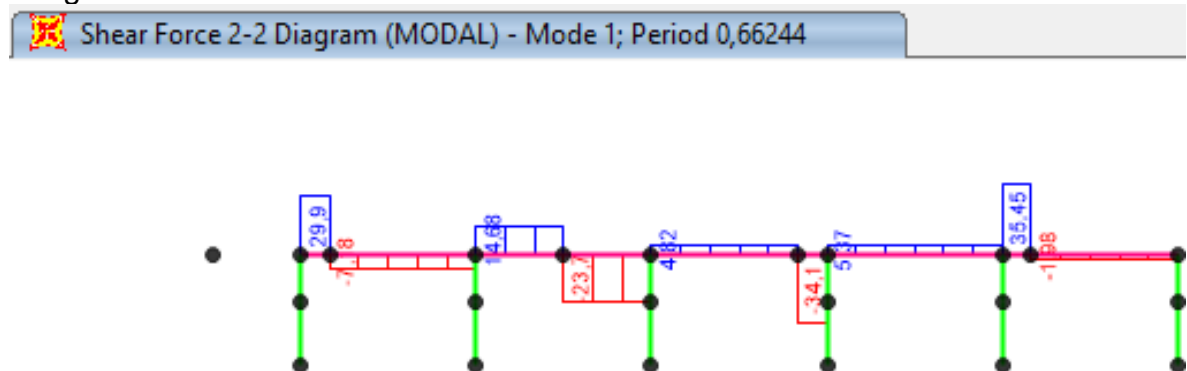
En cuanto al análisis de fuerzas internas se evaluaron aleatoriamente algunos modos observando gráficamente

Imagen 45. Diagrama de fuerzas internas modo 1 con sistema.



Fuente. León, Laura T., 2016.

Imagen 46. Fuerzas internas modo 1 Sin sistema de aislación.

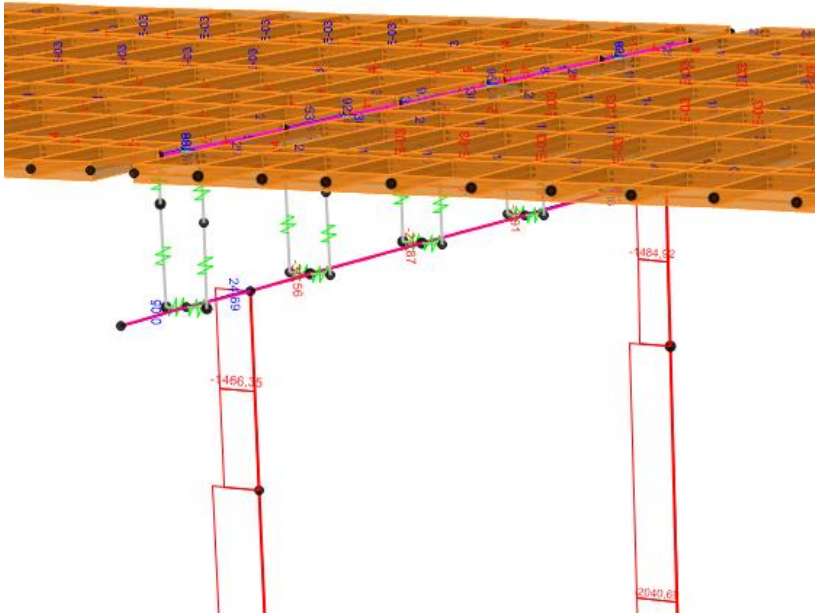


Fuente. León, Laura T., 2016.

Observando detalladamente el diagrama de la viga cabezal sobre la cual se apoya el sistema de la pila 1, la zona de unión entre el tablero ubicado sobre los apoyos

de neopreno muestran valores amplios tal como 35,45 kN máximo valor encontrado para el modo 1, mientras que el diagrama aplicando el sistema de control LRB, muestra valores tan bajos tal como 0.32 kN, lo cual demuestra inicialmente una reducción casi del 92% en las fuerzas internas simulando el primer modo, sin contar aún el déficit del periodo.

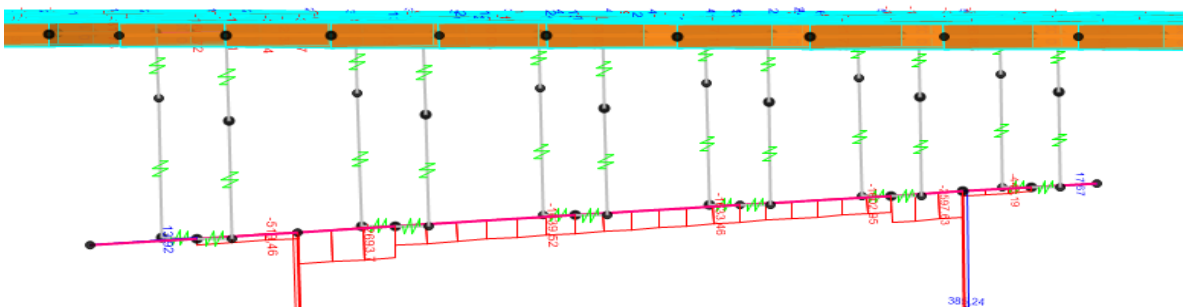
Imagen 47. Esquema general sobre modelo convencional modo 1.



Fuente. León, Laura T., 2016.

Ahora bien, pasando al modo 10 se realiza el mismo análisis buscando posible variación en los resultados, con miras a comprar si al avanzar los modos de vibración varié nuevamente.

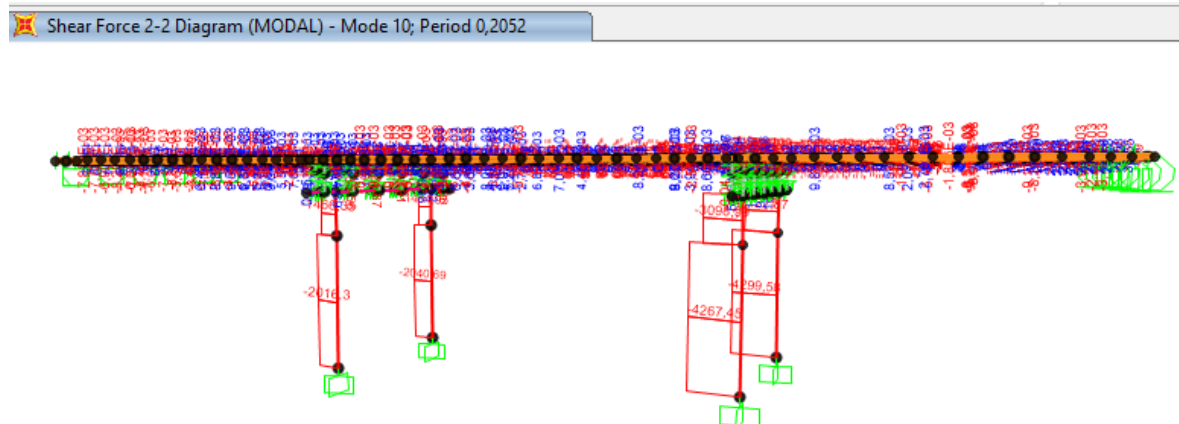
Imagen 48. Fuerza internas modo 10 Con sistema de control.



Fuente. León, Laura T., 2016.

Ahora bien, comparando las fuerzas en las dos secciones intermedias en las cuales se encuentran las pilas, se observan valores tan altos en el modelo convencional alrededor de 4299,56 kN lo cual representa alto desplazamiento lateral tal como lo sustenta las siguientes imágenes.

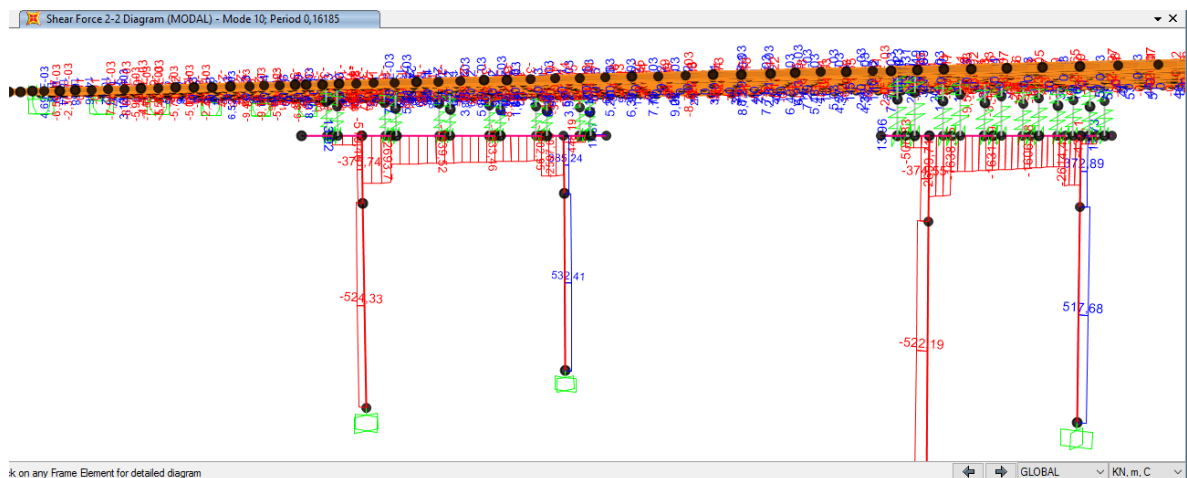
Imagen 49. Esquema general fuerzas internas sin sistema, modo 10 y diagrama de cortante.



Fuente. León, Laura T., 2016.

Empleando aislador y evaluando en el modo 10 se encuentra que se obtuvo un valor de 524,33 kN, considerablemente menor al modelo convencional

Imagen 50. Esquema general fuerzas internas con sistema modo 10.



Fuente. León, Laura T., 2016.

Una vez analizadas las fuerzas internas, se evaluaron los desplazamientos y los periodos extraídos del software, obteniendo los siguientes valores:

Tabla 2. Análisis modal, periodos y frecuencias SAP2000 modelo convencional.

TABLE: Modal Periods And Frequencies						
OutputCase	StepType	StepNum	Period	Frequency (hz)	CircFreq	Eigenvalue
Text	Text	Unitless	Sec	Cyc/sec	rad/sec	rad2/sec2
MODAL	Mode	1	0,662	1,5	9,5	90,0
MODAL	Mode	2	0,340	2,9	18,5	341,2
MODAL	Mode	3	0,303	3,3	20,7	429,5
MODAL	Mode	4	0,289	3,5	21,8	473,4
MODAL	Mode	5	0,289	3,5	21,8	473,4
MODAL	Mode	6	0,260	3,8	24,1	581,9
MODAL	Mode	7	0,257	3,9	24,5	597,9
MODAL	Mode	8	0,256	3,9	24,5	600,7
MODAL	Mode	9	0,210	4,8	29,9	896,0
MODAL	Mode	10	0,205	4,9	30,6	937,6
MODAL	Mode	11	0,166	6,0	37,9	1435,2
MODAL	Mode	12	0,166	6,0	37,9	1439,9
MODAL	Mode	13	0,165	6,1	38,1	1455,1
MODAL	Mode	14	0,162	6,2	38,9	1512,2
MODAL	Mode	15	0,098	10,2	64,0	4092,6
MODAL	Mode	16	0,096	10,4	65,2	4252,6
MODAL	Mode	17	0,090	11,1	69,6	4850,1
MODAL	Mode	18	0,090	11,1	69,6	4850,2
MODAL	Mode	19	0,086	11,6	72,7	5291,0
MODAL	Mode	20	0,086	11,7	73,3	5367,9
MODAL	Mode	21	0,085	11,8	74,3	5519,9
MODAL	Mode	22	0,083	12,1	75,9	5758,3
MODAL	Mode	23	0,079	12,6	79,2	6277,9
MODAL	Mode	24	0,073	13,7	86,1	7413,3
MODAL	Mode	25	0,073	13,7	86,2	7430,3
MODAL	Mode	26	0,072	13,9	87,5	7660,1
MODAL	Mode	27	0,072	13,9	87,5	7665,0
MODAL	Mode	28	0,068	14,6	91,9	8436,5
MODAL	Mode	29	0,067	15,0	94,2	8870,5
MODAL	Mode	30	0,067	15,0	94,4	8908,6
MODAL	Mode	31	0,058	17,1	107,7	11602,8
MODAL	Mode	32	0,058	17,1	107,7	11604,5
MODAL	Mode	33	0,057	17,5	109,7	12042,4
MODAL	Mode	34	0,056	17,7	111,4	12417,3
MODAL	Mode	35	0,056	17,7	111,4	12419,8
MODAL	Mode	36	0,055	18,1	113,4	12865,7
MODAL	Mode	37	0,054	18,5	116,0	13444,7
MODAL	Mode	38	0,050	20,1	126,3	15941,5
MODAL	Mode	39	0,050	20,1	126,3	15942,7
MODAL	Mode	40	0,045	22,1	138,9	19284,1
MODAL	Mode	41	0,045	22,4	141,0	19867,0
MODAL	Mode	42	0,044	22,5	141,4	19998,6
MODAL	Mode	43	0,044	22,7	142,8	20390,3
MODAL	Mode	44	0,042	23,8	149,5	22342,1
MODAL	Mode	45	0,041	24,3	152,9	23373,3
MODAL	Mode	46	0,041	24,3	152,9	23391,5
MODAL	Mode	47	0,040	25,1	157,6	24828,7
MODAL	Mode	48	0,040	25,1	157,6	24831,4
MODAL	Mode	49	0,039	25,5	160,5	25761,2
MODAL	Mode	50	0,039	25,6	161,1	25949,7

Fuente. León, Laura T., 2016.

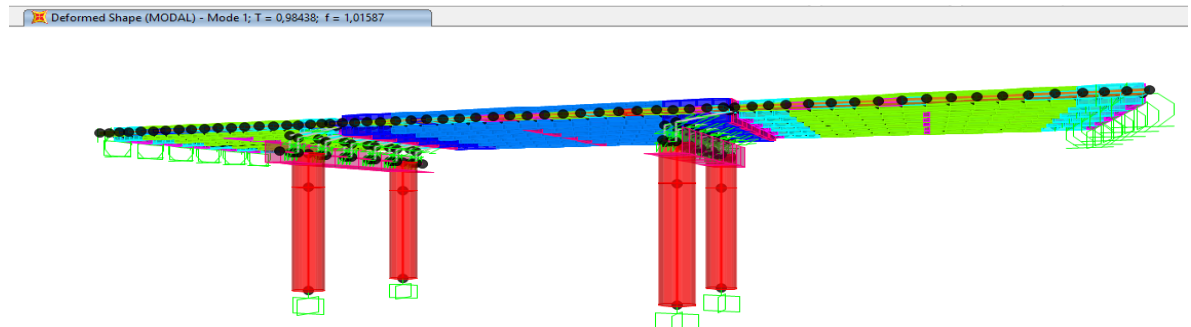
Tabla 3. Análisis modal, periodos y frecuencias SAP2000 modelo con LRB.

TABLE: Modal Periods And Frequencies						
OutputCase	StepType	StepNum	Period	Frequency	CircFreq	Eigenvalue
Text	Text	Unitless	Sec	Cyc/sec	rad/sec	rad2/sec2
MODAL	Mode	1	0,984	1,0	6,4	40,7
MODAL	Mode	2	0,293	3,4	21,4	458,9
MODAL	Mode	3	0,260	3,8	24,2	583,3
MODAL	Mode	4	0,230	4,3	27,3	743,1
MODAL	Mode	5	0,192	5,2	32,7	1072,1
MODAL	Mode	6	0,184	5,4	34,1	1164,8
MODAL	Mode	7	0,182	5,5	34,5	1190,8
MODAL	Mode	8	0,178	5,6	35,3	1245,7
MODAL	Mode	9	0,165	6,1	38,1	1454,1
MODAL	Mode	10	0,162	6,2	38,8	1507,2
MODAL	Mode	11	0,159	6,3	39,6	1567,8
MODAL	Mode	12	0,140	7,1	44,7	2000,1
MODAL	Mode	13	0,140	7,1	44,8	2010,7
MODAL	Mode	14	0,125	8,0	50,1	2511,4
MODAL	Mode	15	0,098	10,2	64,0	4097,5
MODAL	Mode	16	0,097	10,3	64,8	4197,3
MODAL	Mode	17	0,086	11,6	72,8	5300,7
MODAL	Mode	18	0,085	11,8	74,2	5507,8
MODAL	Mode	19	0,085	11,8	74,2	5509,8
MODAL	Mode	20	0,073	13,8	86,6	7495,7
MODAL	Mode	21	0,071	14,1	88,8	7879,1
MODAL	Mode	22	0,066	15,2	95,8	9173,2
MODAL	Mode	23	0,064	15,7	98,7	9740,7
MODAL	Mode	24	0,063	16,0	100,5	10096,8
MODAL	Mode	25	0,061	16,3	102,4	10494,5
MODAL	Mode	26	0,061	16,4	102,8	10566,5
MODAL	Mode	27	0,061	16,5	103,6	10742,1
MODAL	Mode	28	0,059	17,0	106,5	11348,3
MODAL	Mode	29	0,059	17,0	106,9	
MODAL	Mode	30	0,055	18,2	114,3	13067,4
MODAL	Mode	31	0,055	18,2	114,6	13121,7
MODAL	Mode	32	0,055	18,2	114,6	13123,6
MODAL	Mode	33	0,054	18,4	115,6	13370,1
MODAL	Mode	34	0,051	19,4	122,1	14896,3
MODAL	Mode	35	0,051	19,5	122,8	15083,0
MODAL	Mode	36	0,050	20,1	126,2	15933,3
MODAL	Mode	37	0,048	20,8	130,8	17101,6
MODAL	Mode	38	0,045	22,3	140,3	19670,6
MODAL	Mode	39	0,045	22,4	140,7	19798,5
MODAL	Mode	40	0,043	23,0	144,5	20875,6
MODAL	Mode	41	0,042	24,0	150,7	22704,2
MODAL	Mode	42	0,041	24,6	154,8	23960,8
MODAL	Mode	43	0,041	24,7	155,0	24015,8
MODAL	Mode	44	0,040	24,7	155,3	24104,4
MODAL	Mode	45	0,040	25,2	158,4	25075,2
MODAL	Mode	46	0,038	26,1	163,8	26823,5
MODAL	Mode	47	0,038	26,1	164,1	26941,7
MODAL	Mode	48	0,038	26,3	165,0	27236,8
MODAL	Mode	49	0,038	26,4	165,9	27524,6
MODAL	Mode	50	0,038	26,6	167,3	27985,9

Fuente. León, Laura T., 2016.

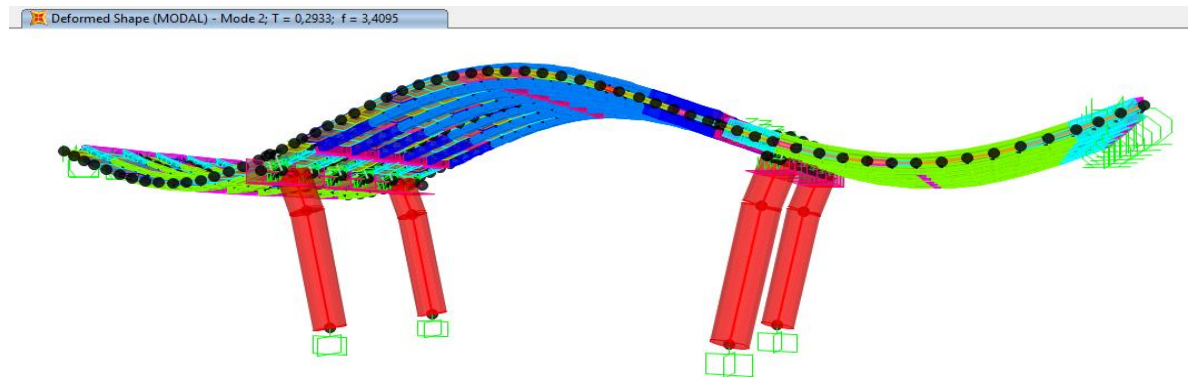
Al comparar detalladamente las tablas obtenidas gracias al software se identifican la ampliación de periodos al aplicar un sistema de control, es interesante observar los modos de vibración:

Imagen 51. Modo 1 con sistema de disipación.



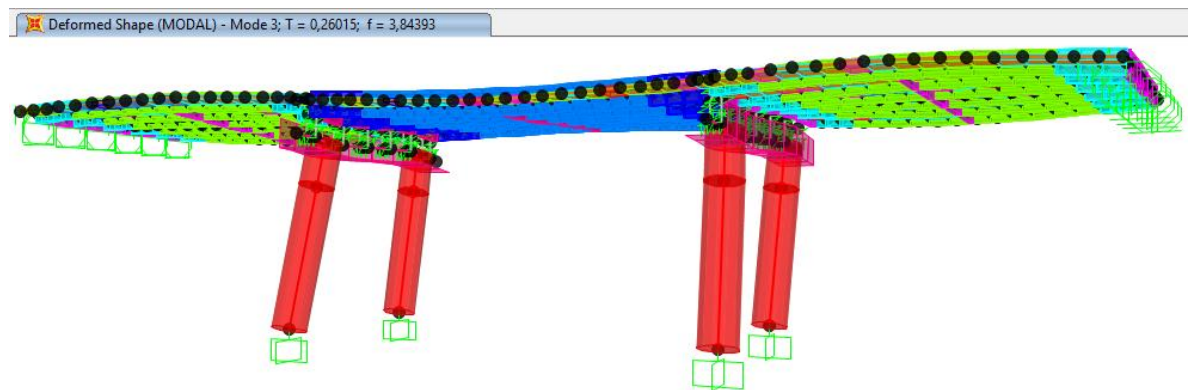
Fuente. León, Laura T., 2016.

Imagen 52. Modo 2 con sistema de disipación.



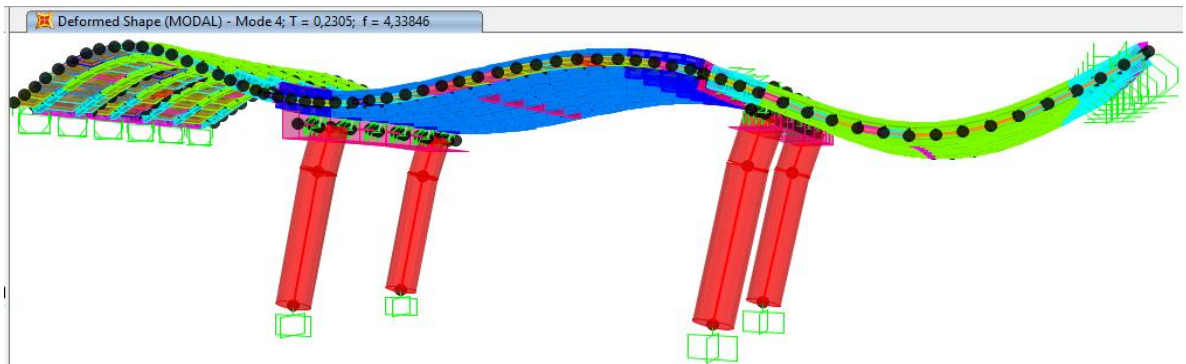
Fuente. León, Laura T., 2016.

Imagen 53. Modo 3 con sistema de disipación.



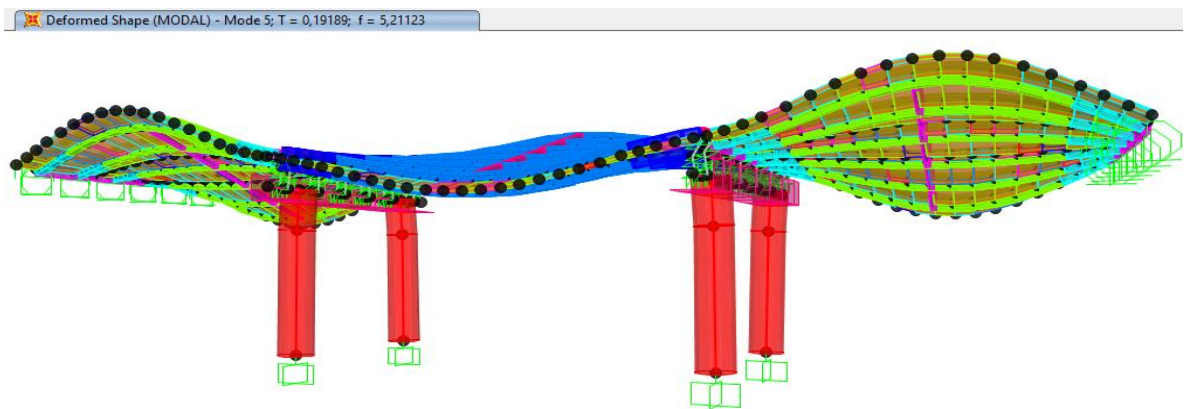
Fuente. León, Laura T., 2016.

Imagen 54. Modo 4 con sistema de disipación.



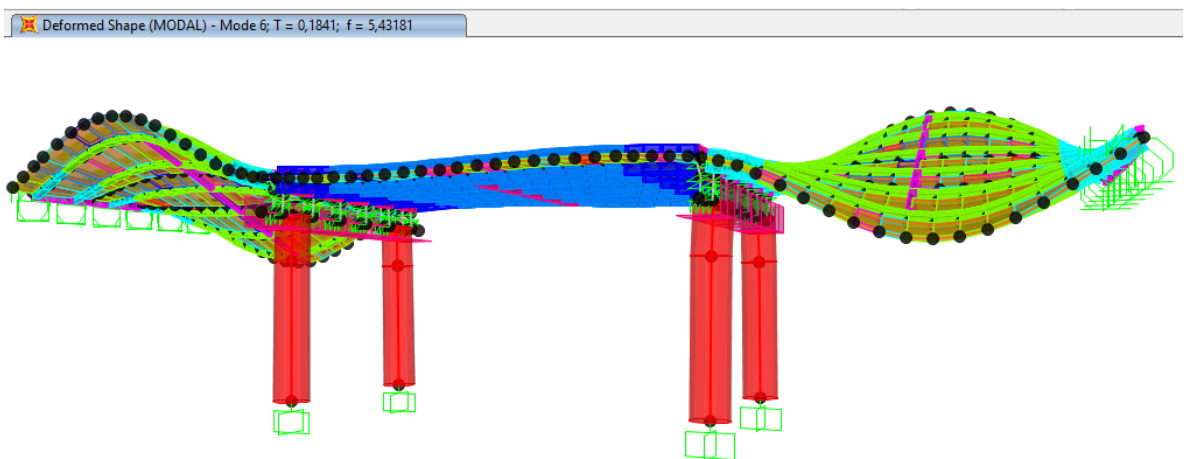
Fuente. León, Laura T., 2016.

Imagen 55. Modo 5 con sistema de disipación.



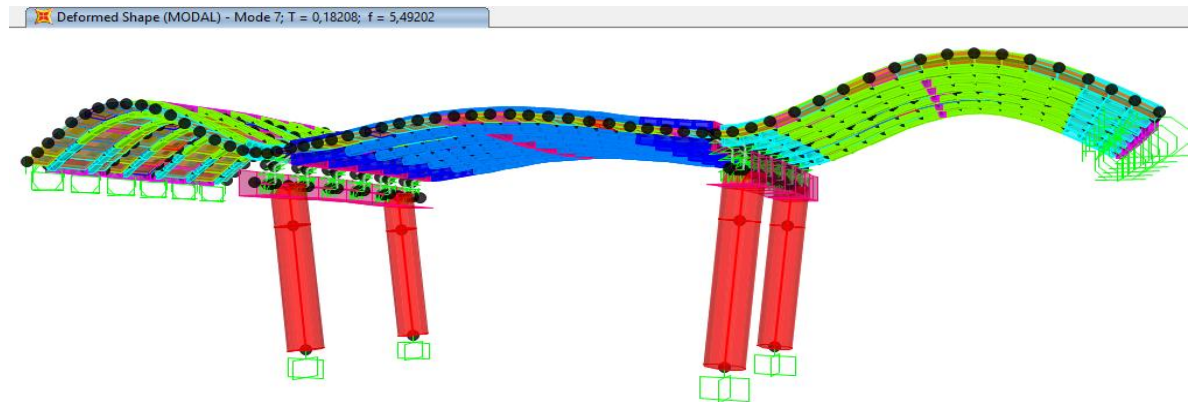
Fuente. León, Laura T., 2016.

Imagen 56. Modo 6 con sistema de disipación.



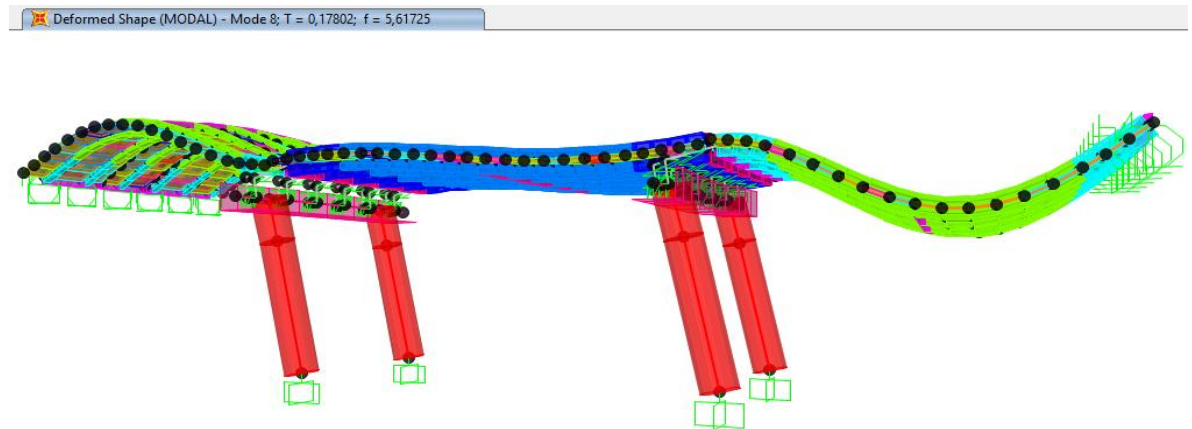
Fuente. León, Laura T., 2016.

Imagen 57. Modo 7 con sistema de disipación.



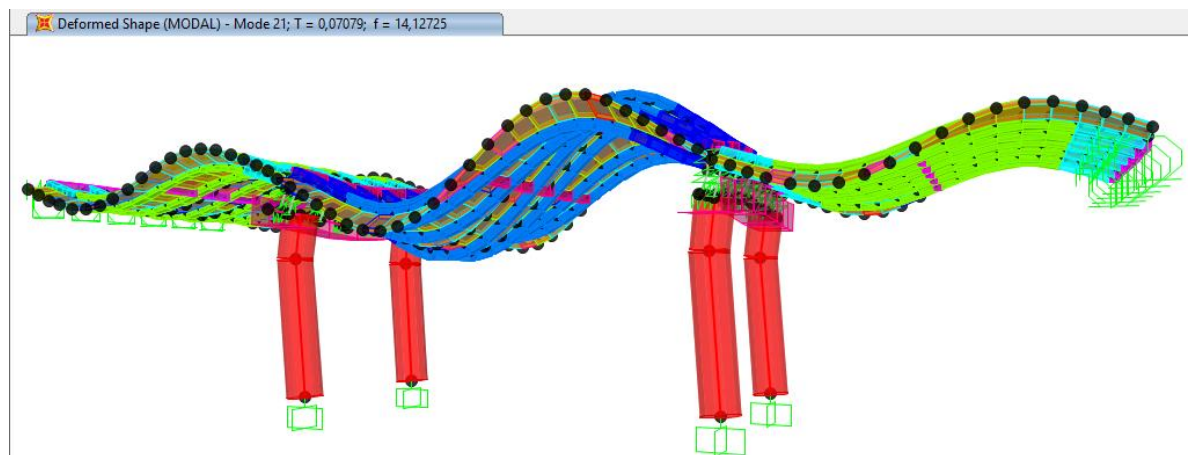
Fuente. León, Laura T., 2016.

Imagen 58. Modo 8 con sistema de disipación.



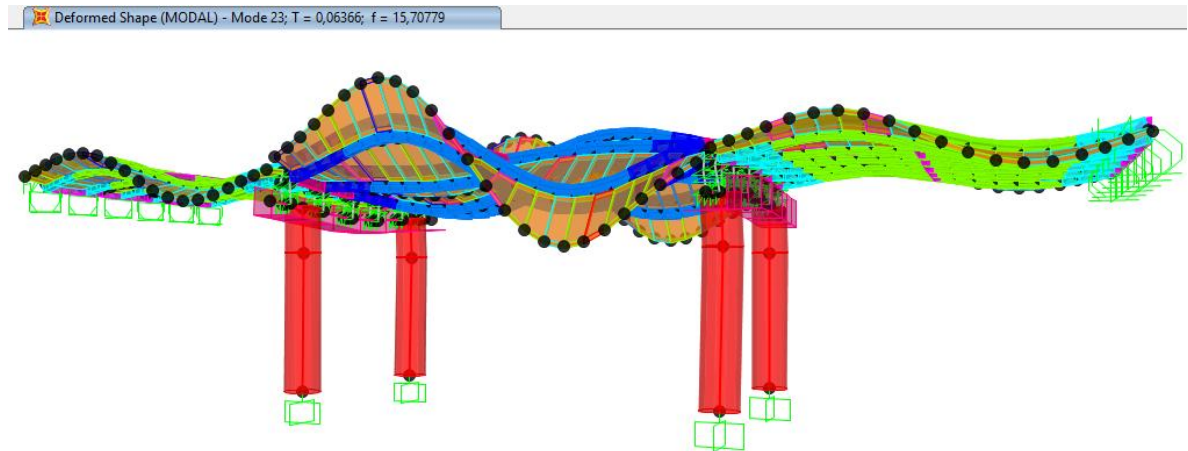
Fuente. León, Laura T., 2016.

Imagen 59. Modo 21 con sistema de disipación.



Fuente. León, Laura T., 2016.

Imagen 60. Modo 23 con sistema de disipación.

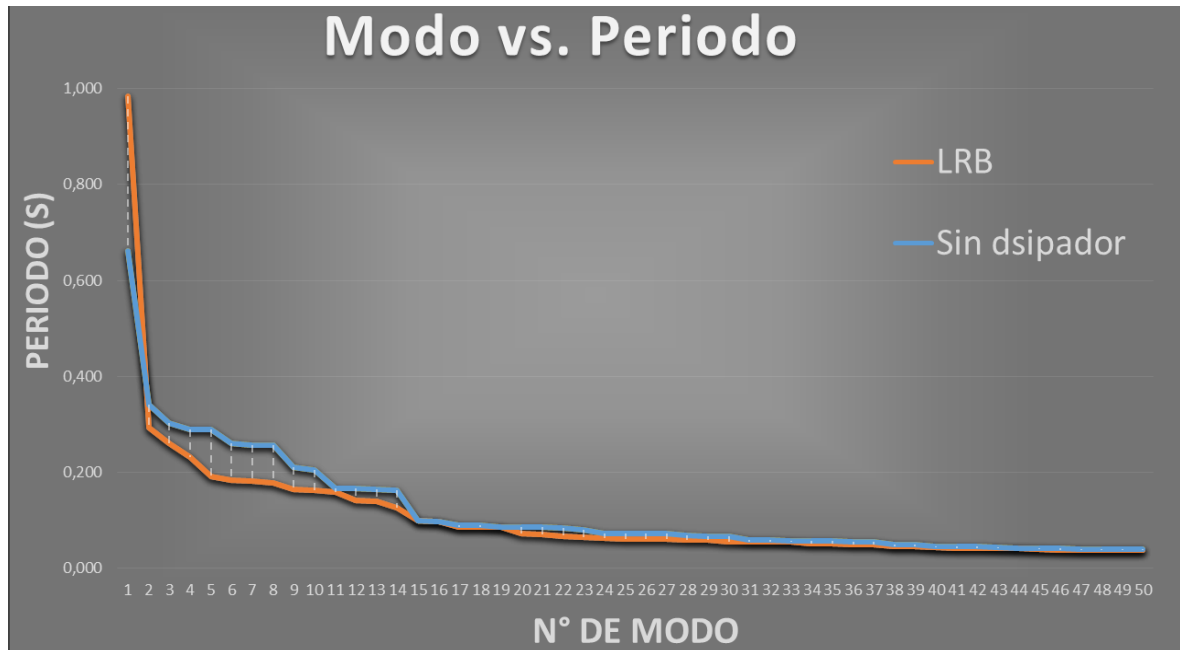


Fuente. León, Laura T., 2016.

Es interesante observar la secuencia de movimiento según sus modos de vibración, lo cual permite entender que se obtuvo resultados óptimos en cuanto al análisis, pero cada uno de los modos es diferente, por lo tanto los modelos matemáticos y dinámicos obtendrán resultados aleatorios, lo cual permite identificar la necesidad de evaluar en varias ocasiones, con diferentes tipos de puentes, geometrías, dimensiones siempre y cuando no salgan de los lineamientos del CCP-14 o de la NSR-10 según sea el caso.

Para comprender de modo más fácil se realizaron gráficas para comparar los resultados obtenidos en el análisis modal, según los 50 modos de vibración que se evaluaron en el modelo convencional además del aislado, la primera de ellas compara los periodos obtenidos en el modelo convencional y el modelo aplicando LRB, observando el primer modo al aplicar este sistema pues es quien absorbe la condición más crítica, es decir el impacto en que recibe la energía del sismo.

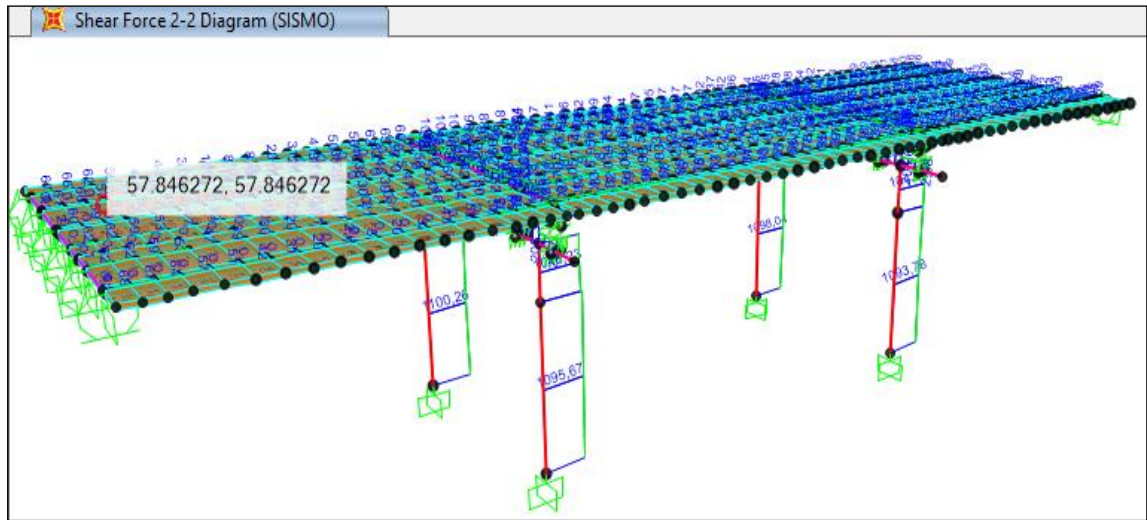
Imagen 61. Comparación periodos obtenidos sin aislación y aplicando LRB.



Fuente. León, Laura T., Bogotá, 2016.

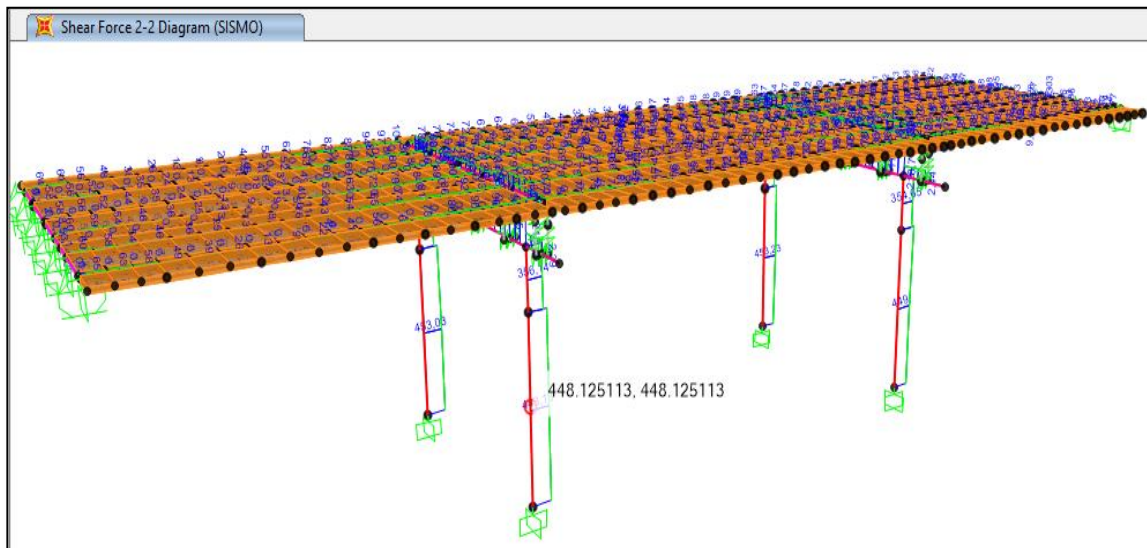
Entre el modo 2 y 15 aproximadamente, se observa que el aislador ya cumplió su función de recopilar la mayor parte de la energía en el modo 1, por lo tanto procede a disminuir su periodo en este rango para luego estabilizar la estructura al mínimo valor posible encontrado en los últimos modos de vibración. Mientras que, el modelo convencional presenta menor periodo inicial, manteniendo casi el mismo nivel durante el evento sísmico, lo cual simboliza mayor riesgo durante la primera y más peligrosa fase del sismo ya que transfiere inmediatamente la energía del sismo proveniente de la infraestructura, afectando directamente la superestructura.

Imagen 62. Cortante en pilas modelo convencional.



Fuente. León, Laura T., 2016.

Imagen 63. Cortante en pilas modelo con LRB.

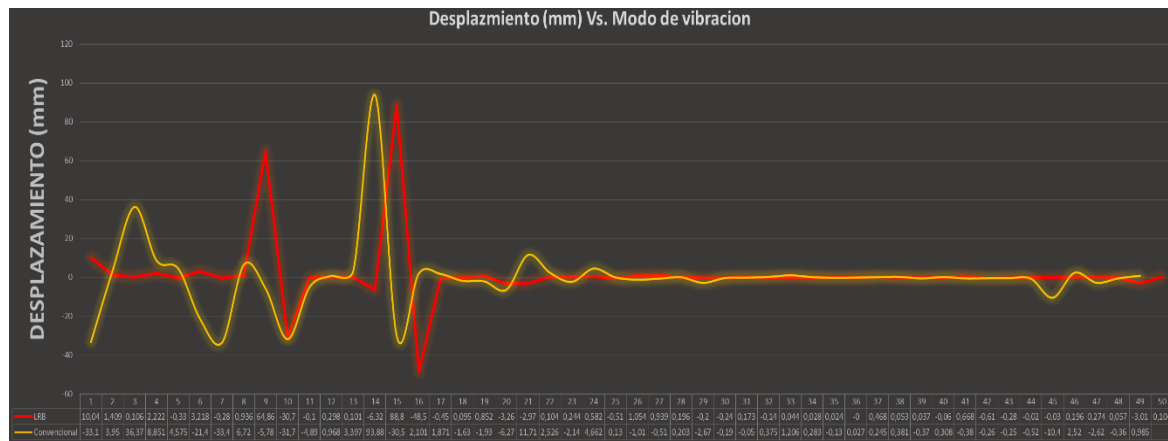


Fuente. León, Laura T., 2016.

Otra manera de identificar el comportamiento del aislador, es comparando los desplazamientos tomados en un punto aleatorio entre el apoyo y el tablero, identificando consigo que en los primeros modos el aislador actúa recibiendo la principal parte de la energía proveniente del sismo para luego estabilizar la estructura según la línea de color rojo (Imagen 62), mientras que el neopreno común en el modelo sin control sísmico, no tiene la capacidad de absorber, sino a

contrario resulta afectado justo en los primeros modos según línea amarilla (Imagen 62), identificando claramente su baja capacidad de respuesta ante eventualidades que generen inseguridad para la estructura, primordialmente los usuarios. Confirmando así la ventaja de usar disipadores y aisladores sísmicos, en este caso un neopreno común con núcleo de plomo.

Imagen 64. Desplazamientos vs. Modos de vibración.



Fuente. León, Laura T., 2016.

Teniendo en cuenta que en cada oscilación se redujo un 25% aproximadamente del periodo inmediatamente anterior, disminuyendo la amplitud de onda y la frecuencia entre oscilaciones. Para demostrar la respuesta sísmica ante la implementación del aislador se evaluó el porcentaje de masa acumulado obtenido al evaluar el sismo. Encontrando que en la dirección X, el modo 1 participa casi con un 75% de la masa total del puente y termina en 95,2% siendo la dirección con mejor respuesta, mientras que en los ejes Y, Z no representan avance, sin embargo en el tercer modo, el eje Y participa casi con el 59% de la masa total manteniéndose constante hasta el modo 50 lo cual es bueno pero lo recomendado es que llegara alrededor del 95%, no obstante en la dirección Z que si bien no es tan relevante en el análisis puesto que lo primordial es controlar el desplazamiento en la dirección longitudinal y transversal, esta finaliza en 64,8% siendo un valor significativo. Ver Tabla 3.

Adicionalmente, se evaluó el porcentaje de participación de masa durante un evento sísmico, resumido por medio de la Tabla 4.

Tabla 4. Resumen porcentaje de participación de masa en sismo.

Output Case	StepType Text	StepNum Unitless	Period sec	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless	SumUX Unitless	SumUY Unitless	SumUZ Unitless
MODAL	Mode	1	0,9844	0,75459	9,77E-19	3,79E-19	0,75459	9,77E-19	3,79E-19
MODAL	Mode	2	0,2933	1,87E-05	1,28E-06	0,00048	0,75461	1,28E-06	0,00048
MODAL	Mode	3	0,2602	1,80E-09	0,59216	1,13E-06	0,75461	0,59216	0,00048
MODAL	Mode	4	0,2305	0,09672	2,04E-08	4,27E-07	0,85133	0,59216	0,00048
MODAL	Mode	5	0,1919	1,95E-08	0,00114	2,48E-05	0,85133	0,59329	0,00051
MODAL	Mode	6	0,1841	3,92E-05	3,26E-09	6,06E-06	0,85137	0,59329	0,00051
MODAL	Mode	7	0,1821	0,00037	2,55E-07	0,33737	0,85174	0,59329	0,33788
MODAL	Mode	8	0,1780	0,09129	9,42E-10	0,00281	0,94303	0,59329	0,34069
MODAL	Mode	9	0,1648	3,75E-07	5,59E-05	8,22E-05	0,94303	0,59335	0,34077
MODAL	Mode	10	0,1618	2,35E-06	4,27E-09	1,09E-07	0,94304	0,59335	0,34077
MODAL	Mode	11	0,1587	0,00017	1,64E-08	0,11986	0,9432	0,59335	0,46063
MODAL	Mode	12	0,1405	8,11E-07	1,21E-08	0,00237	0,9432	0,59335	0,46301
MODAL	Mode	13	0,1401	0,00017	3,26E-13	4,71E-06	0,94337	0,59335	0,46301
MODAL	Mode	14	0,1254	3,52E-07	7,72E-07	0,00034	0,94337	0,59335	0,46335
MODAL	Mode	15	0,0982	2,55E-05	7,08E-05	8,62E-08	0,9434	0,59342	0,46335
MODAL	Mode	16	0,0970	4,27E-06	0,00024	1,99E-07	0,9434	0,59366	0,46335
MODAL	Mode	17	0,0863	9,16E-12	0,00114	6,72E-09	0,9434	0,59481	0,46335
MODAL	Mode	18	0,0847	5,45E-10	1,27E-05	4,38E-06	0,9434	0,59482	0,46335
MODAL	Mode	19	0,0846	9,79E-08	1,21E-07	3,90E-08	0,9434	0,59482	0,46335
MODAL	Mode	20	0,0726	3,84E-09	3,34E-05	2,11E-06	0,9434	0,59485	0,46336
MODAL	Mode	21	0,0708	0,00771	1,51E-10	2,86E-05	0,95111	0,59485	0,46338
MODAL	Mode	22	0,0656	4,25E-06	7,25E-11	4,86E-10	0,95111	0,59485	0,46338
MODAL	Mode	23	0,0637	0,0005	6,66E-11	1,81E-05	0,95161	0,59485	0,4634
MODAL	Mode	24	0,0625	4,86E-07	1,70E-09	0,01473	0,95161	0,59485	0,47813
MODAL	Mode	25	0,0613	3,64E-08	4,90E-06	0,00012	0,95161	0,59486	0,47825
MODAL	Mode	26	0,0611	2,86E-05	4,60E-09	2,89E-05	0,95164	0,59486	0,47828
MODAL	Mode	27	0,0606	9,47E-07	5,13E-09	4,26E-07	0,95164	0,59486	0,47828
MODAL	Mode	28	0,0590	8,40E-06	2,10E-09	0,00236	0,95165	0,59486	0,48064
MODAL	Mode	29	0,0588	1,06E-05	2,49E-09	0,0025	0,95166	0,59486	0,48314
MODAL	Mode	30	0,0550	6,54E-06	3,87E-08	1,67E-07	0,95167	0,59486	0,48314
MODAL	Mode	31	0,0549	2,00E-07	4,01E-10	5,68E-05	0,95167	0,59486	0,4832
MODAL	Mode	32	0,0548	1,65E-07	8,73E-10	8,21E-05	0,95167	0,59486	0,48328
MODAL	Mode	33	0,0543	5,72E-06	1,89E-12	3,43E-11	0,95167	0,59486	0,48328
MODAL	Mode	34	0,0515	8,59E-10	2,14E-05	3,65E-05	0,95167	0,59488	0,48332
MODAL	Mode	35	0,0512	2,18E-07	1,65E-08	9,49E-08	0,95167	0,59488	0,48332
MODAL	Mode	36	0,0498	9,97E-09	1,15E-08	0,00175	0,95167	0,59488	0,48507
MODAL	Mode	37	0,0480	0,00022	3,85E-10	4,25E-06	0,95189	0,59488	0,48507
MODAL	Mode	38	0,0448	2,49E-07	8,96E-09	0,01068	0,95189	0,59488	0,49575
MODAL	Mode	39	0,0447	1,87E-06	1,47E-12	2,04E-05	0,9519	0,59488	0,49578
MODAL	Mode	40	0,0435	3,08E-06	4,97E-07	0,10717	0,9519	0,59488	0,60295
MODAL	Mode	41	0,0417	1,95E-08	0,00021	5,68E-06	0,9519	0,59509	0,60295
MODAL	Mode	42	0,0406	2,00E-07	2,91E-05	0,00553	0,9519	0,59512	0,60848
MODAL	Mode	43	0,0405	1,22E-07	4,86E-08	5,93E-05	0,9519	0,59512	0,60854
MODAL	Mode	44	0,0405	4,00E-07	4,40E-07	0,01374	0,9519	0,59512	0,62228
MODAL	Mode	45	0,0397	6,80E-05	2,04E-08	3,23E-05	0,95197	0,59512	0,62232
MODAL	Mode	46	0,0384	0,00043	1,06E-05	0,00126	0,95239	0,59513	0,62358
MODAL	Mode	47	0,0383	5,29E-06	0,00056	0,00122	0,9524	0,5957	0,6248
MODAL	Mode	48	0,0381	1,69E-05	1,78E-07	0,00017	0,95242	0,5957	0,62497
MODAL	Mode	49	0,0379	2,71E-06	1,28E-05	7,65E-05	0,95242	0,59571	0,62505
MODAL	Mode	50	0,0376	0,0001	5,35E-05	0,02351	0,95252	0,59576	0,64856

Fuente. León, Laura T., 2016.

10. CONCLUSIONES

Es notorio el efecto al aplicar un sistema de disipación de energía al modelo de puente vehicular, pues si bien es cierto por medio del análisis se identificó reducción en sus fuerzas internas y desplazamientos obteniendo una estructura más estable durante la simulación por medio de análisis modal, de un evento sísmico para la ciudad de Pereira. Logrando así, confirmar que el uso de estos sistemas disminuye considerablemente los tiempos entre una oscilación y otra tal como se identificó en la comparación de periodos pues en el modo 1 del modelo con aislador, el periodo se incrementó casi en 35% a comparación del modelo convencional, obteniendo 0.9844 s^{-1} con aislador, mientras que el convencional presento un periodo de 0.6624 s^{-1} lo cual demuestra que al aumentar considerablemente en el modelo aislado, logra brindar condiciones de seguridad y estabilidad mayores comparadas al modelo convencional, teniendo en cuenta que la frecuencia disminuyo a medida que el periodo aumento. Adicionalmente se observó que las pilas presentan menor desplazamiento al implementar el sistema de control, teniendo en cuenta lo evaluado en el modo 10 obteniendo valores máximos de 524,33 kN reduciendo consigo un 92% aproximadamente respecto al modelo convencional, lo cual afirma la viabilidad del uso de nuevas tecnologías de protección sísmica.

Recordando así, la capacidad de disipación de energía del aislador elastómero empleado al 25%, que en cada oscilación se retuvo aproximadamente el 25% en cada una, es decir que dejó una parte de la energía en cada vibración mecánica, confirmando así el concepto del amortiguamiento, ya que la energía absorbida por el neopreno quien se deforma lateralmente durante el sismo, pero se controla por medio del núcleo de plomo ingresando deformaciones plásticas, permite disipar la energía en forma de calor. Por lo tanto los valores obtenidos demuestran reducción considerable de esfuerzos al conseguir que gran parte del sismo sea disipado antes de llegar directamente a la superestructura, tal como se observó durante en las gráficas anteriores.

Se identificaron reducciones considerables al evaluar fuerzas internas y cortantes en la base de las pilas ya que en el modelo convencional al aplicar el sismo, se observan valores entre 1093 kN y 1095.7 kN, mientras que al aplicar el sistema de control sísmico se observa una importante reducción de cortante en base con valores de 448.1 kN y 453,3 kN máximo, obteniendo mayor estabilidad estructural

tal como se contempló por medio de graficas que ayudaron a comprender con mayor facilidad los resultados obtenidos, que finalmente fueron óptimos. Concluyendo así que el uso del sistema de control pasivo usado en el modelo diseñado demuestra mejor comportamiento ante la simulación del sismo por medio del espectro de aceleraciones, comprobando finalmente las ventajas que podría representar especialmente en ciudades de alta vulnerabilidad, tal como se simuló para la ciudad de Pereira.

11. RECOMENDACIONES

Ya que se demostró algunas de las ventajas respecto a técnicas de control de respuesta sísmica, se recomienda realizar investigaciones en la interacción suelo-estructura implementando diversos sistemas de control tal como activos o pasivos, como disipadores de energía tipo visco elásticos, además de considerar cambio de geometría en secciones de vigas, incluso indagar su comportamiento empleando amortiguadores en estructuras metálicas.

12. BIBLIOGRAFIA

- AGOM International SRL. (2016).** E-Safe seismic isolators . *Seismic isolators-LRB*. Italy.
- Amaya, N. M. (2003).** *Universidad del Norte*. Recuperado el 07 de Jun de 2016, de Sistemas de control pasivos y activos de aislamiento de base para edificación sometidos a acciones sísmicas. : <http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/viewFile/2377/1541>
- Caribe-CEPAL, B. I. (2006).**
- Casas., D. J. (2002).** Criterios de diseño sísmico de puentes. Barcelona.
- CCP-14. (2014).** *Codigo Colombiano de Diseño de Puentes. CCP-14*. Asociacion Colombiana de Ingenieria Sismica-AIS.
- Colombia, H. s. (1975).** *Historia sismica de los terremotos en Colombia*. Recuperado el 18 de 05 de 2016, de <http://acontecimientos2012.latinforo.net/t4904-historia-sismica-de-colombia>
- COLOMBIA, R. S. (2016).** *SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO*. Recuperado el 01 de 07 de 2016, de <http://seisan.sgc.gov.co/RSNC/index.php/material-educativo/conceptos-basicos>
- Daniela Maldonado. (Mayo de 2009).** *Construccion sismoresistente*. Obtenido de <http://www.fiiic.la/LXV%20CONSEJO%20DIRECTIVO%20PANAMA/DELLAL LERA1.pdf>
- Davila, A. A. (03 de May de 2008).** *Microzonificacion sismica*. Obtenido de Pereira: <http://www.col.ops-oms.org/desastres/docs/pereira/06espectro.htm>
- Davila, A. A. (27 de 01 de 2016).** *Microzonificacion sismica de Pereira, Dosquebradas y Santa Rosa*. Obtenido de <http://www.col.ops-oms.org/desastres/docs/pereira/01presentacion.htm>
- Dr. Genner Villarreal Castro, M. R. (2008).** *Edificaciones con disipadores de energia*. Lima: ANR.

- Freddy Duran, P. (27 de Mayo de 2015).** *Colegio de Ingenieros del Perú.* Recuperado el 2016 de Jun de 01, de Implementacion de aisladores sismicos y disipadores de energia en Puentes de Japon.: http://www.cip.org.pe/Cvista/publicaciones/enlaces/Implementacion_de_aisladores_sismicos_y_disipadores_de_energia_en_puentes_de_japon.pdf
- GRISA, G. R. (2015).** *Memoria descriptiva Viaductos la Estampilla.* Recuperado el 09 de 06 de 2016, de GRISACOL.
- Juan Andrés Oviedo, M. d. (Jun de 2010).** *SciELO Colombia.* Recuperado el 16 de Abr de 04, de SITUACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE CONTROL DE RESPUESTA SÍSMICA EN COLOMBIA: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372009000200009
- Karavasilis T., D. A. (2012).** *Seismic Design and Evaluation of a Minimal-damage Steel Frame Equipped with Steel Yielding Devices and Viscous Dampers. 15 World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal.* Obtenido de Scielo: http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_0631.pdf
- Kelly, J. C. Simo and J. M. (1978).** "The Analysis of Multilayer Elastomeric Bearings". *Vol. 51(2).*
- Leocadio Rico Pradilla, G. C. (28 de Agosto de 2012).** *Uso de aisladores de base en puentes de concreto simplemente apoyados.* Recuperado el 16 de 05 de 2016, de Scielo: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-921X2012000400009&lng=es&nrm=iso
- Luis Enrique Garcia. (1998).** *Dinamica estructural aplicada a diseño sismico.* Republica Dominicana: Universidad de los Andes.
- NSR-10. (2010).** Titulo A. En V. y. Ministerio de Ambiente, *Reglamento Colombiano de Construccion Sismoresistente.* Bogota.
- Oviedo J., D. M. (2009).** Disipadores histeréticos metálicos como técnica de control de respuesta sísmica en edificaciones colombianas. *Revista EIA,* 51-63.

- Patiño, J. C. (Noviembre de 2007).** *Blog 360 grados en concreto*. Recuperado el 2016, de ARGOS: <http://blog.360gradosenconcreto.com/dispositivos-de-control-de-respuesta-sismica-para-estructuras-en-concreto/>
- Priestley, M., Seible, F., & Calvi, G. M. (1996).** *Seismic Desing And Retrofit of Bridges*. New York, United States of America: Jhon Wiley & Sons.
- R. I. Skinner, J. M. (1975).** *Hysteretic Dampers for Earthquake-Resistant Structures*. 3(3), pp. 593-604.
- REP2004, R. d. (12 de Noviembre de 2004).** *Reglamento Estructural Panameño. REP2004*, pág. 93.
- Sato, K. y. (1996).** "Kobe: ¿un desastre no anunciado?". *Desastres y Sociedad N°6;* "Kobe resurge de sus cenizas" .
- Sociedad Mexicana de Ingenieria Sismica. (2003).** Recuperado el 2016 de Jun de 28, de <http://www.smis.org.mx/htm/sm5.htm>
- V. A. Zayas, S. S. (1990).** *A simple pendulum technique for achieving seismic isolation*. Vol. 6(pp. 317-334). Recuperado el 11 de Jun de 2016