

**EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DE AISLADORES SÍSMICOS EN UN
MODELO A ESCALA DEL PUENTE DE LA CALLE 26 CON CARRERA 5.**

JOJAN HERNANDO GALINDO RUIZ

SEBASTIAN VALERO FLOREZ



UNIVERSIDAD
La Gran Colombia

UNIVERSIDAD LA GRANCOLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

ESTRUCTURAS

BOGOTÁ D.C

2016

**EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DE AISLADORES SÍSMICOS EN UN
MODELO A ESCALA DEL PUENTE DE LA CALLE 26 CON CARRERA 5.**

JOJAN HERNANDO GALINDO RUIZ

SEBASTIAN VALERO FLOREZ

**Proyecto de grado en modalidad de investigación para optar el título de
ingeniero civil**

Asesor disciplinar

Msc Eps. Ingeniero civil Julio Oswaldo Torres Suarez

Asesor metodológico

I.C. Roy Waldhiersen Morales Pérez

UNIVERSIDAD LA GRANCOLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

ESTRUCTURAS

BOGOTÁ D.C

2016

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
2. JUSTIFICACIÓN	14
3. OBJETIVOS	15
3.1 OBJETIVO GENERAL	15
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
4. ANTECEDENTES	16
5. MARCO DE REFERENCIA.....	18
5.1 MARCO CONCEPTUAL	18
5.1.1 Puentes	18
5.1.1.1 Tipos de puentes	18
5.1.2 Carga Sísmica.....	19
5.1.2.1 Análisis de Fuerza Horizontal Equivalente.	20
5.1.2.2 Análisis Dinámico	20
5.1.3 Aislamiento sísmico.....	21
5.1.4 Tipos de aisladores sísmicos	22
5.1.4.1 Aisladores elastómericos de alto amortiguamiento (HDRB).	22
5.1.4.2 Aisladores elastómericos con núcleo de plomo (LBR).....	22
5.1.4.3 Sistema de péndulo de fricción (FPS).	24
5.1.5 SAP2000 (Structural Analysis Program)	25
5.1.6 Desplazamientos.....	26
5.1.6.1 Desplazamientos Laterales Mínimos	26
5.1.6.2. El Desplazamiento Máximo	27
5.1.6.3. El período efectivo para el desplazamiento máximo:.....	27
5.1.6.4 Desplazamientos totales de diseño.....	28
5.1.6.5 Elementos Estructurales.....	29
5.1.6.6. Elementos Estructurales Sobre el Sistema de Aislación.	29
5.1.7 Factores a escala.....	30

5.1.7.1 Estructuras Sujetas a Cargas Dinámicas	33
5.1.8. Modelamiento Dinámico de las Estructuras de Ensayo	34
5.2 MARCO GEOGRÁFICO	35
5.2.1 Ubicación	35
5.2.2 microzonificación de Bogotá	36
5.3 MARCO LEGAL	38
5.3.1 Código Colombiano Diseño Sísmico de Puentes – 95	38
6. DISEÑO METODOLÓGICO	39
6.1 ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN	39
6.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN	39
6.3 FASES DE LA INVESTIGACIÓN	39
6.3.1 Fase I	39
6.3.2 Fase II	40
6.3.3 Fase III	40
7. RESULTADOS Y ANALISIS	41
7.1 Modelación del puente en SAP 2000	41
7.1.1. Calculo de aisladores	50
7.1.2 Pre dimensionamiento del diámetro del aislador	56
7.1.3. Pre dimensionamiento núcleo de plomo	56
7.1.4. Características - propiedades mecánicas finales aislador	58
7.1.5 Determinación y resumen de las propiedades del aislador	60
7.1.6. Cálculo de propiedades del neopreno – estribos	65
7.1.7 Ingreso de datos aisladores sísmicos y apoyo de neopreno al programa SAP 2000.	69
7.1.7.1 Apoyo neopreno tipo resorte	70
7.1.7.2 Apoyo aislador sísmico	71
7.2 DISEÑO DE MODELO A ESCALA	75
7.2.1. Datos iniciales de la estructura prototipo	75
7.2.2. Fenómeno físico a estudiar	77
7.2.3. Características del equipo a emplear	78

7.2.3.1 Mesa vibratoria	78
7.2.3.2. Deformímetros	79
7.2.4. Identificación de las magnitudes físicas (que intervienen en el fenómeno físico a estudiar).....	79
7.2.4.1. Determinación magnitudes del modelo a escala	80
7.2.5. Predimensionamiento Del Puente	82
7.2.6 Construcción del modelo.....	87
7.2.6.1 Materiales	87
7.2.6.2. Herramientas y equipo.....	87
7.2.6.3. Proceso constructivo	88
7.2.6.4. Ensamblaje de los elementos estructurales	89
7.2.6.5. Montaje del modelo y desarrollo experimentación.....	91
7.2.6.6. Montaje del modelo a la mesa vibratoria	94
7.3. RESULTADOS DESPLAZAMIENTOS, PERIODOS, ACELERACIONES DE LOS MODELOS EN SAP2000 Y CON LA MESA VIBRATORIA.	96
7.3.1. Periodos fundamentales de la estructura- modelo escala.....	97
7.3.2. Aceleración Absoluta.....	99
7.3.3. Link (aisladores) desplazamientos- modelo a escala.....	103
7.3.4. Link (aisladores) desplazamientos- modelo real	106
7.3.5. Desplazamientos totales	108
7.3.6. Modelo a escala	110
8. CONCLUSIONES	115
9. RECOMENDACIONES	116
10. BIBLIOGRAFÍA	117
11. ANEXOS N° 1	120
PLANOS IDU.....	120

FIGURAS

Figura 1. Aisladores elastómericos de alto amortiguamiento (HDRB).....	22
Figura 2. Aisladores elastómericos con núcleo de plomo (LBR).	24
Figura 3. Sistema de péndulo de fricción (FPS).	24
Figura 4: intersección de la carretera 5 y la calle 26 de norte-oriente	35
Figura 5. Mapa de microzonificación sísmica de Bogotá.....	36
Figura 6. Espectro de respuesta y diseño utilizado por el IDU	37
Figura 7. Tabla resumen de bridge wizard.	41
Figura 8. Selección de diseño	42
Figura 9. Línea base.....	42
Figura 10. Radio y longitud de curvatura.....	43
Figura 11. Introducir radio.....	43
Figura 12. Definir materiales.....	44
Figura 13. Propiedades de pilas y estribos.....	44
Figura 14. Crear materiales	45
Figura 15. Creación de estribos.....	45
Figura 16. Selección de viga	46
Figura 17. Tipo de estribo.....	46
Figura 18. Posición de pilas.....	47
Figura 19. Definir carriles.....	47
Figura 20. Agregar camión.	48
Figura 21. Insertar espectro.....	48
Figura 22. Definir el peso propio.....	49
Figura 23. Casos de carga.	49
Figura 24. Correr el modelo.....	50
Figura 25. Modelo terminado.....	50
Figura 26. Resultados de SAP.	51
Figura 27. Resultados de SAP 2.	51
Figura 28. Centroide del puente.	52
Figura 29. Pesos (w)	52
Figura 30. Espectro $t=1$ y $SD=0,4g$	53
Figura 31. Ingreso de propiedades del aislador y neopreno.....	69
Figura 32. Características y propiedades mecánicas del sistema de aislación. ...	69
Figura 33. Datos del neopreno.	70
Figura 34. Direcciones en las que trabaja el neopreno	70
Figura 35. Tipo de análisis en los apoyos.	71

Figura 36. Tipo de análisis.....	72
Figura 37. Asignar los elementos a las pilas.	73
Figura 38. Condiciones del tipo de apoyo.	74
Figura 39. Ingreso de link y selección del apoyo.	74
Figura 40. Estructura pila norte	75
Figura 41. Estructura pila sur.....	76
Figura 42. Modelo de montaje de mesa vibratoria y modelo a escala.....	77
Figura 43. Mesa vibratoria.....	78
Figura 44. Deformimetro.....	79
Figura 45. Sección típica transversal del puente	82
Figura 46. Definición de geometría sección pilas y su corte.....	88
Figura 47. Corte de sección frontal elemento tipo pila.....	88
Figura 48. Ensamble estructura pila	89
Figura 49. Unión pieza soporte pila	90
Figura 50. Terminación ensamblaje pila norte.....	90
Figura 51. Ensamble cajón puente.	91
Figura 52. Idealización de las estructuras para cálculo de rigidez.....	91
Figura 53. Determinación de pesos de las muestras de cargas	92
Figura 54 Montaje del sistema para la obtención de la rigidez de una barra de silicona	92
Figura 55. Valores de deformación por carga 233 g con barra de 4 cm	93
Figura 56. Determinación de valores de deformación de barras de 7 mm unidas.....	94
Figura 57 Montaje de elementos estructurales del puente en la mesa vibratoria ..	94
Figura 58. Instalación de deformímetros en las estructuras de las pilas para la determinación de desplazamientos totales del sistema de aislación.....	95
Figura 59 valores de deformación de aisladores.	95
Figura 60. Periodo fundamental de la estructura real con aisladores sísmicos.	96
Figura 61. Periodo fundamental de modelo a escala en SAP sin sistema de aislación	98
Figura 62. Periodo fundamental del modelo a escala en SAP con a sistema de aislación	98

TABLAS

Tabla 1: Coeficiente de amortiguamiento relacionado con el sistema de aislamiento.	26
Tabla 2 Coeficiente modificado de respuesta	30
Tabla 3 Factores de escala para modelos elásticos estáticos	31
Tabla 4 Factores a escala para mampostería.....	32
Tabla 5. Factores a escala para la respuesta de estructuras a los sismos.....	33
Tabla 6. Resultados de SAP.....	52
Tabla 7. Resultados de SAP 2.....	52
Tabla 8. Pila norte.....	55
Tabla 9. Pila sur.....	55
Tabla 10. Características de aislador (fabricante).....	56
Tabla 11. Tamaño del aislador.....	57
Tabla 12. Pila norte.....	62
Tabla 13. Pila sur.....	64
Tabla 14. Propiedades del elastómero para diferentes durezas	65
Tabla 15. Espesor recomendable de las capas de elastómero para los apoyos tipo B y C	66
Tabla 16. Numero de capas interiores apoyos tipo B de acuerdo con los espesores de cada capa recomendado.....	66
Tabla 17. Resultados del neopreno	68
Tabla 18. Escala reducida.....	71
Tabla 19. Escala real	71
Tabla 20. Parámetros a ingresar aislador sísmico escala real.....	72
Tabla 21. Parámetros a ingresar aislador sísmico escala reducida.....	73
Tabla 22. Especificaciones de mesa vibratoria.....	78
Tabla 23. Unidades principales que intervienen en los desplazamientos máximos en el modelo a escala del puente de la calle 26 con carrera 5.....	80
Tabla 24. Características actuales de la geometría real y sistema de aislación. ..	83
Tabla 25. Factores de escala de cada una de las magnitudes físicas del modelo a escala.....	84
Tabla 26. Rigidez del sistema de aislación del sistema pila norte	85
Tabla 27. Rigidez del sistema de aislación del sistema pila sur.....	85
Tabla 28. Resumen valores modelo a escala y modelo real.....	86
Tabla 29. Valores obtenidos en el ensayo de la mesa vibratoria.....	113

GRAFICAS

Grafica 1. Modos de vibración vs periodo modelo real	97
Grafica 2. Modos de vibración vs periodo modelo a escala 1:100.....	99
Grafica 3. Aceleración absoluta del puente con aisladores modelo a escala – combinación sismo X.	99
Grafica 4. Aceleración absoluta del puente sin aisladores modelo a escala – combinación sismo X.	100
Grafica 5. Aceleración absoluta del puente con aisladores modelo a escala – combinación sismo Y.	100
Grafica 6 .Aceleración absoluta del puente sin aisladores modelo a escala – combinación sismo Y.	101
Grafica 7. Aceleración absoluta del puente con aisladores modelo real – combinación sismo x	101
Grafica 8 .Aceleración absoluta del puente sin aisladores modelo real – combinación sismo x	102
Grafica 9. Aceleración absoluta del puente sin aisladores modelo real – combinación sismo Y	102
Grafica 10. Aceleración absoluta del puente con aisladores modelo real – combinación sismo Y	103
Grafica 11. Variación de desplazamientos máximos aislador sísmico pila norte para combinación sismo Y modelo a escala	104
Grafica 12. Variación de desplazamientos máximos aislador sísmico pila sur para combinación sismo Y modelo a escala	104
Grafica 13. Variación de desplazamientos máximos aislador sísmico pila norte para combinación sismo X modelo a escala	105
Grafica 14. Variación de desplazamientos máximos aislador sísmico pila sur para combinación sismo X modelo a escala	105
Grafica 15. Variación de desplazamientos máximos aislador sísmico, pila norte para combinación sismo X modelo real.....	106
Grafica 16. Variación de desplazamientos máximos aislador sísmico, pila sur para combinación sismo X modelo real.....	107
Grafica 17. Variación de desplazamientos máximos aislador sísmico, pila norte para combinación sismo Y modelo real.....	107
Grafica 18. Variación de desplazamientos máximos aislador sísmico, pila sur para combinación sismo Y modelo real.....	108
Grafica 19. Variación de desplazamientos máximos con aisladores en la base sismo X modelo real.....	108

Grafica 20. Variación de desplazamientos máximos sin aisladores en la base sismo X modelo real.....	109
Grafica 21. Variación de desplazamientos máximos con aisladores en la base sismo Y modelo real.....	109
Grafica 22. Variación de desplazamientos máximos sin aisladores en la base sismo Y modelo real.....	110
Grafica 23. Variación de desplazamientos máximos con sistema de aislación sismo X modelo a escala.....	111
Grafica 24. Variación de desplazamientos máximos sin sistema de aislación sismo X modelo a escala.....	111
Grafica 25. Variación de desplazamientos máximos con sistema de aislación sismo Y modelo a escala.....	112
Grafica 26. Variación de desplazamientos máximos sin sistema de aislación sismo Y modelo a escala.....	112
Grafica 27. Desplazamientos totales modelo a escala en mesa vibratoria.....	114

INTRODUCCIÓN

El aislamiento sísmico se basa en el uso de elementos que permiten la disipación de la energía causadas por cargas laterales provocadas por un sismo, una estructura debidamente aislada sísmicamente recibe solo la cuarta o quinta parte de la aceleración del terreno, en cambio una estructura convencional la amplifica de 3 a 4 veces.

Un sistema de aislación actual en diseño sismo resistente son los aisladores sísmicos cuyas características se enfocan en: aumentar la capacidad de amortiguamiento de las estructuras y de retornar a su estado original sin desplazamientos residuales, de modo que pueda controlar los desplazamientos y pudieran afectar los elementos estructurales.

Estos elementos son utilizados en los apoyos de las estructuras debido a que este sitio es el límite de separación entre la súper estructura y la infraestructura donde se presentan las mayores solicitaciones de carga. Para el diseño de estos elementos se referencia las normativas indicadas en la NSR-10, título A.

Por lo mencionado anteriormente la investigación tiene como principal objetivo evaluar la respuesta sísmica del puente de la calle 26 con carrera 5 utilizando aisladores sísmicos a partir de un modelo a escala comparando valores con el diseño actual para identificar de qué manera el puente se verá afectado frente a un evento sísmico, o si verdaderamente el puente cumple con las condiciones necesarias para resistir un fenómeno sísmico y no se hubiera necesitado incluir aisladores sísmicos en las bases del puente de igual manera se pretende mostrar la efectividad de los modelos a escala ensayado en una mesa vibratoria que simula y un evento sísmico.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a su ubicación geográfica, Colombia es un país propenso a desastres naturales como los sismos, siendo Bogotá una de las ciudades con mayor probabilidad de tener un evento de gran magnitud sísmica. Debido a esto la NSR-10 ha puesto la ciudad en un nivel de riesgo intermedio y las obras de infraestructura deben ser diseñadas de acuerdo con la normativa vigente con el fin de disminuir su vulnerabilidad ante eventos sísmicos.

Una de las obras de infraestructura que llegan a ser afectadas por este fenómeno son los puentes, estructuras de vital importancia que cumplen la función del transporte terrestre y de comunicación de regiones. A través de los últimos años se ha evidenciado los colapsos de puentes y lo vulnerables que son a eventos sísmicos. Esto es causado por procesos constructivos, así como la poca información para evaluar un modelo estructural sismo-resistente que cumpla con una normatividad, que para el país deben ser diseñados de acuerdo al Código de Diseño Puentes del 95 que contempla el diseño de puentes en concreto reforzado, pres-forzado, pos-tensado y metálicos. Esta norma se basa en el diseño sismo-resistente a partir de la calidad de sus materiales y su ejecución en procesos constructivos.

La tecnología para el control de desplazamientos y fuerzas inerciales que se producen en puentes durante un sismo, es una estrategia para reducir la afectación sísmica sin alterar las características estructurales en los puentes. La tecnología que se fundamenta en el uso de aisladores sísmicos cuya función consiste en modificar las cargas dinámicas y reducir las deformaciones causadas por un sismo. La aplicación de este tipo de aisladores consigue que una estructura cumpla un sistema elástico capaz de resistir una fuerza dinámica.

En la ciudad de Bogotá en el año 2013 fue inaugurado por parte del Instituto de Desarrollo Urbano, el puente de la calle 26 con carrera 5 que conecta un sector de gran demanda vehicular como lo es el centro de la ciudad. Las características generales del puente a estudiar son:

- Elemento estructural de concreto reforzado con una longitud total de 100 metros
- Apoyos de 2 pilas en el centro y 2 estribos en los costados del puente
- Un tablero en concreto de geometría curva con una viga cajón de acero estructural

- No posee un sistema de aislamiento sísmico.

El puente fue diseñado de acuerdo al CCP-95 (Código Colombiano de Puentes) para soportar la capacidad de servicio vehicular y colapsos causados por una carga dinámica.

Teniendo en cuenta lo anterior es de interés para la presente investigación abordar el siguiente interrogante.

¿Cuál es la respuesta sísmica del puente de la calle 26 con carrera 5, con la implementación de aisladores sísmicos?

2. JUSTIFICACIÓN

El puente de la calle 26 con carrera 5 es una estructura esencial debido a que conecta el norte con el centro de la ciudad de Bogotá, se espera que igual que los hospitales, albergues, bomberos y otros tipos de estructuras de nivel de importancia especial dispuestos en la Norma Sismo Resistente 2010 (NSR-10) Título A cumplan con los parámetros de resistencia sísmica y no colapsen durante un fenómeno de esta naturaleza. Partiendo de lo anterior se busca definir de qué manera se cumplió con los parámetros establecidos por la Norma Sismo Resistente, necesarios para que el puente de la calle 26 no presente fallas estructurales si llegara a ocurrir un evento sísmico en la ciudad de Bogotá.

Para determinar esto se busca evaluar el comportamiento sísmico utilizando aisladores a partir de un modelo a escala del puente de la calle 26 comparando valores con el diseño actual para identificar de qué manera el puente de concreto reforzado se verá afectado ante un evento sísmico, o si efectivamente el puente cumple con las condiciones necesarias para resistir un sismo y no se hubiera necesitado incluir aisladores sísmicos en el puente.

Este estudio permitirá que se evalúen la importancia del uso de estas nuevas tecnologías en nuestro país para lograr estructuras sismo-resistentes de calidad que cumplan con las condiciones de servicio para un periodo de vida determinado con el uso de aisladores sísmicos, y evitar que los elementos estructurales de las obras de infraestructuras se vean comprometidas lo que generará problemas a largo plazo. Un propósito de la investigación es el uso de modelos a escala con la ayuda de programas computacionales de análisis estructural, para la evaluación de modelos reales con el uso de equipos como mesas vibratorias y demás equipos para evaluación de condiciones elásticas e inelástica de estructuras con un alto grado de importancia.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la respuesta del puente de la calle 26 con carrera 5 frente a un fenómeno sísmico con implementación de aisladores sísmicos en la base.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar el puente a escala real con un software de análisis de elementos finitos (SAP v2000).
- Analizar los desplazamientos de un modelo a escala del puente de la calle 26 con carrera 5 con implementación de aisladores sísmicos.
- Comparar los resultados obtenidos del modelo real con el modelo a escala.

4. ANTECEDENTES

En la ciudad de Bucaramanga, los investigadores Rico y Chio¹ realizaron una comparación del comportamiento sísmico de puentes de concreto reforzado simplemente apoyados, usando aisladores sísmicos en la base y fue modelado con el software SAP 2000. Se usaron tres tipos de aisladores para identificar el aislador con una mayor reducción del efecto sísmico sobre la estructura. Los autores concluyeron que el uso de aisladores modificó la respuesta dinámica del puente en cuanto a los modos de vibración ya que, para el puente sin aislamiento, los modos principales son longitudinales, mientras que para el puente con sistemas de aislamiento el primer modo está en dirección longitudinal y el segundo modo de vibración está en dirección transversal, y para los modos superiores se repite este comportamiento.

Los estudios realizados por Felix Joaquin Videz² ha propuesto una metodología de ensayo para modelos a escala reducida de concreto reforzado. Los materiales para el modelo tenidos en cuenta fueron: concreto para modelos, refuerzo para modelación de concreto. El autor concluye que la designación de la escala depende de los problemas constructivos, que podrían exteriorizarse al representar las dimensiones del prototipo en determinada escala, así como de los equipos e instrumentos para la toma de medidas en el laboratorio. Siempre es importante constatar los diámetros de los aceros que el mercado ofrece, de modo que la escala sea consecuente con los materiales dispuestos en el comercio. Es importante recordar que entre más pequeño sea el modelo menos confiable resulta.

Los estudios realizados por Roger Meza y Edgard Sánchez³ proponen elaborar una guía que reduzca la brecha bibliográfica que existe actualmente referente al análisis y diseño de estructuras utilizando aisladores sísmico de base elastoméricos y de fricción en el país. A través de un documento que reúna la teoría, los códigos y los ponga en práctica en claros ejemplos de aplicación. Los autores concluyen que en cuanto a las distintas clases de aisladores se encontró que existen algunos en fases experimentales y no se consideran prácticos aun, los principales son los elastoméricos y los de fricción a través de dispositivos

¹RICO, Leocadio; CHIO, Gustavo. Uso de aisladores de base en puentes de concreto simplemente apoyados. Trabajo de especialización de grado. Universidad industrial de Santander; Facultad de Ingeniería Civil; Bucaramanga; 2011.

² VIDEZ, Felix. Metodología para realizar modelos de concreto reforzado a escala reducida.. Universidad Industrial de Santander; Facultad de Ingeniería Civil; Bucaramanga; 2006.

³ ROGER, Meza. Guía de diseño sísmico de aisladores elastomericos y de fricción para la republica de Nicaragua. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero civil. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil; Nicaragua; 2010.H

mecánicos, los cuales han sido utilizados alrededor del mundo y además se ha creado una base teórica bastante comprensible.

En la ciudad de Arequipa, el investigador Joseph Jonathan Muñoz⁴ ha propuesto ejemplificar el diseño y el comportamiento de una estructura aislada símicamente, demostrando como el uso de esta técnica puede reducir las aceleraciones transmitidas del suelo a la estructura por medio de la introducción de aisladores sísmicos. El investigador concluye que El método de análisis estático de una estructura aislada asemeja y simplifica el comportamiento del sistema al de una gran masa concentrada sobre un resorte, similar a un péndulo invertido y que El uso de aisladores sísmicos de base brinda resultados muy satisfactorios para el diseño y protección de estructuras de carácter esencial ya que también protege sus contenidos.

⁴MUÑOZ, Joseph Jonathan. Análisis y diseño de una estructura hospitalaria con aisladores sísmicos en la ciudad de Arequipa. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero civil. Universidad Católica de Santa María, Facultad de Arquitectura e Ingenierías Civil y del Ambiente; Perú; 2013.

5. MARCO DE REFERENCIA

5.1 MARCO CONCEPTUAL

5.1.1 Puentes

Los puentes son estructuras que tienen como función la comunicación terrestre entre regiones donde se presenten obstáculos como son ríos, mares, valles, abismos, carreteras, vías férreas entre otros, el objeto de uso y construcción de los puentes se refiere principalmente tener alternativas de transporte evitándose problemas de movilidad accidentes, los puentes se conforman de dos elementos principales que son superestructura y subestructura.

- Superestructura: parte del puente que se construye sobre apoyos como son la losa, las vigas, bóveda, estructura metálica, etc. Siendo los elementos estructurales que constituyen el tramo horizontal.
- Subestructura: está conformada por los estribos, pilas centrales, etc. Siendo estos los que soportan al tramo horizontal.⁵

5.1.1.1 Tipos de puentes

Los puentes de concreto reforzado los podemos clasificar de la siguiente manera:

- a) Tipo Losa.
- b) Tipo Viga.
- c) Tipo Cajón.

Puente Tipo Losa: Estos puentes consisten de una losa de tipo maciza o aligerada, directamente apoyada sobre los estribos y pilares intermedios, pudiendo ser simplemente apoyados o continuos. Este tipo de puentes es económico hasta luces de 10 metros.

Puente Tipo Viga En este tipo de puente la viga de concreto puede ser asociado a como un puente de viga “T”, o seccionado para formar una viga y una placa de esta manera formar un puente tipo losa. Con este tipo de viga podemos tener luces de 10 a 30 mts.

⁵ GONZALES, Anabel; GUZMÁN, Maria. consideraciones de diseño en la infraestructura de puentes carreteros. . Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero civil. Universidad de Oriente Núcleo de Anzoátegui , Facultad de Ingeniería Civil ; Barcelona ; 2008.

Puentes De Viga Cajón Estas vigas pueden diseñarse para una carretera de dos carriles con una gran luz de desarrollo con carril en voladizo en ambos lados, para proporcionar el ancho necesario de la vía. Los puentes de viga cajón de concreto reforzada pueden usarse para luces de 30 a 60 mts. Su Alta resistencia a momentos y esfuerzos a torsión lo convierten en una clara opción para todo tipo de puentes curvos elevados etc .⁶

5.1.2 Carga Sísmica.

Las cargas sísmicas en una estructura se dan acabo debido al movimiento ondulatorio que se presenta en el terreno de fundación de la misma durante un acontecimiento sísmico. Este movimiento irregular produce, en virtud de las propiedades de la estructura, fuerzas de inercia, fuerzas restauradoras y fuerzas disipadoras de energía que generan un movimiento de tipo vibratorio en la misma. La respuesta de las estructuras a los sismos depende de varios factores: de las características del movimiento del terreno, de la rigidez y la masa de la estructura, de las condiciones del subsuelo y de la magnitud del amortiguamiento.

Para el diseño sísmico de la mayoría de los tipos de estructuras comunes, se han desarrollado métodos sencillos de análisis. Sin embargo, algunos tipos de estructuras requieren de consideraciones específicas de análisis y diseño, tal es el caso de los puentes. Las experiencias de sismos pasados han demostrado que los puentes son vulnerables a los movimientos diferenciales, longitudinales, laterales y verticales en las subestructuras (pilas y estribos), mientras que los miembros de la cubierta, se ven apenas afectados por los esfuerzos sísmicos. Para el diseño sísmico, la selección de la forma estructural de los miembros puede tener una considerable influencia sobre su comportamiento, sin embargo existen importantes factores (entre ellos factores económicos) que pueden hallarse en conflicto con consideraciones puramente sísmicas al seleccionar la forma de la superestructura, y es preciso hacer concesiones.

La naturaleza rígida y no dúctil de los estribos, comparados con las pilas. Sugiere que son los primeros los que deberían soportar la mayor parte de las fuerzas sísmicas laterales. Sin embargo, es difícil predecir el comportamiento real de los mismos, debido a que no es posible evaluar con precisión razonable 129 que parte del suelo actúa junto con ellos. Por lo tanto, algunos autores consideran buena

⁶ Univo. Tesis como opción de grado. Marco teórico conceptual. [citado 15 octubre, 2015]. Disponible en http://www.univo.edu.sv:8081/tesis/019116/019116_Cap3.pdf.

práctica, en estructuras con dos o más pilas y con acción continua de diafragma de la cubierta, separar transversalmente la superestructura de los estribos, y transferir todas las cargas transversales a las pilas.

Para evaluar el efecto sísmico se aplican análisis tanto dinámicos como estáticos equivalentes, y dependiendo de la importancia de la estructura o de su complejidad, queda a criterio del diseñador utilizar uno u otro método de análisis. Sin embargo, “un factor muy importante a considerar en el análisis lo constituye el evaluar adecuadamente el grado apropiado de amortiguamiento” de la estructura. A continuación se presentan los métodos de análisis sísmico en estructuras.

5.1.2.1 Análisis de Fuerza Horizontal Equivalente. Este se define como un método aproximado, que se desarrolló en los inicios de los análisis dinámicos de estructuras, debido a que anteriormente no se tenían herramientas tecnológicas y los análisis matemáticos para el estudio de elementos finitos presentaban dificultades para realizar análisis dinámicos llevados a la realidad. Este método se basa en hallar fuerzas horizontales equivalentes, que para determinarse dependen de algunas características de la estructura como lo es su geometría tanto en elevación como en planta y demás parámetros que puedan afectar la masa de la estructura, para lograr hallar aproximadamente un comportamiento real de la misma. Finalmente determina una fuerza horizontal, que representa la fuerza sísmica en la base que se determina con siguiente ecuación fundamental:

$$F = m * a$$

Donde “m” es la masa de la estructura y “a” es la aceleración.

5.1.2.2 Análisis Dinámico. Cuando una estructura con un grado de importancia sea mayor los métodos aproximados de análisis sísmico pueden no ser suficientemente exactos, por lo que se requiere un análisis más confiable, que tome en cuenta la naturaleza dinámica de la sollicitación y de las características reales dinámicas de la estructura.

Varios métodos de diferente complejidad han sido desarrollados para el análisis sísmico de estructuras. Todos ellos tienen en común la solución de las ecuaciones de movimiento dependiendo de las relaciones de desplazamiento, velocidad y aceleración, a partir relaciones que incluyan parámetros de equilibrio y rigidez. Cuando los análisis de estas estructuras necesitan un nivel matemático superior,

los análisis son llevados a cabo programas de elementos finitos en computadoras⁷.

5.1.3 Aislamiento sísmico.

La ingeniería sísmica actual ha desarrollado interesantes tecnologías con el propósito de proteger las estructuras frente a terremotos, como los aisladores sísmicos de base, elementos que admiten deformaciones de más de 1 metro.

El aislamiento sísmico es una colección de elementos estructurales para aislar la superestructura del edificio del terreno y así proteger la integridad del edificio. El diseño sismo resistente de edificios con aisladores sísmicos consiste en la modificación de las características dinámicas de la edificación reduciendo su demanda sísmica, en un evento sísmico, proveen a la estructura la suficiente flexibilidad para diferenciar la mayor cantidad posible el periodo natural de la estructura con el periodo natural del sismo, evitando que se produzca resonancia, lo cual podría provocar daños severos o el colapso de la estructura.

Los aisladores sísmicos de base consisten en unos elementos elastoméricos colocados en la estructura, cuya flexibilidad permite minimizar los daños por sismo. El elastómero, a su vez está, reforzado interiormente con láminas de acero que evitan el aplastamiento del aislador por el peso de la estructura.

La aplicación de este tipo de aisladores consigue reducir las aceleraciones y deformaciones de la superestructura eliminando el daño estructural. Una estructura correctamente aislada sísmicamente recibe solo la cuarta o quinta parte de la aceleración del terreno, mientras que una estructura convencional la amplifica de 3 a 4 veces.⁸

Características que poseen los aisladores sísmicos:

- Desempeño bajo todas las cargas de servicio, verticales y horizontales. Deberá ser tan efectiva como la estructura convencional.
- Provee la flexibilidad horizontal suficiente para alcanzar el periodo natural de la estructura aislada.
- Capacidad de la estructura de retornar a su estado original sin desplazamientos residuales. Provee un adecuado nivel de disipación de

⁷ Univo. Tesis como opción de grado. Marco teórico conceptual Capítulo III. [citado 15 octubre, 2015]. Disponible en http://www.univo.edu.sv:8081/tesis/019116/019116_Cap3.pdf.

⁸ Tecnoav. Productos y aplicaciones. Aisladores y disipadores sísmicos. [citado 15 octubre, 2015]. Disponible en <http://www.tecnoav.cl/4-aisladores-sismicos-y-disipadores-sismicos/>

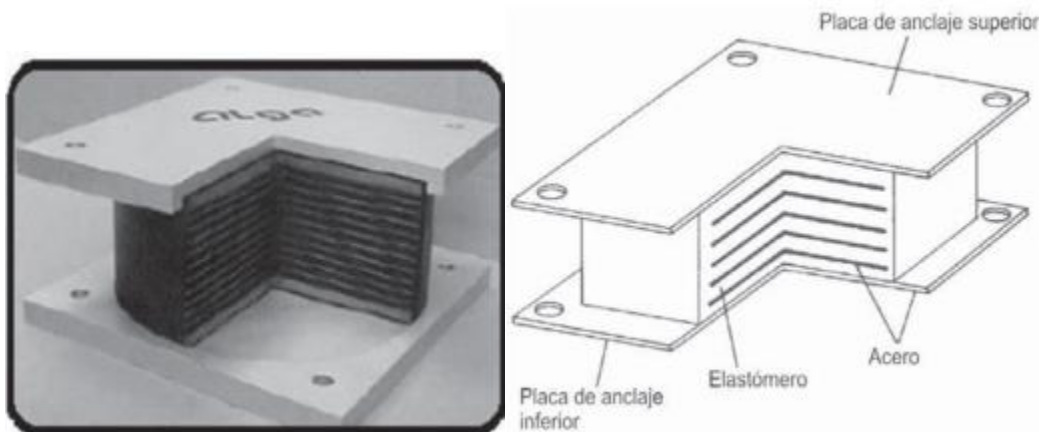
energía, de modo de controlar los desplazamientos que de otra forma pudieran dañar otros elementos estructurales.

5.1.4 Tipos de aisladores sísmicos

5.1.4.1 Aisladores elastómericos de alto amortiguamiento (HDRB). La rigidez vertical de HDRB aumenta considerablemente. Manteniendo su flexibilidad lateral. Los aisladores de alto amortiguamiento están hechos de un compuesto especial de goma obtenido con la adición de carbono extrafino, aceite negro, o resinas, que permiten 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.

Los valores de amortiguamiento varían entre 10% y el 20%, el análisis estructural aislado con estos dispositivos se realiza como un sistema bilineal cuyas propiedades dependen de la razón de amortiguamiento efectivo y el módulo de deformaciones (G) cuyos valores oscilan entre 0,4 MPa y 1,4 MPa.⁹

Figura 1. Aisladores elastómericos de alto amortiguamiento (HDRB).



Fuente: RICO¹⁰

5.1.4.2 Aisladores elastómericos con núcleo de plomo (LBR). 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 con respecto a los anteriores, disminuyendo los

⁹ RICO, Leocadio; CHIO, Gustavo. Uso de aisladores de base en puentes de concreto simplemente apoyados. Trabajo de especialización de grado. Universidad Industrial de Santander; Facultad de Ingeniería Civil; Bucaramanga; 2011.7p.

¹⁰ Ibid., p.7.

desplazamientos para pequeños sismos y fuerzas de viento que actúen sobre la estructura (ver figura 2).

El comportamiento del aislador depende de la fuerza lateral que se impone, si la fuerza es muy pequeña será asumida por el núcleo de plomo y el sistema tendrá una alta rigidez, cuando la carga lateral se aumenta, el núcleo de plomo se deforma y empieza a fluir el comportamiento histerético se genera con la energía disipada por el núcleo de plomo, como consecuencia la rigidez lateral del sistema disminuye.

El amortiguamiento generalmente se encuentra entre el 15% y el 35% y se puede realizar el modelo de este aislador empleando la teoría bilineal. En su proceso de fabricación, es necesario que el hueco realizado en el caucho sea más pequeño que el diámetro del elemento de plomo, para que éste sea forzado a entrar. Esta característica garantiza la uniformidad del bloque y la consiguiente deformación por cortante de todo el volumen del núcleo de plomo. La plastificación del núcleo de plomo garantiza elevados valores de amortiguamiento, que originan, no sólo menores desplazamientos de la superestructura, sino también mayor rigidez lateral del tablero para niveles bajos de acciones horizontales.

La tensión de cadencia a cortante del núcleo de plomo es de, aproximadamente, 10MPa sobrepasado este valor, la rigidez del dispositivo es la rigidez del caucho, lo que proporciona al dispositivo una rigidez bi-lineal. Este comportamiento es excelente, incluso a bajas temperaturas, pues el caucho presenta buenas características de resistencia a fatiga bajo estas condiciones. La rigidez inicial del aparato LRB es cerca de 10 veces superior a la rigidez pos elástica, resultante de la cadencia del núcleo de plomo. Este tipo de sistema de aislamiento sísmico es la solución más utilizada en puentes, dada su simplicidad, comportamiento y bajo costo.¹¹

¹¹ RICO, Leocadio; CHIO, Gustavo. Uso de aisladores de base en puentes de concreto simplemente apoyados. Trabajo de especialización de grado. Universidad Industrial de Santander; Facultad de Ingeniería Civil; Bucaramanga; 2011.8p

Figura 2. Aisladores elastómericos con núcleo de plomo (LBR).

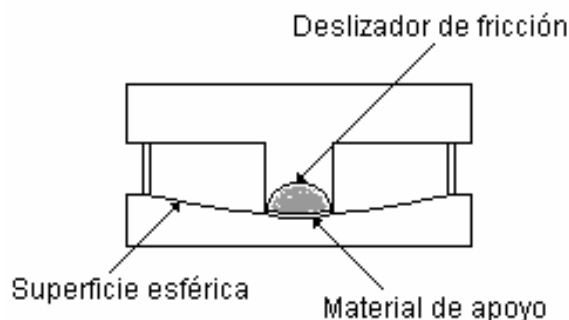


Fuente: RICO¹²

5.1.4.3 Sistema de péndulo de fricción (FPS). 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 de teflón (politetrafluoroetileno PTFE).

Características de estos apoyos son la superficie deslizante esférica de acero inoxidable pulido y el deslizador articulado, que está revestido con un material compuesto de alta capacidad de soporte basado en politetrafluoroetileno (teflón) que tiene un bajo coeficiente de fricción (aproximadamente 5 a 7%). Los apoyos están sellados e instalados con la superficie deslizante boca abajo para evitar la contaminación de la interface de deslizamiento.

Figura 3. Sistema de péndulo de fricción (FPS).



Fuente: RICO¹³

El aislador indicado en la figura 3 corresponde a la primera generación de aisladores. El apoyo FPS es activado sólo cuando la fuerza de corte sobre la interface de aislación, debida a las fuerzas sísmicas, supera la fuerza de fricción estática. Una vez en movimiento, el cursor articulado (deslizador) se mueve a lo largo de la superficie esférica cóncava, causando la elevación de la masa

¹² RICO, Leocadio; CHIO, Gustavo. Uso de aisladores de base en puentes de concreto simplemente apoyados. Trabajo de especialización de grado. Universidad Industrial de Santander; Facultad de Ingeniería Civil; Bucaramanga; 2011.8p.

¹³ Ibid., p. 8.

soportada, con movimientos equivalentes a los de un péndulo simple. Los resultados de aislación basal deseados se alcanzan por la geometría del apoyo y la gravedad. Durante la elevación a lo largo de la superficie esférica, el apoyo desarrolla una fuerza resistente lateral igual a la combinación de la fuerza friccional movilizada y una fuerza de restauración inducida por la gravedad. Verdaderamente, esta última fuerza es la fuerza de restauración del sistema. En base a lo indicado, en el párrafo anterior se tienen dos fases en un sistema FPS, la primera denominada de agrupamiento en que el deslizador no se mueve y la segunda que corresponde al deslizador en movimiento.¹⁴

5.1.5 SAP2000 (Structural Analysis Program)

SAP2000 es un programa de elementos finitos, con interfaz gráfico 3D orientado a objetos, preparado para realizar, de forma totalmente integrada, la modelación, análisis y dimensionamiento del más amplio conjunto de problemas de ingeniería de estructuras.

Conocido por la flexibilidad en el tipo de estructuras que permite analizar, por su poder de cálculo y por la fiabilidad de los resultados, SAP2000 es la herramienta diaria de trabajo de miles de ingenieros en todo el mundo. La amplia gama de aplicabilidad de los programas de CSI permite su utilización en el dimensionamiento de puentes, edificios, estadios, presas, estructuras industriales, estructuras marítimas y todo tipo de infraestructura que necesite ser analizada y dimensionada.

Actualmente, se encuentra en comercialización la versión 14 del programa, la cual, entre otras funcionalidades incluye:

- Mejoramientos en la comprobación de columnas-viga en el EC2/EC8;
- Nuevo elemento link para simular aparatos de apoyo del tipo péndulo triplo
- La posición no deformada de una estructura en cada una de las fases del proceso constructivo puede ahora ser visualizada sin tener que ejecutar el modelo
- Tensiones de corte, Von Mises y principales pueden ahora ser obtenidas como resultado para algunos tipos de sección de barra¹⁵

¹⁴ AGUIAR, Roberto et al. Aisladores sísmicos de base elastómericos y fps. Primera edición. Quito: Escuela Politécnica del Ejército, 2008. 26p. ISBN: 978-9978-30-104-3

¹⁵ CSI SAP2000. Información general. [citado 18 octubre, 2015]. Disponible en http://www.csiespana.com/index.php?option=com_content&view=article&id=17&Itemid=45&lang=es

5.1.6 Desplazamientos

5.1.6.1 Desplazamientos Laterales Mínimos

$$D_D = \frac{S_a}{\omega_b^2 B_D} = \frac{1}{B_D} \left(\frac{T_D}{2\pi} \right)^2 \frac{S_{D1}}{T_D} g = \frac{g S_{D1} T_D}{4\pi^2 B_D}$$

Ecuación 1

Donde:

S_{D1} : Aceleración espectral de diseño correspondiente a un amortiguamiento del cinco por ciento y un periodo de un segundo.

T_D :Periodo efectivo de una estructura sismicamente aislada, en el desplazamiento de diseño en la dirección de consideración.

B_D : Coeficiente numérico relacionado con el amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento para el desplazamiento de diseño.

Tabla 1: Coeficiente de amortiguamiento relacionado con el sistema de aislamiento.

Amortiguamiento Efectivo β_D o β_M (porcentaje crítico) ^{a,b}	Factor β_D o β_M
≤ 2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
≥ 50	2.0

a. El coeficiente de amortiguamiento puede basarse en el amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento.

b. El coeficiente de amortiguamiento puede basarse en una interpolación lineal para valores de amortiguamiento efectivo diferentes a los dados.

Fuente: NEHRP ¹⁶

El período efectivo de la estructura aislada al desplazamiento de diseño, T_D , se determinará usando las características de la deformación del sistema de aislamiento de acuerdo con la fórmula:

¹⁶NEHRP Recommended provision for seismic regulation for new buildings and other structures FEMA 450. [En línea]. Bogotá: UGC. [Citado 15 marzo,2016]. Disponible en http://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1532-20490-7602/fema_450_2_commentary.pdf

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

Ecuación 2

Donde:

g: Aceleración de la gravedad

K_{Dmin} : Rigidez mínima efectiva del sistema de aislamiento para el desplazamiento de diseño en dirección horizontal.

W: Peso sísmico sobre el sistema de aislación.

5.1.6.2. El Desplazamiento Máximo

$$D_M = \frac{gS_{M1}T_M}{4\pi^2 B_M}$$

Ecuación 3

Donde :

S_{M1} :Aceleración espectral maxima correspondiente a un amortiguamiento del cinco pornciento y un periodo de un segundo.

T_M :Periodo efectivo de una estructura sismica aislada, en el desplazamiento maximo en la dirección de consideración.

B_M : coeficiente numérico relacionado con el amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento para el desplazamiento maximo.

5.1.6.3. El período efectivo para el desplazamiento máximo:

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

Ecuación 4

Dónde:

g: Aceleración de la gravedad

$K_{D\ min}$: Rigidez mínima efectiva del sistema de aislamiento para el desplazamiento de diseño en dirección horizontal.

W: Peso sísmico sobre el sistema de aislación.

5.1.6.4 Desplazamientos totales de diseño

Los desplazamientos totales de diseño D_{TD} y D_{TM} , que incluyen torsión está dado por:

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

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

Ecuación 5

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

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

Y : Distancia entre el centro de rigidez del sistema de aislamiento y el elemento seleccionado , medido perpendicularmente en la dirección en la que fue cargado en el mismo que está considerado.

e: excentricidad horizontal entre el centro de masa de la estructura y su centro de rigidez del sistema de aislación, más la excentricidad accidenta, tomada como el 5% de la dimensión más larga de la estructura perpendicular a la dirección en que está considerado la fuerza.

b: Dimensión más pequeña de la estructura medida perpendicular a d

d: Dimensión más larga de la estructura.

5.1.6.5 Elementos Estructurales

$$V_b = K_{Dmax} D_D$$

Ecuación 6

Dónde:

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

K_{Dmax} : Rigidez máxima efectiva en el centro de rigidez del sistema de aislamiento para el sismo de diseño en dirección horizontal.

5.1.6.6. Elementos Estructurales Sobre el Sistema de Aislación.

$$V_s = \frac{K_{Dmax} D_D}{R_i}$$

Ecuación 7

Dónde:

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

K_{Dmax} : Rigidez máxima efectiva en el centro de rigidez del sistema de aislamiento para el sismo de diseño en dirección horizontal.

R_i : Coeficiente numérico relacionado con el tipo de sistema de resistencia sísmica sobre el sistema de aislación.

El coeficiente R_i será calculado de acuerdo a la siguiente expresión asegurando que esencialmente la respuesta de la estructura es elástica.

$$R_i = \frac{3}{8} * R \quad 1 < \frac{R}{2.67} \leq 2$$

Ecuación 8

Dónde R es el coeficiente de capacidad de disipación de energía.

Tabla 2 Coeficiente modificado de respuesta

subestructura	R
Pila tipo muro	2
Viga cabezal de concreto reforzado sobre pilotes	
a) Sobre pilotes verticales únicamente	3
b) Con uno o más pilotes inclinados	2
Columnas solas	3
Viga cabezal de acero o acero compuesto con concreto	
a) Sobre pilotes verticales únicamente	5
b) Con uno o más pilotes inclinados	3
Portico con dos o mas columnas	5

FUENTE: código colombiano puentes 95¹⁷

5.1.7 Factores a escala

Las relaciones de la similitud para modelos estructurales se obtiene a partir de los términos π . Los factores de escala derivan de la ecuación $\pi_m = \pi_p$, para cada uno de los seis términos, después se relacionan modelo y prototipo con :

$$S_i = i_p / i_m$$

Ecuación 9

s_i , es definido como el factor a escala para la cantidad i, los sub índices p y m denotan el prototipo y el modelo, respectivamente.

Los factores a escala pueden representarse solamente con las cantidades dimensionalmente independientes presentes en los términos π de la ecuación, son estas: longitud, módulo de elasticidad y aceleración (l,E y a). Los factores de escala para modelos estructurales son

$$S_Q = S_l^2 S_E, \quad S_E = 1, \quad S_M = \frac{S_l^2 S_E}{S_a}$$

Ecuación 10

¹⁷Capitulo A.3 -Cargas. Código colombiano de puentes del 95. Colombia,1995. P.

$$S_{\delta} = S_l, \quad S_{\sigma} = S_E, \quad S_v = 1$$

Ecuación 11

Para que los esfuerzos sean equivalentes, la relación entre los módulos de elasticidad debe ser igual a 1 ($S_E = 1$), se logra utilizando materiales con propiedades similares en modelo y prototipo.¹⁸

Tabla 3 Factores de escala para modelos elásticos estáticos

Cantidades	Dimensiones	Factor de escala
Propiedades relativas al material		
Esfuerzo	FL^{-2}	S_E
Modulo de elasticidad	FL^{-2}	S_E
Relación de Poisson's	----	1
Peso especifico	FL^{-3}	S_E/S_L
Deformación unitaria	----	1
Geometría		
Dimensión lineal	L	S_L
Desplazamiento lineal	L	S_L
Desplazamiento angular	----	1
Área	L^2	S_L^2
Momento de inercia	L^4	S_L^4
Cargas		
Cargas concentrada Q	F	$S_E S_L^2$
Carga distribuida lineal w	F^{-1}	$S_E S_L$
Presión uniforme	FL^{-2}	S_E
Momento torsor	FL	$S_E S_L^3$
Fuerza cortante	F	$S_E S_L^2$

Fuente: VIDEZ¹⁹

¹⁸HARRIS,Harry; SABNIS,Gajanan.structural modeling and experimental techniques: Size Effects,Accuracy and Reliability in Materials System and Models.United States of America. 2 ed CRC press 1999.pág. 789

¹⁹VIDEZ, Felix. Metodología para realizar modelos de concreto reforzado a escala reducida.. Universidad Industrial de Santander; Facultad de Ingeniería Civil; Bucaramanga; 2006.P.12.

Tabla 4 Factores a escala para mampostería

Grupo	Cantidad (2)	Dimensión (3)	Cargas estáticas	
			Modelo real (4)	Modelo real practico (5)
Cargas	Carga concentrada, Q	F	$S_o S_L^2$	S_L^2
	Carga lineal, w	FL^{-1}	$S_o S_L$	S_L
	Presión, q	FL^{-2}	S_o	1
	Momento, M	FL	$S_o S_L^3$	S_L^3
Geometría	Dimensión lineal, l	L	S_L	S_L
	Desplazamiento, δ	L	S_L	S_L
	Desplazamiento angular, β	1	1	1
	Área, A	L^2	S_L^2	S_L^2
Propiedades del material	Unidad de esfuerzo de mampostería, σ_m	FL^{-2}	S_o	1
	Unidad de deformación mampostería, ϵ_m	1	1	1
	Unidad modulo de mampostería, E_m	FL^{-2}	S_o	1
	Unidad relación de Poisson's, ν_m	1	1	1
	Peso específico, γ_m	FL^{-3}	S_o/S_L	$1/S_L$
	Esfuerzo mortero, σ'_m	FL^{-2}	S_o	1
	Deformación unitaria mortero, ϵ'_m	1	1	1
	Modulo del mortero, E'_m	FL^{-2}	S_o	1
	Relación de Poisson's mortero, ν'_m	1	1	1
	Esfuerzo de refuerzo, σ_{rm}	FL^{-2}	S_o	1
	Deformación unitaria de refuerzo, ϵ_{rm}	1	1	1
	Modulo del refuerzo, E_{rm}	FL^{-2}	S_o	1

Fuente: VIDEZ²⁰

²⁰VIDEZ, Felix. Metodología para realizar modelos de concreto reforzado a escala reducida.. Universidad Industrial de Santander; Facultad de Ingeniería Civil; Bucaramanga; 2006.P. 15.

Tabla 5. Factores a escala para la respuesta de estructuras a los sismos

grupo	Cantidad (2)	Dimensión (3)	Modelo replica real (4)	Simulación artificial de masa (5)	Omitir fuerzas de gravedad (6)
cargas	Fuerza, Q	F	$S_e S_L^{-2}$	$S_e S_L^{-2}$	S_L^{-2}
	Presión, q	FL^{-2}	S_e	S_e	1
	Aceleración, a	LT^{-2}	1	1	S_L^{-1}
	Aceleración gravitacional, g	LT^{-2}	1	1	omitido
	Velocidad, v	LT^{-1}	$S_L^{-1/2}$	$S_L^{-1/2}$	1
	Tiempo, t	T	$S_L^{-1/2}$	$S_L^{-1/2}$	S_L
geometría	Dimensión lineal, l	L	S_L	S_L	S_L
	Desplazamiento, δ	L	S_L	S_L	S_L
	Frecuencia, ω	T^{-1}	$S_L^{-1/2}$	$S_L^{-1/2}$	S_L^{-1}
Propiedades del	Módulos, E	FL^{-2}	S_e	S_e	1
	Esfuerzo, σ	FL^{-2}	S_e	S_e	1
	Deformación unitaria, ϵ	----	1	1	1
	Relación de Poisson's, ν	----	1	1	1
	Densidad de masa, ρ	$FL^{-4}T^2$	S_e/S_L	1	1
	Energía, EN	FL	$S_e S_L^{-3}$	$S_e S_L^{-3}$	S_L^{-3}

$$(g\rho l/E)_m = (g\rho l/E)_p$$

Fuente: VIDEZ²¹

5.1.7.1 Estructuras Sujetas a Cargas Dinámicas

Los modelos a escala reducida de estructuras sometidas a cargas dinámicas se han estudiado desde la segunda guerra mundial pasando por los estudios de Hudson, Baker, Harris, etc. La complejidad de estas cargas y los efectos que esta causan sobre las edificaciones han puesto a las técnicas de la modelación a escala reducida a la par con las técnicas analíticas.

Los requerimientos de similitud que gobiernan las relaciones dinámicas entre el modelo y la estructura prototipo dependen de la geometría, de las propiedades de los materiales de la estructura y del tipo de carga. Las cargas dinámicas de interés en la ingeniería estructural van desde cargas de viento hasta vibraciones estáticas producidas por el tráfico. El problema de mayor interés son las cargas dinámicas producidos por sismos, debido a su gran potencial de producir desastres ²²

²¹VIDEZ, Felix. Metodología para realizar modelos de concreto reforzado a escala reducida.. Universidad Industrial de Santander; Facultad de Ingeniería Civil; Bucaramanga; 2006.P.17.

²²HARRIS,Harry; SABNIS,Gajanan.structural modeling and experimental techniques: Size Effects,Accuracy and Reliability in Materials System and Models.United States of America. 2 ed CRC press 1999.pág. 789

5.1.8. Modelamiento Dinámico de las Estructuras de Ensayo

Un simulador sísmico tiene como propósito principal ensayar y analizar modelos dinámicos a pequeña escala, donde se pretende colocar modelos y someterlos a movimientos dinámicos para predecir los comportamientos que estos tendrán y así establecer criterios de diseño que contribuyan al mejoramiento de la estructura basados en la norma sismo-resistente .

Para realizar el modelo a ensayar, se debe tener en cuenta la teoría de modelamiento, donde se establece que las propiedades de un modelo y las propiedades de un prototipo están relacionadas entre si. Las propiedades pueden ser geometría, de materiales y condiciones de carga. Por lo tanto para poder correlacionar se debe aplicar la teoría de la similitud, que puede ser desarrollada por medio del análisis dimensional que representa los fenómenos físicos a través de ecuaciones matemáticas, considerando la siguiente expresión.

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n - m)$$

Ecuación 12

Donde π_1 incluye las variables dependientes, n es el número total de cantidades físicas implicadas que describen el fenómeno, m es el número de ecuaciones básicas y los demás incluyen explícitamente variables independientes.

Es necesario completar la similitud entre el prototipo y el modelo,, para ello es fundamental:

- Identificar todas las variables físicas que estén involucradas con la solución del fenómeno físico de estudio.
- Determinar los parámetros a dimensionales para las variables físicas
- Establecer la igualdad entre los parámetros a dimensionales del modelo y el prototipo.²³

²³ LOPEZ, Jeimy; FERREIRA, Jessika; ORTIZ, Luisa .Diseño de Una Mesa Vibratoria para el Análisis del Comportamiento Dinámico de Edificios a Escala. Universidad La Gran Colombia; Facultad de Ingeniería Civil; Bogotá; 2014.P.39.

5.2 MARCO GEOGRÁFICO

5.2.1 Ubicación

El puente se ubicada al noroccidente de la localidad de Santa Fe en La UPZ 92 (La Macarena), en la intersección de la carrera 5 con calle 26.

Figura 4: intersección de la carretera 5 y la calle 26 de norte-oriente



Fuente: Street view²⁵

Fuente: Bogotá

²⁴ Alcaldía mayor de Bogotá. Bogotá permanece atenta.[en línea]. Colombia: Bogotá, 2015.[citado 20 de nov ,2015]. Disponible en: <http://www.bogota.gov.co/temasdecuidad/emergencias>.

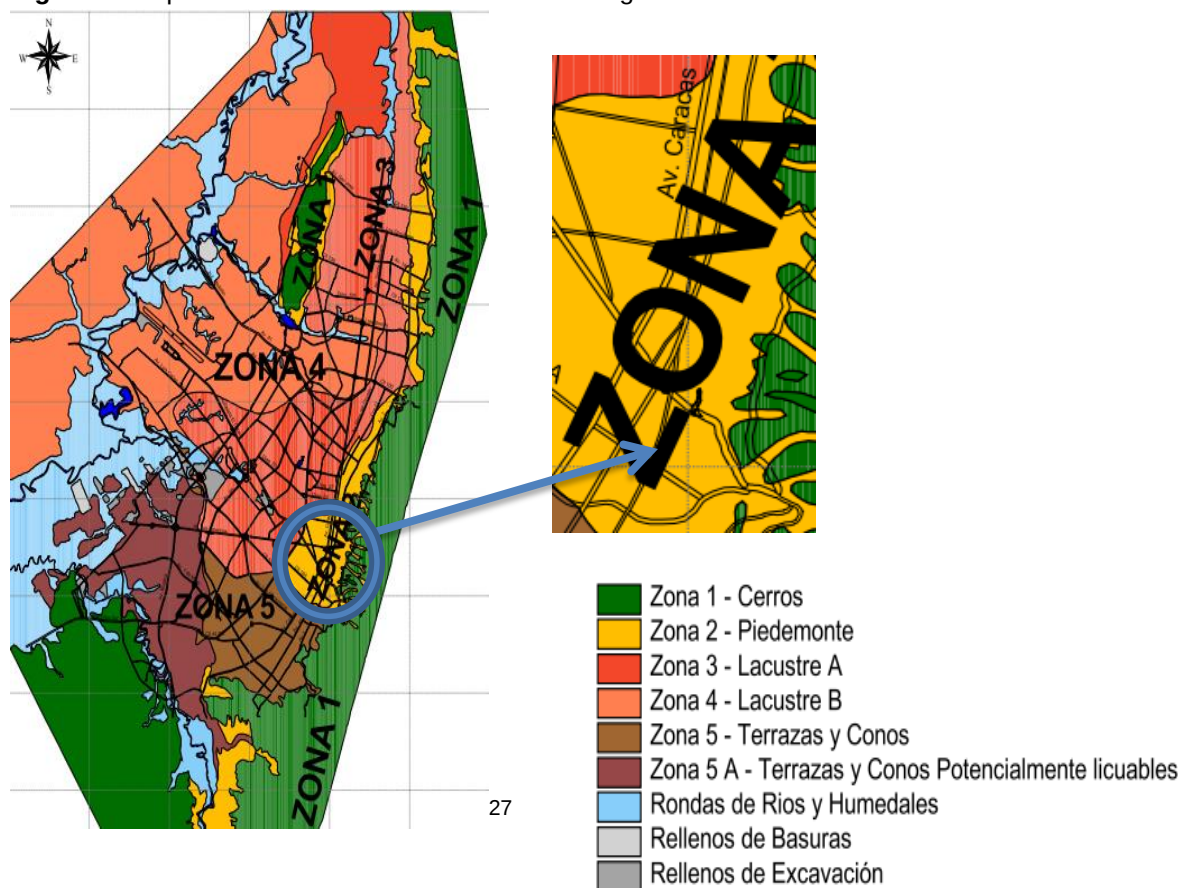
²⁵ Google maps. Street view. .[en línea]. Colombia: Bogotá, 2015.[citado 20 de nov ,2015]. Disponible en: <https://www.google.com.co/maps/place/Cra.+5,+Bogot%C3%A1/@4.6093774,-74.0698922,17z/data=!3m1!4b1!4m2!3m1!1s0x8e3f9999ac47823f:0x41f91a66ba5cfd36>.

5.2.2 microzonificación de Bogotá

La microzonificación sísmica consiste en establecer zonas de comportamiento geomecánico esperado similar; de modo que puedan establecer allí recomendaciones específicas para el diseño y construcción de edificaciones. En varios terremotos recientes se ha demostrado que los efectos de un evento dado sobre las construcciones existentes en la zona dependen fundamentalmente de la respuesta de sitio que se obtenga. La cual a su vez depende de las características topográficas y geotécnicas existentes.²⁶

El proyecto está en una zona 2 según la microzonificación sísmica de Bogotá lo cual dice que la geotecnia del sector donde está ubicado el puente es piedemonte uno de los mejores suelos de la ciudad como se muestra en la (figura 5), aquí también se muestra el espectro de diseño que se utiliza en software para modelar para esta zona (figura 6).

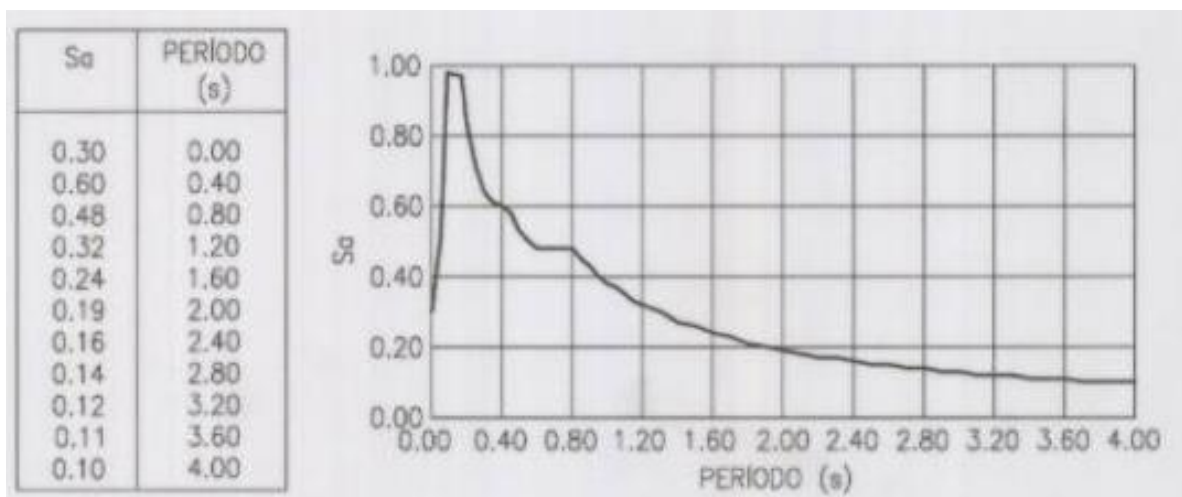
Figura 5. Mapa de microzonificación sísmica de Bogotá



²⁶ INGEOMINAS. Microzonificación sísmica de Santa fe de Bogotá. Bogotá ingeominas agosto de 1997.87 y 108 p.

²⁷ Ibid., p.108.

Figura 6. Espectro de respuesta y diseño utilizado por el IDU



Fuente: Idu²⁸

²⁸ IDU. Repositorio institucional. [En línea]. Colombia: Bogotá, 2015.[citado 10 de Ene ,2016]. Disponible en:Alcaldía mayor de Bogotá. Bogotá permanece atenta.[en línea]. Colombia: Bogotá, 2015.[citado 20 de nov ,2015]. Disponible en: <http://www.bogota.gov.co/temasdecuidad/emergencias>.

5.3 MARCO LEGAL

5.3.1 Código Colombiano Diseño Sísmico de Puentes – 95

Este código brinda las herramientas y pautas necesarias a cualquier profesional de ingeniería para el análisis y diseño de este tipo de infraestructura, esta norma que se publicó en el año 1995 la cual es una adaptación de normas internacionales principalmente American Association Of State Highway And Transportation Officials – AASHTO, que contempla los requerimientos para lograr análisis, diseño y rehabilitación toda clase de puentes fijos o móviles en cumplimiento con los parámetros sísmo-resistentes. Sin embargo en esta norma no se incluyen los parámetros de diseños mecánicos y eléctricos así como el diseño de puentes ferroviarios.

Esta norma esta descrita principalmente para estipular una serie de requerimientos mínimos para garantizar la seguridad del diseño y construcción de este tipo de infraestructura que refiere al uso público, por otra parte la norma no limita los criterios de diseñadores ni requerimientos como calidad de materiales o procesos constructivos de los mismos solo que se dé cumplimiento a todas las disposiciones de prevención contra fenómenos como lo son socavación y colisiones.

La metodología de diseño se emplea a partir del método de Diseño con Factores de Carga y Resistencia LRFD, donde se incluyen factores de mayoración de cargas para una confiabilidad estructural al igual que una reducción de resistencia de los materiales a causas de calidad de fábrica y de procesos constructivos con referencia al diseño sísmico debe estar de acuerdo con las disposiciones dadas por AASHTO en el apartado de guía de especificaciones sísmicas LRFD.

6. DISEÑO METODOLÓGICO

6.1 ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

La metodología que se emplea en esta investigación se basa en un enfoque cuantitativo, debido que se debe realizar una recolección de datos que para el caso particular se debe evaluar con modelo a escala el comportamiento que tiene el puente de la calle 26 con carrera 5 con aisladores sísmicos en sus pilas. Para ello se hace necesario utilizar una mesa vibratoria que simule un evento sísmico en el puente para lo cual se debe realizar una recolección de datos los cuales se enfocan principalmente a obtener aceleraciones y periodos causados por un fenómeno ondulatorio que simula un evento sísmico que en este caso son las principales variables para realizar la comparación del modelo a escala reducida con el de escala real evaluado con el software de análisis estructural, que permitirá evaluar si los resultados obtenidos con la mesa vibratoria son acordes a los que presenta SAP 2000.

6.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación es de tipo experimental, debido a que se someterá a prueba la hipótesis mencionada de evaluar el comportamiento del puente de la calle 26 frente a un fenómeno sísmico para lo cual se hará un modelo a escala reducida del puente actual, para someterlo a una simulación de un fenómeno sísmico en una mesa vibratoria y de esta manera obtener valores de aceleración y desplazamiento por medio de un dispositivo que permita la recepción de las variables de aceleración y periodos de oscilación de la onda causada por la mesa vibratoria y hacer una comparación con el modelo real analizado mediante el programa SAP 2000 que permitirá evaluar dos modelos: uno será el modelo de escala real sin aisladores y el otro será el modelo con la aisladores sísmicos; lo cual permitirá comparar los valores de la aceleración causada por un sismo que tenga el mismo efecto que el modelo a escala reducida y evaluar la respuesta sísmica en cada uno de los modelos y finalmente determinar de qué manera influye el uso de los aisladores sísmicos.

6.3 FASES DE LA INVESTIGACIÓN

6.3.1 Fase I

De los planos encontrados del puente se sacan las dimensiones estructurales, características del terreno, patrón de construcción y materiales a utilizar.

Se hace el diseño del modelo real en el programa sap 2000 versión 14, para evaluar el comportamiento del puente ante un sismo incluyendo aisladores y sin aisladores sísmicos.

6.3.2 Fase II

Se harán los cálculos para escalar los materiales a utilizar en el modelo mediante unas tablas encontradas en los antecedentes del proyecto.

También se escalarán las dimensiones, el coeficiente de rigidez de los aisladores y los esfuerzos del puente.

Sabiendo las escalas se procede a hacer el modelo de escala reducida donde se enfatizara en que la masa del Puente sea proporcional al modelo real.

Instalación y diseño de aisladores sísmicos a escala con propiedades de elasticidad que sean proporcional al aislador a utilizarse en el programa de análisis estructural

Para el diseño de los aisladores se hace un ensayo con distintos materiales para calcular la rigidez más cercana a la real.

Calibración de la mesa vibratoria a utilizar para obtener una mayor confiabilidad de los resultados y someter el modelo a escala reducida a una simulación de un movimiento sísmico hasta que colapse el puente

Captura de datos del modelo a escala reducida sobre la mesa vibratoria para evaluar los resultados y hacer la comparación pertinente con el modelo real.

6.3.3 Fase III

Obtener los resultados de ambos modelos evaluados en el programa y los resultados del modelo a escala reducida y realizar los cálculos para pasar los resultados de escala reducida a escala real.

Se da una conclusión por parte de como se ve afectado el modelo si se incluye aisladores para mejorar la respuesta ante un fenómeno sísmico.

7. RESULTADOS Y ANALISIS

7.1 Modelación del puente en SAP 2000

El procedimiento realizado para modelar la estructura con aisladores sísmicos en la base tanto para modelo real como escala, se presenta a continuación.

Se definieron las condiciones iniciales del modelo en este caso en blanco para proceder al uso del aplicativo bridge wizard. (Ver figura 7)

Figura 7. Tabla resumen de bridge wizard.

Bridge Modeler Wizard

Step 2: Layout Line

The first step in creating a bridge object is to define the layout line. Layout lines are reference lines used for defining the horizontal and vertical alignment of the bridge and the vehicle lanes.

Layout lines are defined using stations for distance, bearings for horizontal alignment and grades for vertical alignment. Layout lines may be straight, bent or curved both horizontally and vertically. Horizontal curves are circular with spirals, if necessary. Vertical curves are parabolic.

The Quick Start option allows you to quickly define a layout line. You can then edit the layout line as necessary.

At least one layout line and one deck section must be defined before a bridge object can be defined. Also, a layout line (or frame objects) must exist in the model before lanes can be defined.

Define/Show Layout Lines...

Summary Table

Step	Item	Description	Note
2		Layout Line	Required
3		Basic Properties	
	3.1	Materials	Required
	3.2	Frame Sections	
	3.3	Links	Advanced
4		Bridge Component Properties	
	4.1	Deck Sections	Required
	4.2	Diaphragms	
	4.3	Restrainers	
	4.4	Bearings	Required
	4.5	Foundation Springs	Required
	4.6	Abutments	Required
	4.7	Bents	

Form Layout

Step

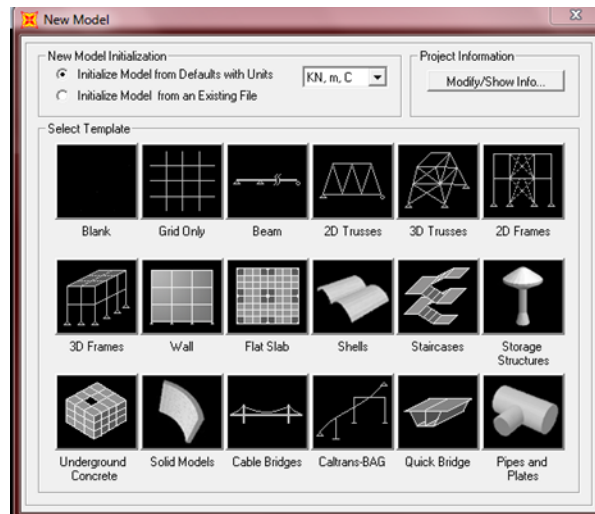
<< < 2 > >>

Close Wizard

Fuente: Autores

Se establecieron las unidades a utilizar en el modelo real Kilonewton-metros y el modelo a escala 1:100 Newton-milímetros. (Ver figura 8).

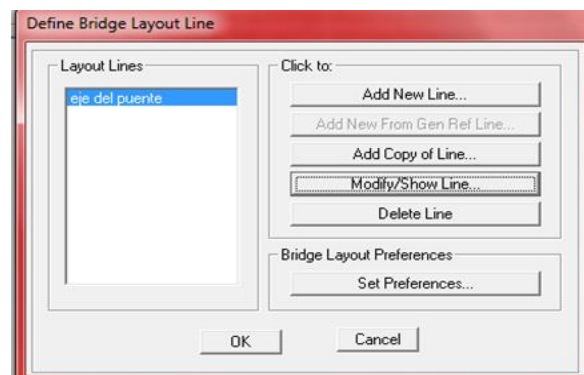
Figura 8. Selección de diseño



Fuente: Autores

Se ejecuta aplicativo bridge wizard en sap 2000 v.14, se ingresan los datos del puente como la geometría y la longitud en la opción layout line. (Ver figura 9).

Figura 9. Línea base



Fuente: Autores

Se introduce inicio y fin de la longitud del puente en la pestaña Define Vertical Layout , el tipo de curva que tiene el puente, en la opción de línea horizontal Quick Start, ahí se usa curva izquierda, se ingresa el valor del radio en la opción Define Horizontal Layout.(ver figuras 10).

Figura 10. Radio y longitud de curvatura

Bridge Layout Line - Vertical Layout Data

Bridge Layout Line Name: eje del puente

Coordinate System: GLOBAL

Quick Start Templates: Quick Start...

Layout Line Segment Data

Layout Line Segment Type	Station m	Elevation Z m	Grade Percent
1 Initial Station, Elevation Z and Grade	0	0	0
2 Constant at Previous Grade to End	114	0	0

Horizontal Layout Line Data - Quick Start

Select a Quick Start Option:

- ☐ Straight
- ☐ Straight - Bend Right
- ☐ Straight - Bend Left
- ☐ Straight - Bend Right - Bend Right
- ☐ Straight - Bend Left - Bend Left
- ☐ Curve Right
- ☒ Curve Left
- ☐ Straight - Curve Right
- ☐ Straight - Curve Left
- ☐ Curve Right - Straight
- ☐ Curve Left - Straight
- ☐ Straight - Curve Right - Straight
- ☐ Straight - Curve Left - Straight
- ☐ Straight - Curve Right - Straight - Curve Right - Straight
- ☐ Straight - Curve Left - Straight - Curve Left - Straight
- ☐ Straight - Curve Right - Straight - Curve Right - Straight
- ☐ Straight - Curve Left - Straight - Curve Left - Straight

OK Cancel

Fuente: Autores

El radio insertado en el modelo de 115,33 es obtenido del plano del IDU N° 2.

Figura 11. Introducir radio

Bridge Layout Line - Horizontal Layout Data

Bridge Layout Line Name: eje del puente

Coordinate System: GLOBAL

Quick Start Templates: Quick Start...

Layout Line Segment Data

Layout Line Segment Type	Station m	Radius m	Bearing Pt to EC
1 Initial Station and Bearing	0		NS00000E
2 Curve Left to New Bearing at Station	114	115.3366	N550000E
3 Straight at Previous Bearing to End	114		N550000E

For quick editing of an existing segment right click either a table row or a segment in the sketch below.

Layout Line Plan View (X-Y Projection) (Double Click Picture for Enlarged View)

North

Station: 0

Bearing: NS00000E

Radius: 115.3366

Grade: 0

X: 62.3595

Y: 64.8366

Z: 0

Units: KN, m, C

OK Cancel

Fuente: Autores

Se define el tipo de materiales a utilizar en el numeral 3,1 Materials, se adiciona el concreto de 4000 psi y el acero de refuerzo como se describe en el plano N° 8 del IDU. (Ver figura 12).

Figura 12. Definir materiales

The image shows two side-by-side windows of the 'Material Property Data' dialog box. The left window is for 'Concrete' material, and the right window is for 'Steel' material.

Concrete Material Properties:

- General Data: Material Name and Display Color: CONCRETO 4000Psi, Material Type: Concrete, Material Notes: Modify/Show Notes...
- Weight and Mass: Weight per Unit Volume: 24, Mass per Unit Volume: 2.4473, Units: KN, m, C
- Isotropic Property Data: Modulus of Elasticity, E: 20512081, Poisson's Ratio, U: 0.2, Coefficient of Thermal Expansion, A: 9.900E-06, Shear Modulus, G: 8546700.
- Other Properties for Concrete Materials: Specified Concrete Compressive Strength, f_c: 27579.032, Lightweight Concrete: ☐, Shear Strength Reduction Factor:
- Switch To Advanced Property Display: ☐
- Buttons: OK, Cancel

Steel Material Properties:

- General Data: Material Name and Display Color: ACERO REFUERZO ASTM A, Material Type: Steel, Material Notes: Modify/Show Notes...
- Weight and Mass: Weight per Unit Volume: 78.9729, Mass per Unit Volume: 7.849, Units: KN, m, C
- Isotropic Property Data: Modulus of Elasticity, E: 2.000E+08, Poisson's Ratio, U: 0.3, Coefficient of Thermal Expansion, A: 1.170E-05, Shear Modulus, G: 76923077.
- Other Properties for Steel Materials: Minimum Yield Stress, F_y: 419724.6, Minimum Tensile Stress, F_u: 550153.1, Effective Yield Stress, F_{ye}: 419724.6, Effective Tensile Stress, F_{ue}: 550153.1
- Switch To Advanced Property Display: ☐
- Buttons: OK, Cancel

Fuente: Autores

Se introducen las propiedades de las secciones como pilas y estribos en el numeral 3,2 Frame Sections. (Ver figura 13).

Figura 13. Propiedades de pilas y estribos

The image shows the 'Frame Properties' dialog box. It has two main sections: 'Properties' and 'Click to:'.

Properties Section:

- Find this property:
- List of properties: BRD1, BRD2, BRD3, cabezal pila (selected), estribo norte, estribo sur, PILA.

Click to: Section:

- Buttons: Import New Property..., Add New Property..., Add Copy of Property..., Modify/Show Property... (highlighted), Delete Property.

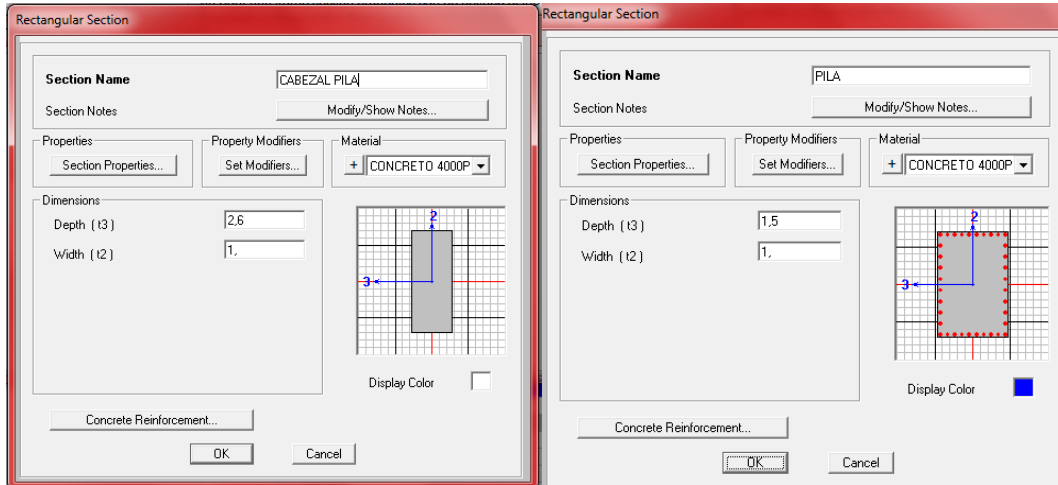
Buttons at the bottom: OK, Cancel.

Fuente: Autores

Las dimensiones y las secciones son tomadas de los planos del IDU.

En la pestaña add new property se ingresan las características de la pila y de cabeza de la pila tomadas del plano N°4 del IDU. (Ver figura 14).

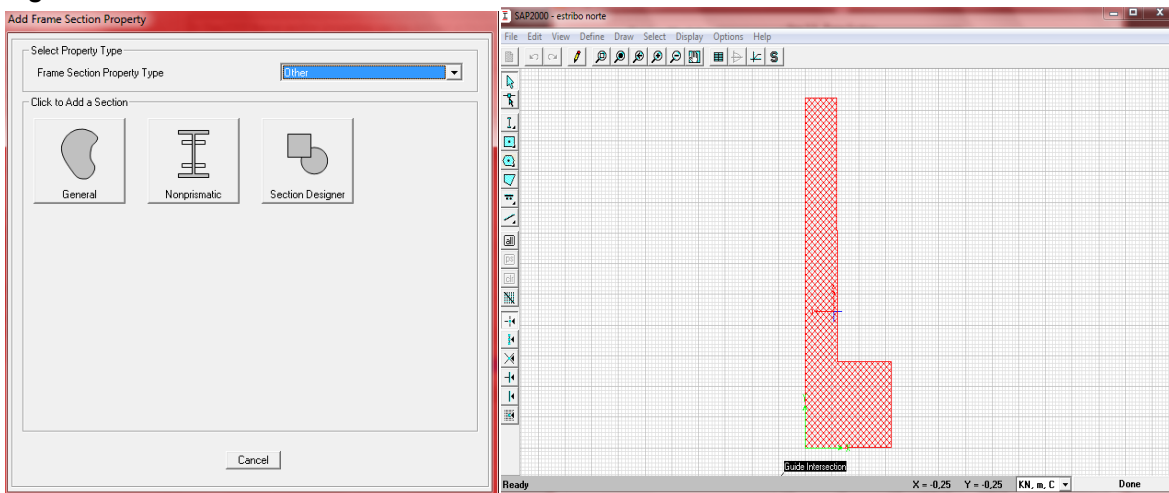
Figura 14. Crear materiales



Fuente: Autores

Como la sección estribos no está predeterminada, hay que crearla siguiendo los siguientes pasos **add new property** → se despliega de la barra la opción **other** → se elige el icono de **section designer** vuelve y se selecciona el mismo texto y se crea de acuerdo al plano N° 3 del IDU. (Ver figura 15).

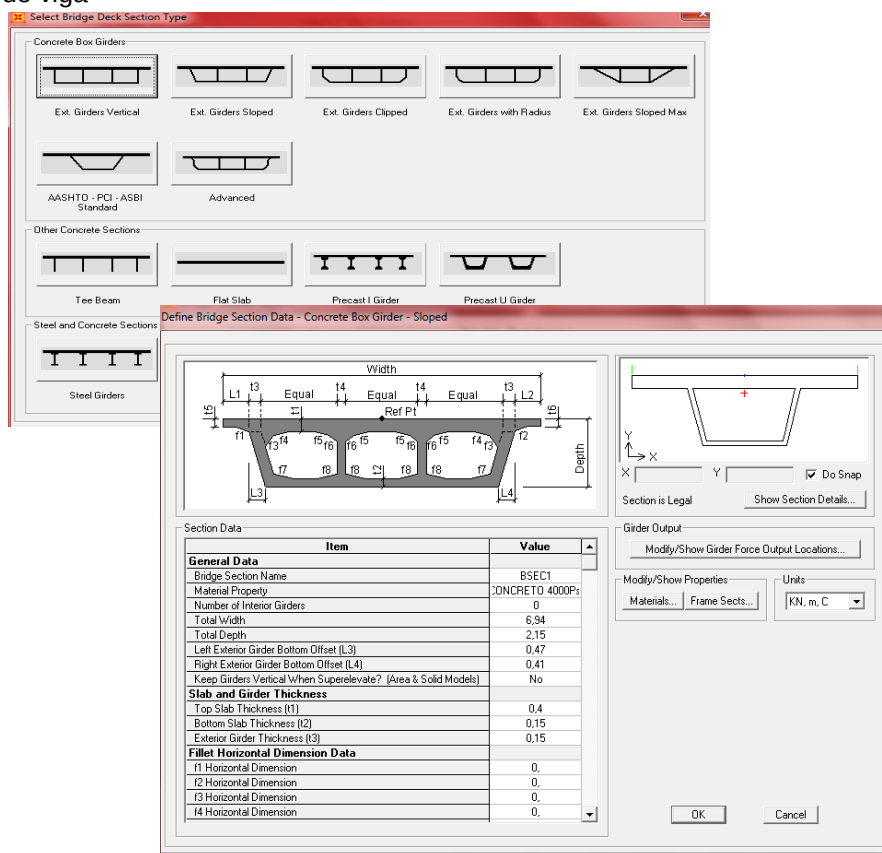
Figura 15. Creación de estribos.



Fuente: Autores

En el numeral 4,1 **deck sections** se crea la sección de la viga suministrada por el plano N° 3, se selecciona la opción de **add new section**, se elige el diseño de viga necesaria a utilizar y se adicionan las dimensiones de la misma. (Ver figura 16).

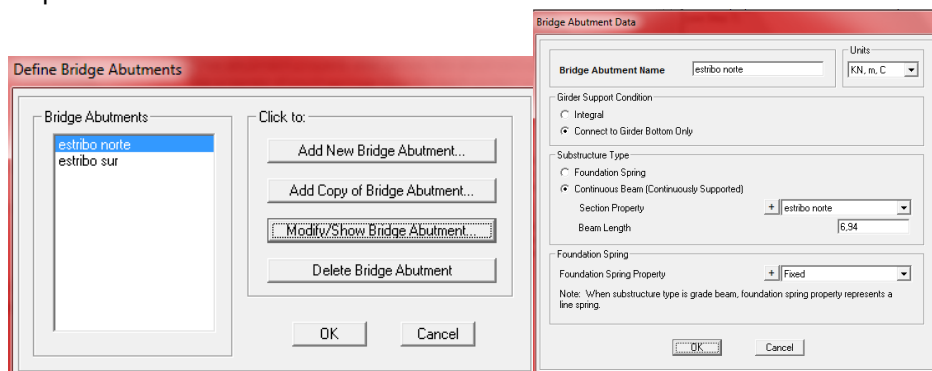
Figura 16. Selección de viga



Fuente: Autores

En el numeral 4,6 **Abutments** se define el tipo de estribo si va soportado en una estructura o en el suelo, en este caso va soportado y se va a la pestaña **add new bridge abutment** y luego se coloca que va soportado, y que es una estructura continua; posteriormente se selecciona el estribo y se adiciona el ancho de la viga canal, se hace el mismo procedimiento para ambos estribos. (Ver figura 17).

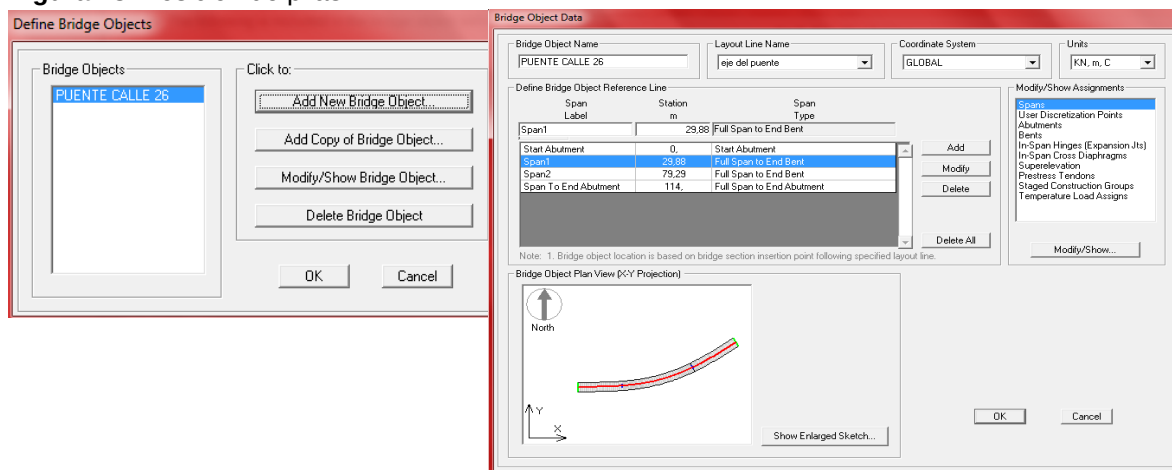
Figura 17. Tipo de estribo.



Fuente: Autores

Se selecciona la opción siguiente **Bridge object definition**, indica se pone la posición correcta de las pilas para lo cual se crea un **add new Bridge object** y se delimita el span level y la longitud a la que va la pila partiendo del estribo sur como 0 y aumentando la longitud hacia el estribo norte. (Ver figura 18).

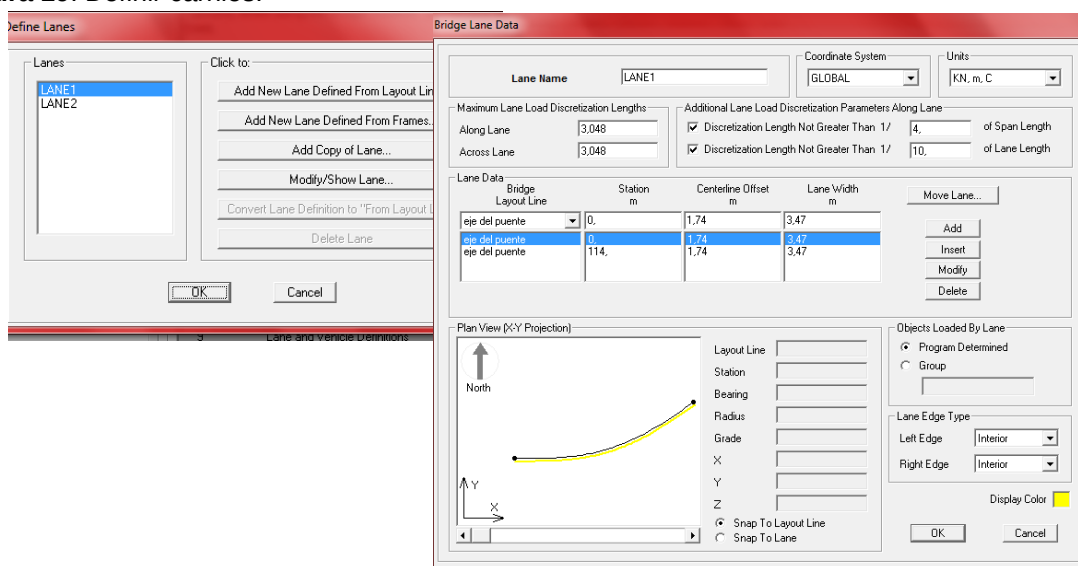
Figura 18. Posición de pilas.



Fuente: Autores

Ahora en el numeral 9 donde se definen carriles y tipo de vehículo del diseño del puente, en 9,1 se adiciona una nueva línea eje del carril, en estación se coloca el inicio 0 y el fin del puente 114 en línea central se pone la longitud del eje del carril negativo si es el de la izquierda y positivo si es el de la derecha. (Ver figura 19).

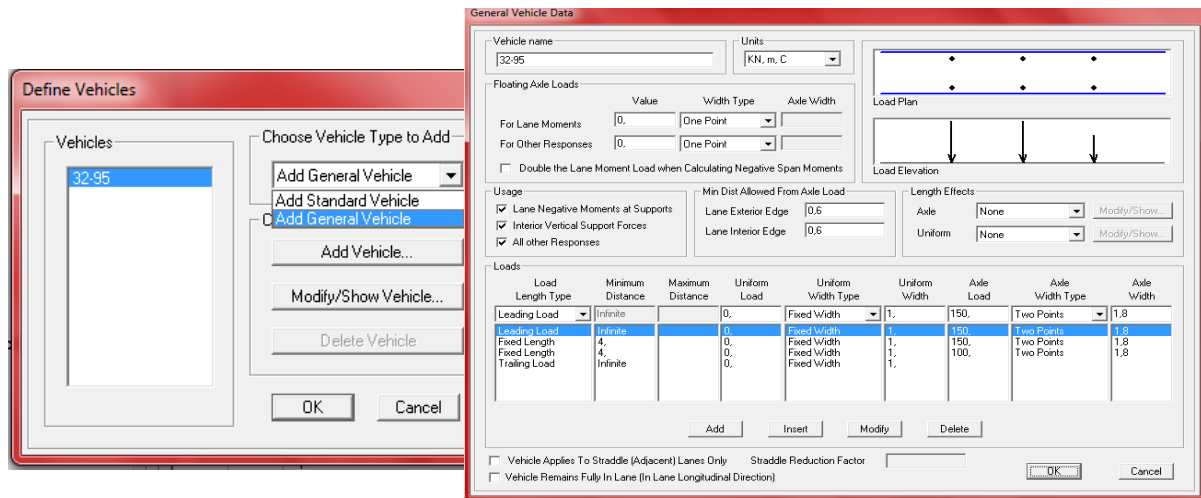
Figura 19. Definir carriles.



Fuente: Autores

En 9,2 se agrega el camión de diseño en la pestaña desplegable **add general vehicle**→click en **add vehicle** e ingresar cargas. (Ver figura 20).

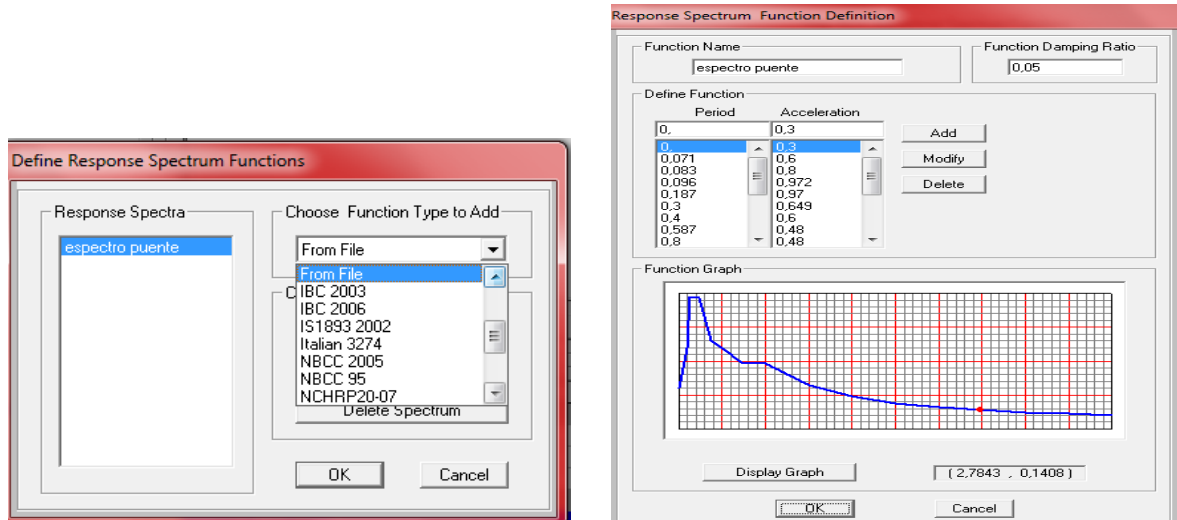
Figura 20. Agregar camión.



Fuente: Autores

Se adjunta el espectro de diseño encontrado en los planos del IDU N°8 el cual tiene los periodos y la pseudo aceleración (T vs Sa). Siguiendo los siguientes pasos ir al numeral 10,1 **Response spectrum** se despliega de la parte superior derecha la barra y se da click en **From file luego nadd new funtion** se abre una ventana y se da browse para busca el espectro de trabajo. (Ver figura 21).

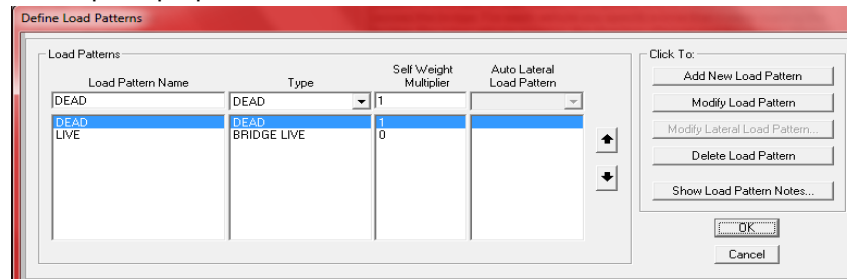
Figura 21. Insertar espectro.



Fuente: Autores

En el numeral 11 **load pattern** se define los tipos de carga del modelo, entre los casos seleccionados se encuentra el peso propio de la estructura y la carga viva vehicular. (Ver figura 22).

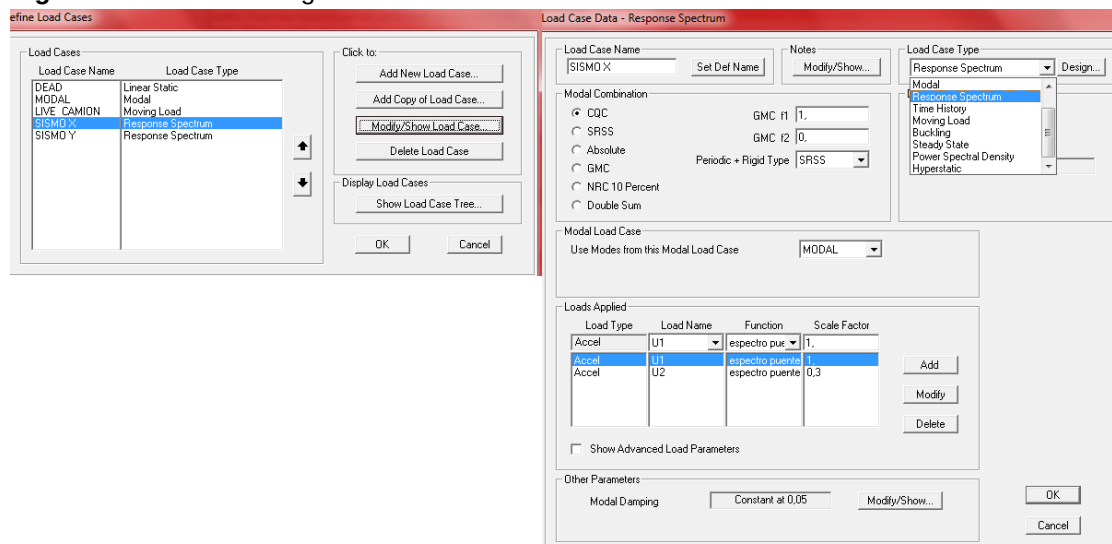
Figura 22. Definir el peso propio.



Fuente: Autores

Por último en 12,1 se adicionan las combinaciones de carga que se utiliza en el modelo para ser corrido en **add new load case** aquí se define tipos de carga como sismos y viva del camión, de la parte superior derecha se despliega las opciones, se elige una y en la tabla que sale inferior se define los factores a escala. (Ver figura 23).

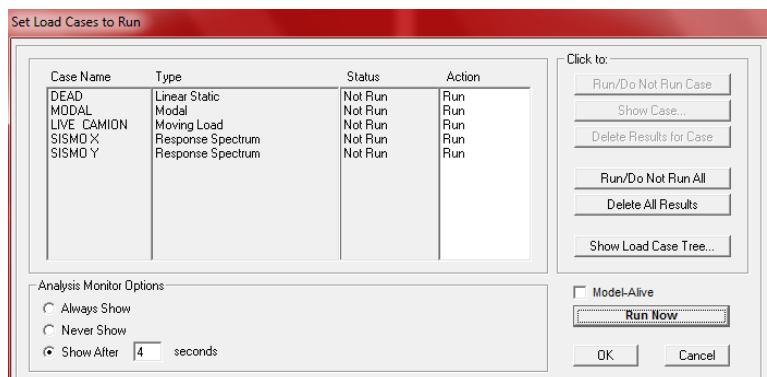
Figura 23. Casos de carga.



Fuente: Autores

Se cierra bridge wizard y ahora se procede a correr el modelo dirigiéndose hasta la pestaña **Run analyze** o oprimiendo F5 y en la ventana que sale se elige **Run now**. (Ver figura 24).

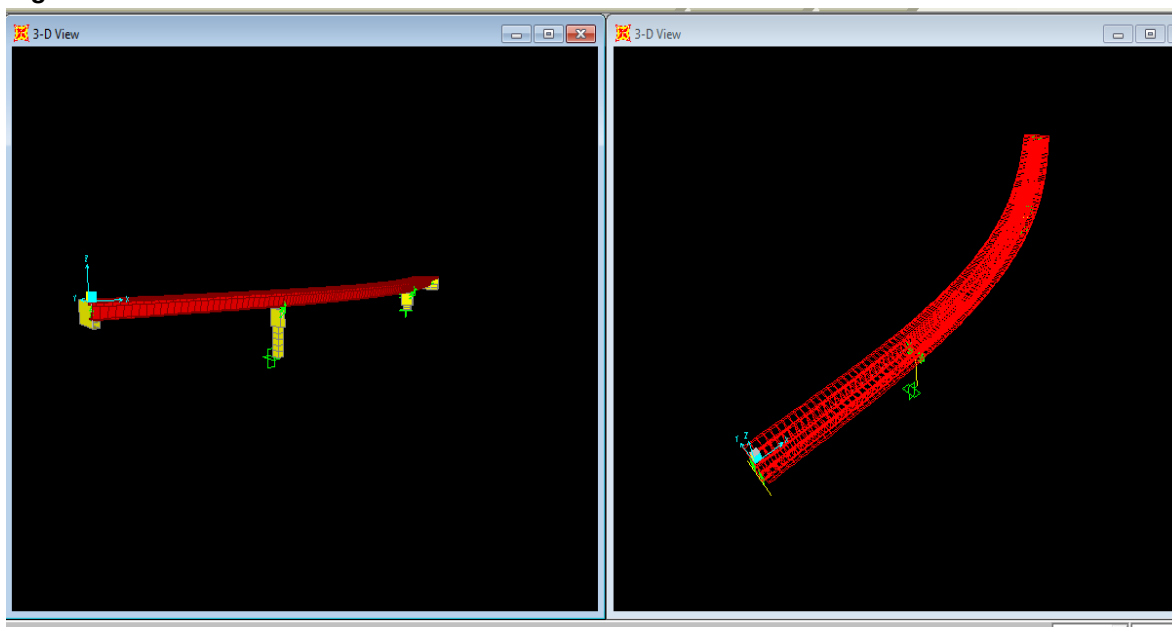
Figura 24. Correr el modelo.



Fuente: Autores

La visualización tridimensional del modelo se muestra a continuación.

Figura 25. Modelo terminado.



Fuente: Autores

Luego de ejecutar el modelo se obtiene las cargas que le llegan a las pilas lo que permite calcular los aisladores en las bases.

7.1.1. Calculo de aisladores.

Se toman los resultados calculados del software para el diseño del aislador a partir de las tablas que suministra el programa.(ver figura 26).

Figura 26. Resultados de SAP.

Modal Participating Mass Ratios

StepNum Unitless	Period Sec	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless	SumUX Unitless	SumUY Unitless	SumUZ Unitless	RX Unitless
1	0.73481	0.05669	0.40499	0.0004	0.05669	0.40499	0.0004	0.000005896
2	0.611945	0.06967	0.05132	0.05862	0.12636	0.4563	0.05902	0.00188
3	0.594199	0.09765	0.18694	0.0071	0.22401	0.64324	0.06612	0.00003114
4	0.526214	0.5796	0.03269	0.01195	0.80361	0.57593	0.07807	0.00027
5	0.475549	0.10027	0.14693	0.00942	0.90389	0.92276	0.08749	0.00435
6	0.330133	0.01015	0.00281	0.19427	0.91403	0.82556	0.28176	0.47162
7	0.257197	0.00054	0.00001607	0.38096	0.91457	0.82558	0.66272	0.06223
8	0.229645	0.000002661	0.00089	0.00001011	0.91457	0.82647	0.66273	0.00118
9	0.17636	0.00096	0.00267	0.00353	0.91953	0.82914	0.6625	0.07067
10	0.1746	0.00433	0.06402	0.00116	0.91987	0.89316	0.66741	0.00342
11	0.148201	0.00316	0.00411	0.00004494	0.92303	0.89727	0.66746	0.00066
12	0.131051	0.00006091	0.00001302	0.000005954	0.92309	0.89728	0.66746	0.00016
13	0.123949	0.00412	0.02016	0.00016	0.9272	0.91744	0.66762	0.00265
14	0.108223	0.00005092	0.00004634	0.00402	0.92726	0.91749	0.67164	0.01542
15	0.094887	0.000005494	0.00004696	0.0636	0.92726	0.91754	0.73524	0.00748
16	0.085715	0.0000865	0.000004547	0.000001507	0.92734	0.91754	0.73524	0.000003279
17	0.083836	0.00000003697	0.00001755	0.01673	0.92734	0.91756	0.75197	0.00142
18	0.079537	0.00068	0.00062	0.0000001854	0.92803	0.91818	0.75197	0.00001506
19	0.0757	0.00006969	0.000004541	0.000005184	0.9281	0.91818	0.75203	0.00000379
20	0.069869	0.00069	0.00288	0.0000000806	0.92878	0.92106	0.75203	0.00013

Fuente: Autores

De la figura 26 se toma el periodo de la estructura y de la figura 27 se toma las reacciones de pilas.

Figura 27. Resultados de SAP 2.

Joint Reactions

Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	StepType Text	F1 KN	F2 KN	F3 KN	M1 KN-m	M2 KN-m
65	COMB1	Combination	Max	4380.663	87.05	122.174	33.3248	-131.5027
65	COMB1	Combination	Min	4277.329	-77.799	15.165	-34.795	-926.0089
68	COMB1	Combination	Max	4504.365	133.13	195.963	35.4918	1685.0924
68	COMB1	Combination	Min	4396.191	-163.915	-402.689	-63.631	-816.8423
118	COMB1	Combination	Max	0.000001757	-0.001314	10.99	-1.3897	1.4813
118	COMB1	Combination	Min	-0.000001759	-0.001319	10.99	-1.3897	1.4813
119	COMB1	Combination	Max	0.000003569	0.001319	10.701	1.3174	1.4423
119	COMB1	Combination	Min	-0.000003571	0.001313	10.701	1.3174	1.4423
124	COMB1	Combination	Max	0.002272	-0.003233	18.169	-1.0264	-2.5324
124	COMB1	Combination	Min	0.002261	-0.003241	18.169	-1.0264	-2.5324
125	COMB1	Combination	Max	-0.002261	0.003241	17.691	2.6104	0.0619
125	COMB1	Combination	Min	-0.00227	0.003231	17.691	2.6104	0.0619
185	COMB1	Combination	Max	442.33	14.739	4.846	0.0076	65.9556
185	COMB1	Combination	Min	373.979	-16.841	-24.176	-0.0066	-16.8888
186	COMB1	Combination	Max	466.146	11.288	6.512	0.0099	69.7947
186	COMB1	Combination	Min	400.35	-21.53	-25.506	-0.0052	-21.6055
3202	COMB1	Combination	Max	575.428	15.253	39.848	0.009	-47.7707
3202	COMB1	Combination	Min	501.481	-5.919	14.315	-0.0033	-138.4416
3203	COMB1	Combination	Max	612.188	12.085	40.713	0.0068	-55.0516
3203	COMB1	Combination	Min	531.768	-10.554	16.353	-0.0065	-141.557

Fuente: Autores

El programa también define el centroide de la estructura como se ve en la figura 28, y de la figura 29 se toma el peso total de la estructura también obtenido por el programa después de ser ejecutado el modelo.

Figura 28. Centroides del puente.

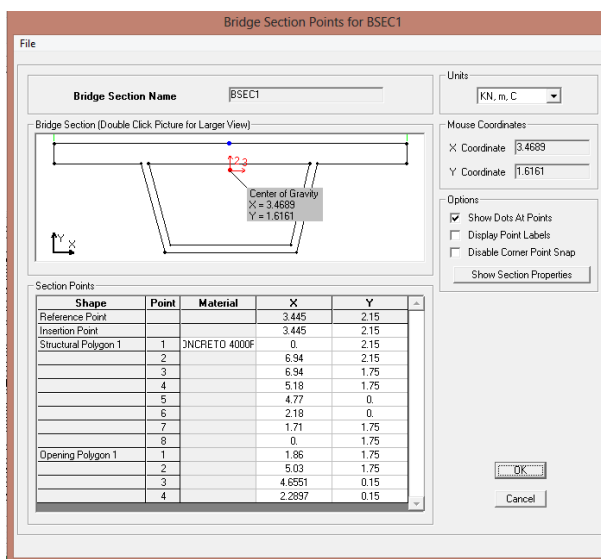


Figura 29. Pesos (w)

	Section Text	Object Type Text	NumPieces Unitless	TotalLength m	TotalWeight KN
►	estribo norte	Frame	1	6.94	200.718
	estribo sur	Frame	1	6.94	331.825
	cabezal pila	Frame	2	5.2	324.48
	PILA	Frame	7	8.3	298.8
	SOLID1	Solid			9987.898
	BFG-SS-1	Link	32		0
	BBRG1-1	Link	4		0
	BBRG1-2	Link	4		0

Fuente: Autores

Estos resultados se resumen en las siguientes tablas.

Tabla 6. Resultados de SAP.

PILA NORTE- Características iniciales puente	Unidades	Valor
Peso de la estructura W	kN	11143,72
Reacción pila P	kN	4325,99
Gravedad g	m/s^2	9,81
Periodo estructura T	s	0,1239
Dimensión corta en plata D	m	6,94
Dimensión larga en plata B	m	113,95
Distancia al elemento estudio Y	m	1,61
Excentricidad (5%) e	m	0,347
Factor de modificación de respuesta R	-	5

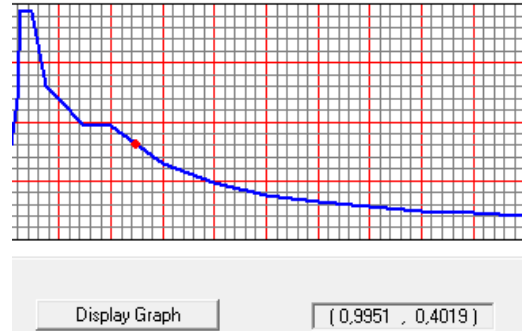
Fuente: Autores

Tabla 7. Resultados de SAP 2.

PILA SUR- Características iniciales puente	Unidades	Valor
Peso de la estructura W	kN	11143,72
Reacción pila P	kN	4449,78
Gravedad g	m/s^2	9,81
Periodo estructura T	s	0,1239
Dimensión corta en plata D	m	6,94
Dimensión larga en plata B	m	113,95
Distancia al elemento estudio Y	m	1,61
Excentricidad (5%) e	m	0,347
Factor de modificación de respuesta R	-	5

A continuación se describen los datos necesarios para el cálculo del sistema de aislación; La aceleración espectral de diseño (SD) es 0,4 g para un $t=1$ y un amortiguamiento del 5%.(ver figura 30).

Figura 30. Espectro $t=1$ y $SD=0,4g$.



$$SM = 1,5 \times SD \text{ Ecuación 13}$$

$$SM = 1,5 \times (0,4) = \mathbf{0,6g}$$

Periodo de desplazamiento de diseño ($T_D = 2,5 \text{ s}$) y Periodo de desplazamiento máximo ($T_M = 3 \text{ s}$) fueron tomados de la fema 450 parte 1.

Rigidez efectiva mínima del sistema de aislación K_{Dmin} para TD despejado de la ecuación 2.

$$K_{D \min} = \frac{w * (2\pi)^2}{(TD)^2 * g} \text{ Ecuación 14}$$

Donde w es la reacción de la pila

$$K_{D \min} = \frac{4325,99 * (2\pi)^2}{(2,5)^2 * 9,81} = \mathbf{2785,45 \frac{kN}{m}}$$

Rigidez efectiva mínima del sistema de aislación $K_M \min$ para TM despejado de la ecuación 4.

$$K_{M \min} = \frac{w * (2\pi)^2}{(TM)^2 * g} \text{ Ecuación 15}$$

$$K_{M \min} = \frac{4325,99 * (2\pi)^2}{(3)^2 * 9,81} = \mathbf{1934,34 \frac{kN}{m}}$$

De acuerdo a la **tabla 1** el coeficiente amortiguación β_m y β_d es 1 porque se toma un amortiguamiento del 5% para un espectro de diseño con un periodo de 50 años.

Desplazamiento mínimo DD, se halla con la ecuación 1.

$$D_D = \frac{9,81 * 0,4 * 2,5}{4\pi^2 * 1} = \mathbf{0,2485\ m}$$

Desplazamiento máximo DM, se halla con la ecuación 3

$$D_M = \frac{9,81 * 0,6 * 3}{4\pi^2 * 1} = \mathbf{0,4473\ m}$$

Rigidez máxima efectiva $K_{D\ max}$ para un D_D , Se considera en el caso más crítico como 1,3 veces $K_{D\ min}$.

$$K_{D\ max} = 1,3 * K_{D\ min} \text{ Ecuación 16}$$

$$K_{D\ max} = 1,3 * 2785,45 = \mathbf{3621,09\ \frac{kN}{m}}$$

Rigidez máxima efectiva $K_{M\ max}$ para un D_M , Se considera en el caso más crítico como 1,3 veces $K_{M\ min}$.

$$K_{M\ max} = 1,3 * K_{M\ min} \text{ Ecuación 17}$$

$$K_{M\ max} = 1,3 * 1934,35 = \mathbf{2514,65\ \frac{kN}{m}}$$

Desplazamiento total de diseño DTD se evaluara de acuerdo a la ecuación 5.

$$D_{TD} = 0,2485 \left(1 + 1,61 \frac{12 * 0,347}{6,94^2 + 113,95^2} \right) = \mathbf{0,2486\ m}$$

Desplazamiento total máximo DTM se evaluó de acuerdo a la ecuación 5

$$D_{TM} = 0,4473 \left(1 + 1,61 \frac{12 * 0,347}{6,94^2 + 113,95^2} \right) = \mathbf{0,4475\ m}$$

Fuerza cortante en la base V_b , se halló con la ecuación 6.

$$V_b = 3621,09 * 0,2485 = \mathbf{899,50\ kN}$$

Fuerza cortante en la estructura VS, se halla con la ecuación 7 y R_i obtenido de la ecuación 8.

$$V_s = \frac{3621,09 * 0,2485}{1,875} = 479,90 \text{ kN}$$

Estos datos se resumen en las siguientes tablas:

Tabla 8. Pila norte.

DATOS PARA CALCULO DEL SISTEMA AISLACION	Unidades	Valor
Aceleración espectral de diseño para un T = 1 y amortiguación 5 % SD	<i>g</i>	0,4
Aceleración espectral de maximo para un T = 1 y amortiguación 5 % SM	<i>g</i>	0,6
Periodo para desplazamiento de diseño TD	<i>s</i>	2,5
Periodo para desplazamiento maximo TM	<i>s</i>	3
Rigidez efectiva minima del sistema de aislacion k _{dmin} para TD	<i>kN/m</i>	2785,45549
Rigidez efectiva minima del sistema de aislacion k _{dmin} para TM	<i>kN/m</i>	1934,34409
Coeficiente amortiguacion β _m y β _d	5%	1
Desplazamiento minimo DD	<i>m</i>	0,2484902
Desplazamiento maximo DT	<i>m</i>	0,44728237
Rigidez efectiva maxima del sistema de aislacion k _{dmax} para TD	<i>kN/m</i>	3621,09214
Rigidez efectiva maxima del sistema de aislacion k _{dmax} para TM	<i>kN/m</i>	2514,64732
Desplazamiento minimo corregido D'D	<i>m</i>	0,24818559
Desplazamiento maximo corregido D'T	<i>m</i>	0,44690139
Desplazamiento total de diseño DTD	<i>m</i>	0,24861803
Desplazamiento total maximo DTM	<i>m</i>	0,44751245
Fuerza cortante en la base V _b	<i>kN</i>	899,80592
Fuerza cortante en la estructura V _s	<i>kN</i>	479,896491

Fuente: Autores

Tabla 9. Pila sur.

DATOS PARA CALCULO DEL SISTEMA AISLADOR NUCLEO DE PLOMO	Unidades	Valor
Aceleración espectral de diseño para un T = 1 y amortiguación 5 % SD	<i>g</i>	0,4
Aceleración espectral de maximo para un T = 1 y amortiguación 5 % SM	<i>g</i>	0,6
Periodo para desplazamiento de diseño TD	<i>s</i>	2,5
Periodo para desplazamiento maximo TM	<i>s</i>	3
Rigidez efectiva minima del sistema de aislacion k _{dmin} para TD	<i>kN/m</i>	2865,16246
Rigidez efectiva minima del sistema de aislacion k _{dmin} para TM	<i>kN/m</i>	1989,69615
Coeficiente amortiguacion β _m y β _d	5%	1
Desplazamiento minimo DD	<i>m</i>	0,2484902
Desplazamiento maximo DT	<i>m</i>	0,44728237
Rigidez efectiva maxima del sistema de aislacion k _{dmax} para TD	<i>kN/m</i>	3724,71119
Rigidez efectiva maxima del sistema de aislacion k _{dmax} para TM	<i>kN/m</i>	2586,605
Desplazamiento minimo corregido D'D	<i>m</i>	0,24818559
Desplazamiento maximo corregido D'T	<i>m</i>	0,44690139
Desplazamiento total de diseño DTD	<i>m</i>	0,24861803
Desplazamiento total maximo DTM	<i>m</i>	0,44751245
Fuerza cortante en la base V _b	<i>kN</i>	925,55424
Fuerza cortante en la estructura V _s	<i>kN</i>	493,628928

Fuente: Autores

7.1.2 Pre dimensionamiento del diámetro del aislador

Carga última del aislador $P_u = 4380,66$ kN esta carga es tomada de la combinación 1Died + 1 Sismo, calculada por SAP. (Ver figura 24 reacción 65).

Resistencia a la compresión máxima axial aislador $\sigma_{Ra} = 8$ MPa, este valor suministrado por fabricantes de aisladores.

El área del aislador se halla con la siguiente ecuación

$$A_a = \frac{P_u}{\sigma_{Ra}} \quad \text{Ecuación 18}$$

$$A_a = \frac{4380,66}{8000} = 0,547 \text{ m}^2$$

El diámetro del aislador es 0,835m despejado del área A_a y el diámetro comercial a utilizar es 0,95m.

Tabla 10. Características de aislador (fabricante)

Diámetro Aislador, D_i (mm)	PROPIEDADES DE DISEÑO			Desplazamiento Máximo, D_{max} (mm)	Capacidad Carga Axial P_{max} (kN)
	Rigidez Producida, K_d (kN/mm)	Resistencia Características Q_d (kN)	Rigidez a la compresión, K_v (kN/mm)		
305	0.2-0.9	0-65	>50	150	450
355	0.2-1.2	0-65	>100	150	700
405	0.3-1.6	0-110	>100	200	900
455	0.3-2.0	0-110	>100	250	1,150
520	0.4-2.3	0-180	>200	300	1,350
570	0.5-2.8	0-180	>500	360	1,800
650	0.5-3.5	0-220	>700	410	2,700
700	0.5-4.2	0-220	>800	460	3,100
750	0.7-4.7	0-265	>900	460	3,600
800	0.7-5.3	0-265	>1,000	510	4,000
850	0.7-6.1	0-355	>1,200	560	4,900
900	0.7-6.1	0-355	>1,400	560	5,800
950	0.7-6.1	0-490	>1,800	610	6,700
1000	0.8-6.3	0-490	>1,900	660	7,600
1050	0.9-6.3	0-580	>2,100	710	8,500
1160	1.1-6.5	0-665	>2,800	760	13,800
1260	1.2-6.7	0-755	>3,700	810	20,500
1360	1.4-7.0	0-890	>5,100	860	27,600
1450	1.6-7.2	0-1,025	>5,300	910	33,400
1550	1.8-7.4	0-1,025	>6,500	910	40,000

Fuente: DIS²⁹

7.1.3. Pre dimensionamiento núcleo de plomo

Carga de servicio para aislador $Q_s = (1.0 \text{ CM} + 0.3 \text{ CVC}) = 4548,1$ kN

Fuerza característica aislador $Q_d = 0,1 * Q_s = 458,1$ kN

Fuerza fluencia del aislador $f_y = 1,1 * Q_d = 1,1 * 458,1 = 500,29$ kN $\rightarrow 500291$ N

²⁹ DYNAMIC ISOLATION SYSTEMS. Products. Base Isolator.[Citado 26 de marzo de, 2016].Disponible en <http://www.dis-inc.com/products.html>.

Esfuerzo de fluencia en corte del plomo $\sigma_{yl} = 10$ MPa

Área núcleo de plomo A_p se halló con la siguiente ecuación.

$$A_p = \frac{fy}{\sigma_{yl}} = \frac{500291}{10} = 50029,1 \text{ mm}^2$$

Se despeja el diámetro del plomo y da 0,2523, se toma 0,28 diámetro de fabricante. (Ver tabla 11).

Tabla 11. Tamaño del aislador

TAMAÑO DEL DISPOSITIVO			
Diámetro Aislador, D_i (mm)	Altura Aislador, H (mm)	Número de capas de caucho, N	Diámetro del plomo, D_L (mm)
305	125-280	4-14	0-100
355	150-305	5-16	0-100
405	175-330	6-20	0-125
455	175-355	6-20	0-125
520	205-380	8-24	0-180
570	205-380	8-24	0-180
650	205-380	8-24	0-205
700	205-430	8-30	0-205
750	230-455	8-30	0-230
800	230-510	8-33	0-230
850	230-535	8-35	0-255
900	255-560	9-37	0-255
950	255-585	10-40	0-280
1000	280-635	11-40	0-280
1050	305-660	12-45	0-305
1160	330-760	14-45	0-330
1260	355-760	16-45	0-355
1360	405-760	18-45	0-380
1450	430-760	20-45	0-405
1550	455-760	22-45	0-405

Fuente: DIS³⁰

Fuerza característica aislador Q_d final se recalcula a partir del área obtenida por el fabricante.

$$A_p = \frac{(0,28)^2 * \pi}{4} = 0,061 \text{ m}^2 \rightarrow 61575,2 \text{ mm}^2$$

$$Q_d = \frac{A_p * \sigma_{yl}}{1,1} = \frac{61575,2 * 10}{1,1} = 559775 \text{ N}$$

³⁰ DYNAMIC ISOLATION SYSTEMS. PRODUCTS. Base Isolator.[Citado 26 de marzo de, 2016].Disponible en <http://www.dis-inc.com/products.html>.

7.1.4. Características - propiedades mecánicas finales aislador.

Para hallar la altura del aislador es necesario tener el valor de desplazamiento total máximo (D_{TM}) y el valor de deformación de corte directo máxima (γ_s) que para aisladores DIS es de 150% también tienen un valor de deformación máxima admisible (γ_{max}) de 250 %. Partiendo de lo anterior.

$$H = \frac{D_{TM}}{\gamma_s} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$\frac{0,4475}{150} = 0,298m \rightarrow \mathbf{298 \text{ mm}}$$

Calculo de la Rigidez horizontal del aislador (K_H) para T_D

$$T_D^2 = 2\pi \sqrt{\frac{W/g}{K_H}} \rightarrow K_H = \frac{4\pi^2 W}{T_D^2 g}$$

$$K_{H \text{ TOTAL}} = \frac{4\pi^2 * 11147,72}{2,5^2 * 9,81} = \mathbf{7175,31 \frac{kN}{m}}$$

Después de ser hallada la rigidez total se divide entre el número de aisladores necesarios en la estructura los cuales son 2 de esta manera se sabe cuál va a ser la rigidez para cada aislador.

$$K_H = \frac{7175,31}{2} = \mathbf{3587,66 \frac{kN}{m}}$$

Calculo del espesor total de la goma está relacionado con el desplazamiento básico de diseño D_D y al igual que la altura del aislador con la deformación de corte directo γ_s .

$$H_r = \frac{D_D}{\gamma_s} \rightarrow H_r = \frac{0,2485}{150} = \mathbf{0,1656m}$$

Teniendo este valor se procede a calcular el área neta de la goma que la diferencia del área del aislador y el área del plomo.

$$A = 0,7088 - 0,0616 = \mathbf{0,6472 \text{ m}^2}$$

Módulo de corte de la goma (G) necesita tener los valores del área neta de la goma, el módulo de rigidez horizontal de cada aislador y el espesor total de la goma para ser calculada de la siguiente ecuación.

$$G = \frac{K_H * H_r}{A} \quad \text{Ecuación 20}$$

$$G = \frac{358766 * 1656}{0,6472} = 918,25 \frac{kN}{m} \rightarrow 0,9182 N/mm$$

Para el cálculo del espesor de la capa de la goma se toman 10 mm que lo que recomienda el grupo Holmes en la guía de diseño³¹, el número de capas de goma son 17 partiendo del espesor total de la goma (Hr). Teniendo las 17 capas se multiplican por los 10 mm de espesor de cada capa y se recalcula el espesor de la goma que ahora será de 170mm.

Ahora para el espesor de las placas de acero **ts** se toma una base de 5mm, luego se procede a hacer la comprobación del valor para el espesor elegido, determinando la tensión máxima de compresión σ_{ac} que para los distribuidores DIS es de 8MPa (8N/mm²).

Posterior a esto se halla la tensión máxima de tracción en la base teniendo en cuenta los valores de la goma y en el acero respecto a la tensión máxima de compresión. Finalmente se calcula el valor de la tensión admisible σ_{adm} con base al valor de tensión a fluencia del acero σ_y y se realiza una comparación entre los valores calculados de tensión máxima a la compresión y la tensión admisible.

Cálculo de la tensión máxima a la tracción

$$\sigma_s = 1,5 \frac{tr}{ts} \sigma_{ac} \quad \text{Ecuación 21}$$

$$\sigma_s = 1,5 \frac{10}{5} * 8 = \mathbf{24 N/mm^2}$$

Se toma un σ_y de 3165 kg/cm² para el cálculo de la tensión admisible

$$\sigma_{adm} = 0,75 * \sigma_y \quad \text{Ecuación 22}$$

$$\sigma_{adm} = 0,75 * (3165 * 0,0980665) = \mathbf{232,79 N/mm^2}$$

³¹ Holmes Consulting Group.Ltd. Base Isolation of Structures Design Guidelines .Nueva Zelanda.

Comparando los valores de tensión máxima a tracción y la tensión admisible

$$\sigma_s \leq \sigma_{adm} \rightarrow \text{Cumple.}$$

Revisión de la rigidez horizontal de cada aislador.

Teniendo ya los valores del módulo de corte de la goma y la altura total de la goma se calcula de la siguiente ecuación.

$$K_H = \frac{G * A}{H_r} \quad \text{Ecuación 23}$$

$$K_H = \frac{0,9182 * 0,6472 * 1000000}{170} = 3496,0649 \frac{kN}{m}$$

7.1.5 Determinación y resumen de las propiedades del aislador

Acá se recogen todas las propiedades del aislador que sirven para su modelación.

Teniendo los valores de módulo de corte (G), área neta (A) y la altura de la goma (Hr) se puede hallar la Rigidez post fluencia (K_2) con la siguiente ecuación.

$$K_2 = \frac{fl * G * A}{H_r} \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde fl es = 1,15

$$K_2 = 1,15 * 3496,0649 = 4020,479 \frac{kN}{m}$$

Segundo calculando el valor de Rigidez inicial o Rigidez elástica.

$$K_1 = 10K_2 \quad \text{Ecuación 25}$$

$$K_1 = 40204,793 \text{ KN/m}$$

Tercero teniendo K_1 Y K_2 y con el valor obtenido de la fuerza característica Q_d se calcula el desplazamiento a fluencia D_y .

$$D_y = \frac{Q}{K_1 - K_2} \quad \text{Ecuación 26}$$

$$D_y = \frac{559775/1000}{40204,793 - 4020,479} = 0,015 \text{ m}$$

Cuarto se define el valor de fuerza de fluencia f_y

$$F_y = Q + K_2 * D_y \quad \text{Ecuación 26}$$

$$F_y = \frac{559775}{1000} + 4020,479 * 0,015 = 621,971 \text{ kN}$$

Quinto se efectúa la siguiente fórmula para hallar la rigidez efectiva k_{eff}

$$k_{eff} = k_2 + \frac{Q}{D_{TM}} \quad \text{Ecuación 27}$$

$$k_{eff} = 4020,479 + \frac{559775/1000}{0,447} = 5271,337 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Sexto se calcula el módulo de corte efectivo G_{eff}

$$G_{eff} = \frac{K_{eff} * H_r}{A} \quad \text{Ecuación 28}$$

$$G_{eff} = \frac{5271,337 * 170/1000}{0,647} = 1384,522 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Séptimo con ayuda del diámetro $\emptyset$ y el espesor de la capa de goma se halla el factor de forma (s) que corresponde a un valor adimensional.

$$s = \frac{\emptyset}{4t} \quad \text{Ecuación 29}$$

$$s = \frac{0,8349}{4 * 0,9182} = 208,746$$

Octavo se halla el módulo de compresión (módulo de elasticidad del conjunto de láminas de caucho y acero) E_c y tomando de la norma AASHTO. 2010 un módulo de compresibilidad del caucho (K) de 1500 MPa para reemplazarlo en la siguiente relación:

$$E_c = \frac{6 * G * S^2 K}{6 * G * S^2 + K} \quad \text{Ecuación 30}$$

$$E_c = \frac{6 * 0,9182 * 208,756^2 * 1500}{6 * 0,9182 * 208,756^2 + 1500} = 1490,686 \text{ MPa}$$

Noveno después de ser calculado el módulo de compresión E_c se puede determinar la rigidez vertical (K_v) de la siguiente manera.

$$K_v = \frac{E_c * A}{H_r} \text{ Ecuación 31}$$

$$K_v = \frac{1490,686 * 1000 * 0,647}{170} = 5824223,224 \frac{kN}{m}$$

Se halla el amortiguamiento efectivo del sistema (β_{efff}) partiendo de la siguiente expresión.

$$\beta_{efff} = \frac{2 * Q(D_{TM} - D_y)}{\pi * K_{efff} * D_{TM}^2} \text{ Ecuación 32}$$

$$\beta_{efff} = \frac{2 * 559775/1000(0,4475 - 0,015)}{\pi * 5271,337 * 0,4475^2} = 15\%$$

Los datos de las pilas norte y sur se resumen en las tablas mostradas a continuación.

Tabla 12. Pila norte

PREDIMENSIONAMIENTO DIAMETRO AISLADOR	Unidades	Valor
Carga ultima diseño de aisladores Pu (tabla a.3.12-1 grupo vii)	kN	4380,66
Resistencia a la compresion maxima axial aislador σ_{Ra}	MPa	8
Área aislador Aa	m ²	0,5475825
Diametro ϕ	m	0,83498724
Diametro comercial a utilizar ϕ	m	0,95
PREDIMENSIONAMIENTO NUCLEO DE PLOMO		
Carga de servicio para aislador (1.0 cm + 0.3 cvc) Qs	kN	4548,1
Fuerza característica aislador Qd	N	454810
Fuerza fluencia del aislador Fy	N	500291
Esfuerzo de fluencia en corte del plomo σ_{yl}	MPa	10
Área nucleo de plomo Ap	mm ²	50029,1
Diametro nucleo de plomo Dl	m	0,25238666
Diametro plomo fabricante	m	0,28
Fuerza característica aislador Qd final	N	559775

CARACTERISTICAS - PROPIEDADES MECANICAS FINALES AISLADOR AISLADOR		
Deformacion corte directo maxima del aislador γ_s	%	150%
Altura aislador H	m	0,29834163
Cantidad de aisladores estructura	-	2
Rigidez horizontal del aislador KH para TD	kN/m	3587,65694
Espesor total de la goma Hr	m	0,16566014
Área neta de goma	m ²	0,64724663
Modulo de corte de la goma G	N/mm ²	0,91824617
Espesor capa de goma Tr	mm	10
Número de capas de goma	-	17
Altura goma aislador Hr final	mm	170
Espesor de las placas de acero Ts	mm	5
Altura placas de acero	mm	80
Espesor placas superior e inferior aislador	mm	24,17
Tension maxima a compresion placa de acero σ_{ac}	N/mm ²	8
Tension maxima a traccion placa de acero σ_s	N/mm ²	24
Tension de fluencia σ_s (acero calidad astm a-572-gr 50)	kg/cm ²	3165
tension admisible placa acero σ_{adm}	N/mm ²	232,79
Rigidez horizontal del aislador KH real	kN/m	3496,06902
Rigidez post fluencia K2	kN/m	4020,47937
Rigidez elastica K1	kN/m	40204,7937
Desplazamiento de fluencia Dy	m	0,01547009
Fuerza de fluencia final Fy	kN	621,971879
Rigidez efectiva Keff	kN/m	5271,33775
Modulo de corte efectivo Geff	kN/m	1384,52234
Factor de forma del aislador S	-	208,74681
Modulo de compresibilidad del caucho K	MPa	1500
Modulo de elasticidad del conjunto de laminas de caucho y acero	MPa	1490,68619
Rigidez vertical del aislador kv	kN/m	5824223,22
Amortiguamiento efectivo del sistema β_{eff}	%	15%

Fuente: Autores

Tabla 13. Pila sur

PREDIMENSIONAMIENTO DIAMETRO AISLADOR	Unidades	Valor
Carga ultima diseño de aisladores Pu (tabla a.3.12-1 grupo vii)	<i>kN</i>	4504,36
Resistencia a la compresion maxima axial aislador σ_{Ra}	<i>MPa</i>	8
Área aislador A_a	<i>m</i> ²	0,563045
Diametro ϕ	<i>m</i>	0,84669425
Diametro comercial a utilizar ϕ	<i>m</i>	0,95
PREDIMENSIONAMIENTO NUCLEO DE PLOMO		
Carga de servicio para aislador (1.0 cm + 0.3 cvc) Qs	<i>kN</i>	4666
Fuerza característica aislador Qd	<i>N</i>	466600
Fuerza fluencia del aislador Fy	<i>N</i>	513260
Esfuerzo de fluencia en corte del plomo σ_{yl}	<i>MPa</i>	10
Área nucleo de plomo A_p	<i>mm</i> ²	51326
Diametro nucleo de plomo D _I	<i>m</i>	0,25563703
Diametro plomo fabricante	<i>m</i>	0,28
Fuerza característica aislador Qd final	<i>N</i>	559775
CARACTERISTICAS - PROPIEDADES MECANICAS FINALES AISLADOR AISLADOR		
Deformacion corte directo maxima del aislador γ_s	%	150%
Altura aislador H	<i>m</i>	0,29834163
Cantidad de aisladores estructura	-	2
Rigidez horizontal del aislador KH para TD	<i>kN/m</i>	3587,65694
Espesor total de la goma Hr	<i>m</i>	0,16566014
Área neta de goma	<i>mm</i> ²	0,64724663
Modulo de corte de la goma G	<i>N/mm</i> ²	0,91824617
Espesor capa de goma Tr	<i>mm</i>	8
Número de capas de goma	-	21
Altura goma aislador Hr final	<i>mm</i>	168
Espesor de las placas de acero Ts	<i>mm</i>	5
Altura placas de acero	<i>mm</i>	100
Espesor placas superior e inferior aislador	<i>mm</i>	15,17
Tension maxima a compresion placa de acero σ_{ac}	<i>N/mm</i> ²	8
Tension maxima a traccion placa de acero σ_s	<i>N/mm</i> ²	19,2
Tension de fluencia σ_s (acero calidad astm a-572-gr 50)	<i>kg/cm</i> ²	3165
tension admisible placa acero σ_{adm}	<i>N/mm</i> ²	232,79
Rigidez horizontal del aislador KH real	<i>kN/m</i>	3537,68889
Rigidez post fluencia K2	<i>kN/m</i>	4068,34222
Rigidez elastica K1	<i>kN/m</i>	40683,4222
Desplazamiento de fluencia Dy	<i>m</i>	0,01528809
Fuerza de fluencia final Fy	<i>kN</i>	621,971879
Rigidez efectiva K _{eff}	<i>kN/m</i>	5319,2006
Modulo de corte efectivo G _{eff}	<i>kN/m</i>	1380,65718
Factor de forma del aislador S	-	264,591954
Modulo de compresibilidad del caucho K	<i>MPa</i>	1500
Modulo de elasticidad del conjunto de laminas de caucho y ace	<i>MPa</i>	1494,18924
Rigidez vertical del aislador kv	<i>kN/m</i>	5837909,89
Amortiguamiento efectivo del sistema β_{eff}	%	14%

Fuente: Autores

7.1.6. Cálculo de propiedades del neopreno – estribos

NORMATIVA “AASHTO. 2010. Guide Specifications for Seismic Isolation Design, Second Edition, GSID-3. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.”

En el siguiente apartado se mostrara el respectivo procedimiento que se empleó para el cálculo de las propiedades de un apoyo tipo neopreno o resortes equivalente empleada a partir de la normativa AASTHO.

El primer paso para determinar la propiedades del neopreno es elegir el tipo de neopreno que se desea para el apoyo, la clasificación está asociada a la dureza del neopreno descrita en Artículo 642 – 13 de la normativa INVIAS capítulo 6 de estructuras y drenajes donde describe los tipos de neoprenos.

Tabla 14. Propiedades del elastómero para diferentes durezas

CARACTERÍSTICA	DUREZA SHORE		
	50	60	70
Módulo cortante a 23° C (kg/cm²)	6.65 - 9.10	9.10 - 14	14 - 21
Deformación por flujo plástico en 25 años dividida por deformación instantánea (%)	25 %	35 %	45 %
k (Constante dependiente de la dureza del elastómero)	0.75	0.60	0.55

Fuente: INVIAS³²

La normativa empleada recomienda para estructuras tipo puente el uso del neopreno con características de dureza SHORE 60, por lo cual se opta para este caso emplear este tipo de neopreno; Luego de elegir el tipo de neopreno se determina el Modulo Cortante con el rango de esta característica mostrado en la tabla 14.

$$G = \frac{9.1 + 14}{2} = 11.55 \text{ Kg/cm}^2$$

³² INVIAS. Especificaciones Invias 2013. Apoyos y sellos para juntas de puentes. Capítulo 6 Art 642.pg5.

Calculado el módulo de corte se procede a definir las medidas de longitud del apoyo en sentido longitudinal y transversal del tablero del puente, se escogieron las siguientes medidas.

$$L = 60 \text{ cm}$$

$$B = 60 \text{ cm}$$

Definido los valores en planta del apoyo se procede a calcular el área del neopreno:

$$A_n = 60 * 60 = 3600 \text{ cm}^2$$

La altura del neopreno se define con las siguientes tablas al igual que el espesor de cada una de las capas de neopreno.

Tabla 15. Espesor recomendable de las capas de elastómero para los apoyos tipo B y C

Dimensiones de planta	100 x 100	100 x 150	100 x 200	150 x 200	150 x 250	150 x 300	200 x 250	200 x 300	250 x 300	250 x 400	300 x 400
espesor de cada capa de elastómero (mm)	8	8	8	8	8	8	8	8	10	10	10
dimensiones en planta	300 x 500	350 x 500	400 x 500	500 x 500	500 x 600	600 x 600	600 x 700	700 x 700	700 x 800	800 x 800	900 x 900
espesor de cada capa de elastómero (mm)	10	10	10	10	10	12	12	12	12	12	12

Fuente: FRINGENIERIA³³

Tabla 16. Numero de capas interiores apoyos tipo B de acuerdo con los espesores de cada capa recomendado.

Dimensiones de planta	100 x 100	100 x 150	100 x 200	150 x 200	150 x 250	150 x 300	200 x 250	200 x 300	250 x 300	250 x 400	300 x 400
Número maximo de capas	1	1	1	2	2	2	4	4	4	4	5
dimensiones en planta	300 x 500	350 x 500	400 x 500	500 x 500	500 x 600	600 x 600	600 x 700	700 x 700	700 x 800	800 x 800	900 x 900
Número maximo de capas	5	6	7	9	9	9	9	10	10	12	14

Fuente: FRINGENIERIA³⁴

³³ FRINGENIERIA. Descargas. [citado 18 marzo,2016]. Disponible en <http://www.fringenieria.com/descargas/D%20y%20C%20de%20apoyos%20de%20neopreno%20convencionales.pdf>. Pg 2.

Con el número de capas definido y la dimensión de las mismas se calcula la altura del apoyo a partir de la suma de la altura del neopreno y de dos láminas de soporte de mínimo espesor 12 mm.

$$HN = 1.2 * 0.9 = 10.8 \text{ cm} \approx 12 \text{ cm}$$

$$HT = 12 + (2 * 1.5) = 15 \text{ cm}$$

Luego se procede a calcular la deformación por corte del neopreno que consta según la normativa de dividir una deformación unitaria patrón de 1" entre la altura del neopreno.

$$\Delta\delta = \frac{2.54}{12} = 0.2116$$

Definida la deformación por corte se calcula el esfuerzo de corte del neopreno que se define el producto del módulo de corte con la deformación por corte.

$$Vb = 0.2116 * 11.55 = 2.4447 \text{ kg/cm}^2$$

Obtenido el esfuerzo se halla la fuerza cortante multiplicando el esfuerzo por el área transversal del neopreno.

$$V = 2.4447 * 3600 = 8080.92 \text{ kg}$$

Ahora se calcula la propiedad de rigidez horizontal del neopreno que resulta de dividir la fuerza cortante con la deformación unitaria patrón.

$$KHN = \frac{8080.92}{2.54} = 3463.9 \text{ Kg/cm}$$

Con la máxima carga axial de diseño con la combinación de carga 1.0 CM + 0.3 CV de ambos estribos del puente se procede a calcular las propiedades de la rigidez traslacional vertical del neopreno en primer caso se calcula el esfuerzo a compresión del neopreno que se calcula dividiendo la carga máxima con el área del neopreno.

$$\sigma c = \frac{70905.87}{3600} = 19.696 \text{ Kg/cm}^2$$

Se procede luego a calcular el factor de forma del neopreno que es una relación de áreas y espesores del mismo.

³⁴ FRINGENIERIA. Descargas. [citado 18 marzo,2016]. Disponible en <http://www.fringenieria.com/descargas/D%20y%20C%20de%20apoyos%20de%20neopreno%20convencionales.pdf>. Pg 2.

$$S = \frac{B + L}{2 * HN(B + L)} = \frac{600 * 600}{2 * 12 * (600 + 600)} = 12.5$$

Luego se procede al calcular el Módulo de Young que resulta de dividir el esfuerzo de compresión del neopreno con la deformación unitaria del neopreno que se describe que está en el orden de $\epsilon = 0.02$

$$Ec = \frac{19.696}{0.02} = 984.8 \text{ Kg/cm}^2$$

Por último se calcula la rigidez vertical del aislador que resulta de multiplicar el módulo de elasticidad con el área del neopreno y dividir entre el espesor del neopreno.

$$Kv = \frac{3600 * 948.8}{12} = 284640 \text{ Kg/cm}$$

En la siguiente tabla se muestran los resultados consolidados de las propiedades del apoyo tipo resorte o neopreno con unidades de N, mm, C para ingresar posteriormente al programa SAP 2000 de igual manera se encuentran las propiedades de rigidez efectiva vertical y horizontal a escala 1:100 para el prototipo.

Tabla 17. Resultados del neopreno

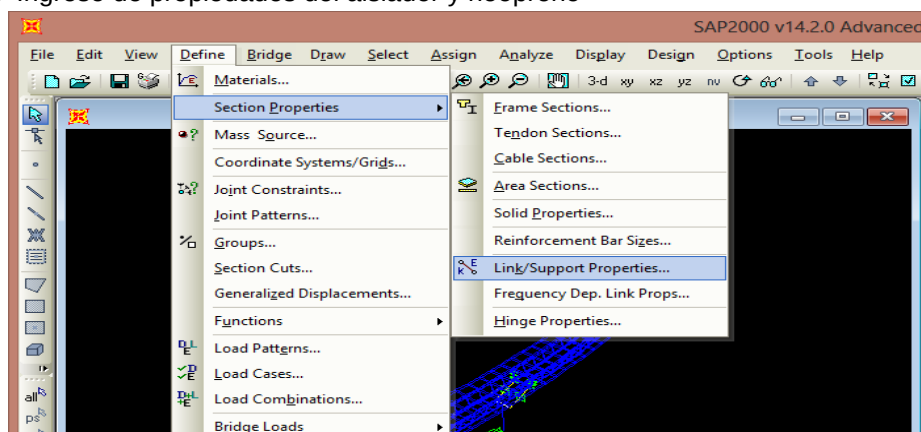
CALCULO DE PROPIEDADES NEOPRENO- AASHTO. 2010. Guide Specifications for Seismic Isolation Design, Second Edition, GSID-3. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.		
	Unidades	Valor
Tipo de neopreno	-	SHORE 60
Modulo de corte	MPa	1,155
Dimension del apoyo en el sentido longitudinal del puente L	mm	600
Dimension del apoyo en el sentido transversal del puente B	mm	600
Área del apoyo neopreno AN	mm ²	360000
Altura total apoyo Ht	mm	150
Altura total neopreno HN	mm	120
Altura capa neopreno		12
Deformacion unitaria horizontal para (1") Δb	mm	25,4
Deformacion por corte del neopreno	-	0,21166667
Esfuerzo de corte Vb	MPa	0,244475
Fuerza cortante V	N	88011
Rigidez traslacional horizontal neopreno KHN	N/mm	3465
Reaccion maxima del apoyo - estribo Pe	N	695349,04
Esfuerzo de compresion del neopreno Σn	MPa	1,93152511
Factor de forma del neopreno SN	-	12,5
Deformacion unitaria a compresion εc		0,02
Modulo de young Ec	MPa	96,5762556
Rigidez traslacional vertical neopreno KVN	N/mm	289728,767
PARA MODELO ESCALA NEOPRENO MODELACION LINEAL NEOPRENO		
Rigidez traslacional horizontal escala KHN	N/mm	34,65
Rigidez traslacional vertical escala KVN	N/mm	2897,28767

Fuente: Autores

7.1.7 Ingreso de datos aisladores sísmicos y apoyo de neopreno al programa SAP 2000.

Luego de tener en su totalidad todos los parámetros del aislador sísmico para las pilas del puente y del apoyo de neopreno para los estribos se ingresan los valores de rigidez para ambos sistemas de apoyos.

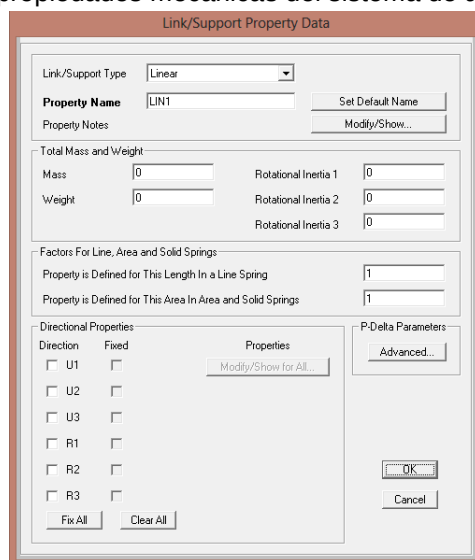
Figura 31. Ingreso de propiedades del aislador y neopreno



Fuente: Autores

En la imagen se aprecia la ruta para el ingreso de la propiedad Link/Support Properties, opción cuya función permite definir las propiedades de los apoyos. Seguido a seleccionar la opción se define una nueva propiedad con lo cual aparecerá la ventana que permitirá definir el apoyo.

Figura 32. Características y propiedades mecánicas del sistema de aislación.



Link/Support Type	
Linear	

Property Name	
LIN1	

Total Mass and Weight	
Mass	0
Weight	0

Rotational Inertia	
Rotational Inertia 1	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
U1	☐
U2	☐
U3	☐
R1	☐
R2	☐
R3	☐

P-Delta Parameters	
Advanced...	

Fuente: Autores

Luego se procede a seleccionar e ingresar los datos de cada uno de los apoyos anteriormente calculados, luego cada tipo de apoyo tiene características y propiedades mecánicas y un sistema de análisis que los diferencian.

7.1.7.1 Apoyo neopreno tipo resorte

Estos apoyos son una definición de tipo lineal la ventana tiene diferentes opciones de apoyos como lineal, amortiguador, aislador neopreno, aislador tipo fricción entre otros donde se pueden seleccionar análisis lineales, elásticos y no lineal.

Figura 33. Datos del neopreno.

The figure shows two screenshots of the 'Link/Support Property Data' dialog box. The left screenshot shows the 'Linear' type selected, with 'Property Name' set to 'NEOPRENO'. The right screenshot shows the same dialog with 'Property Name' set to 'NEOPRENO' and 'Rotational Inertia 1' and 'Rotational Inertia 2' set to 1.000E-03 and 1.000E-06 respectively.

Fuente: Autores

Seguido a esto se eligen las direcciones en las que se incluirán estos valores de rigidez para el caso del neopreno se elige solamente en la dirección U2 y U3.

Figura 34. Direcciones en las que trabaja el neopreno

The figure shows a screenshot of the 'Linear Link/Support Directional Properties' dialog box. The 'Link/Support Name' is 'NEOPRENO'. The 'Directional Control' section shows 'U2' and 'U3' selected. The 'Stiffness Values Used For All Load Cases' section shows 'U2' with a value of 3465 and 'U3' with a value of 289728.77. The 'Damping Values Used For All Load Cases' section shows 'U2' and 'U3' with values of 0.

Fuente: Autores

En la siguiente tabla se muestran los valores ingresados al programa para el apoyo tipo neopreno para los estribos del puente, los valores ingresados son la rigidez horizontal en la dirección U2 y la rigidez vertical en la dirección U3.

Tabla 18. Escala reducida

PARA MODELO ESCALA NEOPRENO MODELACION LINEAL NEOPRENO		
RIGIDEZ TRASLACIONAL HORIZONTAL ESCALA K_{HN}	N/mm	34.65
RIGIDEZ TRASLACIONAL VERTICAL ESCALA K_{VN}	N/mm	2897.28767

Tabla 19. Escala real

PARA ESCALA REAL NEOPRENO MODELACION LINEAL NEOPRENO		
RIGIDEZ TRASLACIONAL HORIZONTAL K_{HN}	N/mm	3465
RIGIDEZ TRASLACIONAL VERTICAL K_{VN}	N/mm	289728.767

7.1.7.2 Apoyo aislador sísmico

Para ingresar los datos del aislador sísmico hay que identificar primero que el análisis de estos tipos de apoyos son lineal- elástico – no lineal por lo cual se deben ingresar las variables que caracterizan el aislador que es lineal y no lineal. Como primer paso se debe seleccionar el tipo de apoyo “RUBBER ISOLATOR”

Figura 35. Tipo de análisis en los apoyos.

Fuente: Autores

En el siguiente cuadro se muestra los valores a ingresar en cada una de las ventanas del programa tanto para análisis lineal como un análisis no lineal. Para U3 y U2 que equivalen a los ejes Z y X.

Figura 36. Tipo de análisis.

The figure shows two screenshots of the 'Link/Support Directional Properties' dialog box. The left screenshot is for Direction U2, where 'NonLinear' is set to 'Yes'. The right screenshot is for Direction U3, where 'NonLinear' is set to 'No'. Both screenshots show the 'Effective Stiffness' and 'Effective Damping' values for the selected direction.

Fuente: Autores

En las imágenes se muestran los valores y las variables a ingresar en cada uno de las direcciones anteriormente mencionadas. Los parámetros calculados de los aisladores que se deben ingresar al programa tanto para el modelo escala y real en cada una de las pilas son:

Tabla 20. Parámetros a ingresar aislador sísmico escala real.

AISLADOR SISMICO PILA NORTE - ESCALA REAL		
DIRECCION U1		
Effective Stiffness	Kv	5824223,22
Effective Damping	β_{eff}	15%

AISLADOR SISMICO PILA SUR-ESCALA REAL		
DIRECCION U1		
Effective Stiffness	Kv	5837909,89
Effective Damping	β_{eff}	14%

AISLADOR SISMICO PILA NORTE - ESCALA REAL		
DIRECCION U2		
Effective Stiffness	Keff	5271,33775
Effective Damping	β_{eff}	15%
NO LINEAL		
Stiffness	K1	40204,7937
Yield Strength	Fy	500291
POST- Yield Stiffness Ratio	K2/K1	0,1

AISLADOR SISMICO PILA SUR-ESCALA REAL		
DIRECCION U2		
Effective Stiffness	Keff	40683,4222
Effective Damping	β_{eff}	14%
NO LINEAL		
Stiffness	K1	40683,4222
Yield Strength	Fy	513260
POST- Yield Stiffness Ratio	K2/K1	0,1

Fuente: Autores

Tabla 21. Parámetros a ingresar aislador sísmico escala reducida.

AISLADOR SISMICO PILA NORTE - ESCALA 1-100 DIRECCION U1		
Effective Stiffness	Kv	58242,2322
Effective Damping	β_{eff}	15%

AISLADOR SISMICO PILA SUR-ESCALA 1-100 DIRECCION U1		
Effective Stiffness	Kv	58379,0989
Effective Damping	β_{eff}	14%

AISLADOR SISMICO PILA NORTE - ESCALA 1-100 DIRECCION U2		
Effective Stiffness	Keff	52,7133775
Effective Damping	β_{eff}	15%
NO LINEAL		
Stiffness	K1	402,047937
Yield Strength	Fy	26,29
POST- Yield Stiffness Ratio	K2/K1	0,1

AISLADOR SISMICO PILA SUR-ESCALA 1-100 DIRECCION U2		
Effective Stiffness	Keff	53,192006
Effective Damping	β_{eff}	14%
NO LINEAL		
Stiffness	K1	406,834222
Yield Strength	Fy	26,62
POST- Yield Stiffness Ratio	K2/K1	0,1

Fuente: Autores

Las variables luego de ingresarse al programa se proceden a asignarlas a cada una de los elementos tipo pila desde el módulo bridge desde las opciones de Bride Object Definitions, Bents.

Figura 37. Asignar los elementos a las pilas.

Fuente: Autores

Luego de Ingresar al formulario Bents Ingresamos a la propiedad Bearing donde se escogerán las condiciones de este tipo de apoyo.

Figura 38. Condiciones del tipo de apoyo.

Fuente: Autores

Luego se debe elegir un nombre para este tipo de Bearing y que tipo de apoyo si es definido por el usuario o como el presente caso se definieron unas características a ese apoyo y se finaliza seleccionando LINK y se elige el apoyo.

Figura 39. Ingreso de link y selección del apoyo.

Fuente: Autores

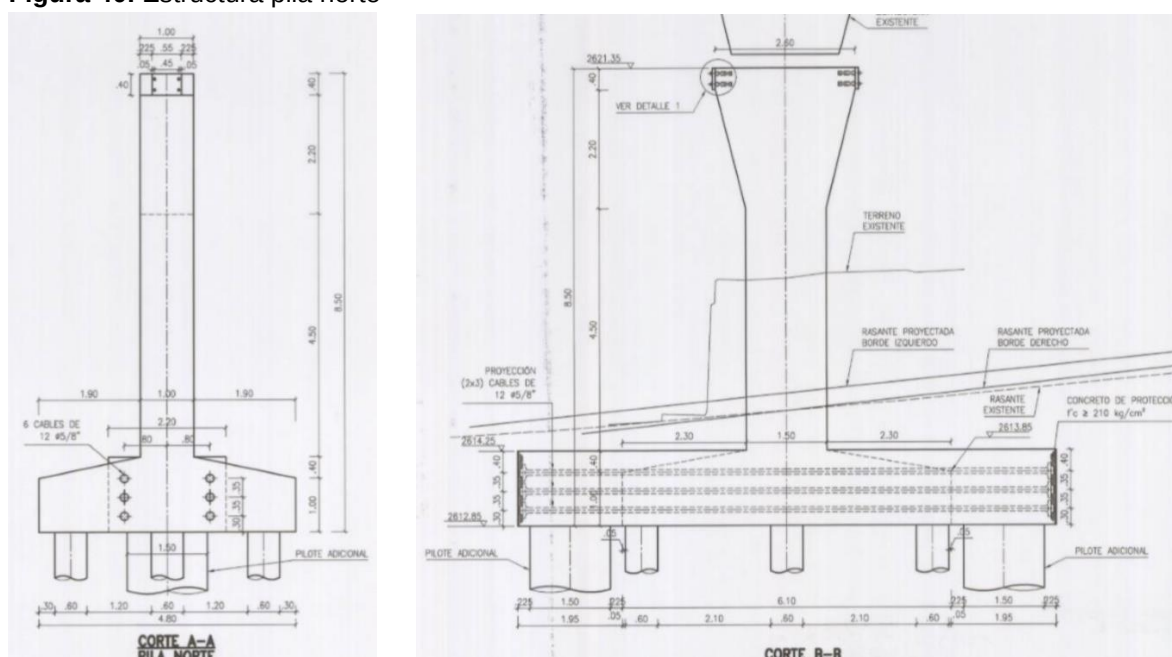
7.2 DISEÑO DE MODELO A ESCALA

7.2.1. Datos iniciales de la estructura prototipo

La estructura prototipo es un puente vehicular de sección de tablero tipo cajón apoyado por dos pilas y dos estribos, los elementos estructurales son de hormigón armado, diseñado y construido sobre la intersección de la calle 26 con carrera 5, en la ciudad de Bogotá.

El puente tiene una luz total de 114 m de longitud y 6.8 m de ancho aproximadamente. La sección transversal típica del puente está compuesta por un tablero existente de cajón de acero estructural ASTM A-572-GR 50 apoyado sobre dos pilas de hormigón armado; las pilas tipo "T" tienen un ancho en el sentido longitudinal de puente de 1.00m de ancho efectivo 1.5 m y finaliza con una transición de 2.5 m la pila norte tiene una altura igual a 8.5 m, mientras que la pila sur tiene una altura total de 6.6 m.

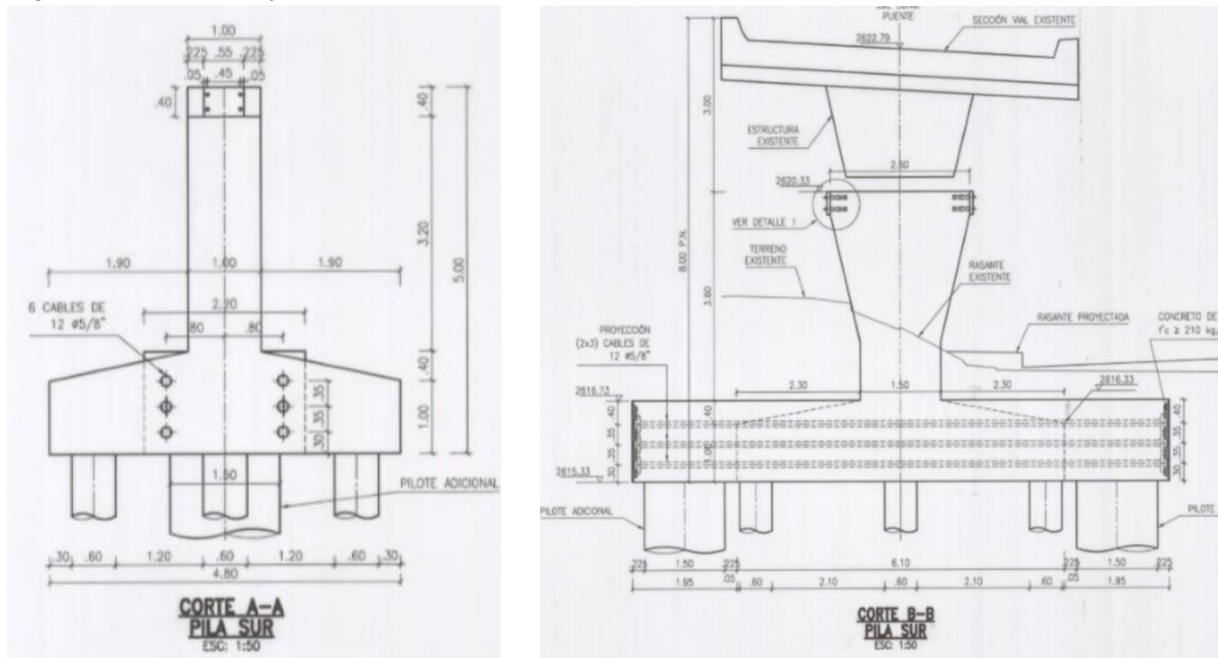
Figura 40. Estructura pila norte



Fuente: IDU³⁵

³⁵ IDU. Repositorio institucional. [En línea]. Colombia: Bogotá, 2015.[citado 10 de Ene ,2016]. Disponible en:Alcaldía mayor de Bogotá. Bogotá permanece atenta.[en línea]. Colombia: Bogotá, 2015.[citado 20 de mar ,2016]. Disponible en: <http://www.bogota.gov.co/temasdeciedad/emergencias>.

Figura 41. Estructura pila sur



Fuente: IDU³⁶

Las Normas y especificaciones que han sido utilizadas en el diseño de la estructura del puente real son las siguientes:

Norma Básica De Diseño: Código Colombiano De Diseño Sísmico De Puentes (C.C.P 95)

Normas Adicionales: Standar Specifications for Highway Bridges (Especificaciones Estándar para puentes de Carretera), 17 Edition, AASTHO 2002.

Especificaciones:

Especificaciones Técnicas De Materiales Y Procesos Constructivos De Proyectos De Infraestructura Vial Y Espacio Público De La Ciudad De Bogotá D.C (Especificaciones IDU ET 2005)

Especificaciones Generales De Construcción De Carreteras- INVIAS

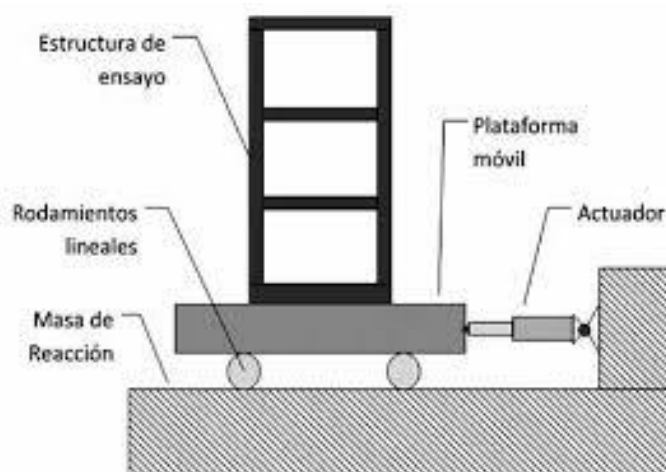
Especificaciones Técnicas De Construcción De Puentes (Titulo B Del C.C.P 95).

³⁶ IDU. Repositorio institucional. [En línea]. Colombia: Bogotá, 2015.[citado 10 de Ene ,2016]. Disponible en:Alcaldía mayor de Bogotá. Bogotá permanece atenta.[en línea]. Colombia: Bogotá, 2015.[citado 20 de mar ,2016]. Disponible en: <http://www.bogota.gov.co/temasdecuidad/emergencias>.

7.2.2. Fenómeno físico a estudiar

El fenómeno físico a estudiar se refiere a los desplazamientos máximos que sufren las pilas de hormigón armado que hacen parte del apoyo del tablero del puente, producida por cargas laterales causadas por un fenómeno sísmico; la determinación de estas fuerzas horizontales es un problema que corresponde a la dinámica de las estructuras, fenómenos causados por eventos de tipo sísmicos, viento, presión de tierras entre otros. La investigación se ocupó principalmente en determinar la respuesta del puente frente a fenómenos sísmicos los cuales para su proceso de cálculo deben tener en cuenta una serie de variables que hacen parte del modelo a estudiar estas variables son: periodo fundamental de la estructura (T_0), periodo de diseño del sistema de aislación (T_D), velocidad angular del sismo de diseño (w), rigidez efectiva del sistema de aislación (K_{eff}) y desplazamiento máximo del sistema DT .

Figura 42. Modelo de montaje de mesa vibratoria y modelo a escala



Fuente: Scielo ³⁷

Los estudios en mesa vibratoria nos permitirán dar una clara visión del comportamiento de las estructura real, puede que los valores no vayan a ser los más exactos y se presentes diferentes tipos de errores dependiendo de qué tipos de materiales se estén usando o si de las medias corresponden así como lo es un equipo de la mesa vibratoria pero lo claro es que los estudios con este tipo de prototipos dejan evidenciar el comportamiento aproximado y luego estas pruebas son muy económicas, en lugar de realizar grandes estudios que tienen un gran

³⁷ Scielo. Evaluación del diseño de una pequeña mesa vibratoria para ensayos en ingeniería sísmo-resistente. [Citado 13 de abri., 2016]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-81702013000100006.

valor lucrativo, estas modelaciones físicas a escalas reducidas serán muy eficientes al momento de determinar posibles causas de un fenómeno.

7.2.3. Características del equipo a emplear

Los equipos e instrumentos que se requieren para la realización del ensayo del modelo consiste en:

7.2.3.1 Mesa vibratoria

El laboratorio de ensayo de materiales y modelos cuenta con una mesa vibratoria de ensayo la cual está compuesta por una lámina de acero con espesor de 12 mm de 1.5 m. de largo x 1.5 m. de ancho con un motor de 1800 rpm que simula el evento a estudiar para el prototipo como se puede observar en la figura 43.

Figura 43. Mesa vibratoria.



Fuente: Autores

Las características, dimensiones, capacidades y limitaciones y ficha técnica de la mesa vibratoria experimentación se detallan en la tabla 22 y en la figura 43.

Tabla 22. Especificaciones de mesa vibratoria.

Especificaciones de diseño	
Tamaño	1.50m x 1.50m
Peso máximo de diseño	1 ton
Manejo mecánico	Motor con moto reductor y variador de velocidad
Desplazamiento máximo	14 cm
Velocidad máxima del motor	1685 RPM

Fuente: LOPEZ³⁸

³⁸ LOPEZ, Jeimy; FERREIRA, Jessika; ORTIZ, Luisa .Diseño de Una Mesa Vibratoria para el Análisis del Comportamiento Dinámico de Edificios a Escala. Universidad La Gran Colombia; Facultad de Ingeniería Civil; Bogotá; 2014

7.2.3.2. Deformímetros

Se requieren deformímetros con sus respectivos soportes cada uno para medir los desplazamientos máximos en las pilas, marca HUMBOLDT, con una apreciación de $\pm 0,0254\text{mm}$ ($0.001''$) electrónico. (figura44).

Figura 44. Deformimetro



Fuente: Autores

Su soporte es un apoyo magnético de imanes para su facilidad al momento de la recolección de los datos así como los fijadores de los con los deformímetros que se ubican a un lado del modelo de esta manera tener precisión al momento de hallar los desplazamientos laterales que se presentan en la pilas del puente.

7.2.4. Identificación de las magnitudes físicas (que intervienen en el fenómeno físico a estudiar).

Los modelos dinámicos de estructuras a nivel experimental son útiles para determinar las condiciones de un fenómeno real de estudio, debido a que la respuesta estática no lineal para este tipo de modelos físicos es compleja de determinar. Los modelos para estudios dinámicos de estructuras son más complejos de analizar en comparación con modelos sometidos a cargas estáticas debido a que se deben incluir y tener en cuenta diferentes tipos variables como el periodo, aceleración, velocidad así como las técnicas para modelar del sistema estructural. A través de la experimentación del modelo a escala reducida del puente de la calle 26 con carrera 5, se desea medir, los desplazamientos

máximos causados por una simulación de un movimiento sísmico, a partir del espectro de diseño del puente, por tanto, se necesita realizar el diseño del modelo de la viga.

Para iniciar, se identificó el sistema fundamental de dimensiones al Constituido por las magnitudes físicas: longitud (L), velocidad angular (W), rigidez (K), tiempo (t) y Masa (m).

Los diseños a modelos a escala tienen una gran variedad de métodos y principios básicos para el análisis dimensional de estos prototipos entre ellos esta Cauchy-Froude, Cauchy-only, Buckingham, entre otros estos métodos se pueden encontrar en structural Modeling³⁹

Tabla 23. Unidades principales que intervienen en los desplazamientos máximos en el modelo a escala del puente de la calle 26 con carrera 5.

SIMBOLO	MAGNITUD FISICA	UNIDAD MEDIDA
W	VELOCIDAD ANGULAR	RPM
M	MASA	Ton - Kg
L	LONGITUD	m-mm
K	RIGIDEZ	N/mm
T	PERIODO	s

7.2.4.1. Determinación magnitudes del modelo a escala

Se inició con el establecimiento de las relaciones de semejanza y de los Factores de escala (S). Según la teoría de escalas se encuentra que se debe tener una equivalencia entre el modelo y el prototipo contempla que todas las variables adimensionales o términos pi (π) sean iguales tanto para el modelo como para el prototipo, es decir se tiene que:

$$\pi_p = \pi_m$$

En donde los subíndices p y m significan prototipo y modelo.

³⁹ HARRIS, Harry, SABNIS, Gajanan M. Structural Modeling and Experimental Techniques. Second Edition. Philadelphia Pennsylvania. 1999. 381p

Por lo cual se debe cumplir la relación de escala, es decir la relación de la longitud del prototipo a la longitud del modelo es una constante:

$$S_L = \frac{l_p}{l_m}$$

Dónde:

S_L = Factor de escala del sistema

Entonces para esta investigación se opta por elegir un factor de escala igual a 100 debido a que la luz del puente es de gran magnitud así como debe estar dentro del rango prudente del área de la mesa vibratoria, y según la teoría de escalas es recomendable que las escalas sean de tipo enteros y en su posible medida que sean múltiplos pares para la manipulación y obtención de variables.

Igual a:

$$S_L = \frac{114}{1.5} = 76$$

Pero por razones prácticas y no estar al límite del rango de la mesa adoptamos un valor redondeado a la unidad de centésima próxima: 1: 100 Escala Adoptada.

Ahora se definen las propiedades del material a elegir para el modelo a escala, para lo cual continuación se determina las características a escala del mismo.

Acero: módulo de elasticidad:

$$E = 200000 \text{ mpa}$$

Según la teoría de modelos a escala para las características elásticas de un prototipo y de un modelo a escala debe determinarse con la siguiente relación.

$$S_E = \frac{E_p}{E_m}$$

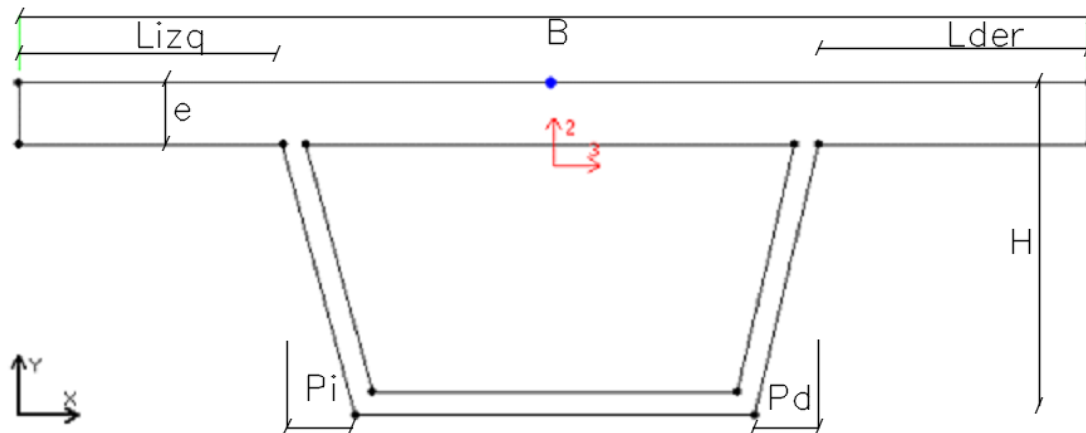
Debido a que el material es el mismo con las mismas características elásticas tanto para el modelo a escala y el prototipo se determina que es igual a uno.

$$S_E = \frac{200000 \text{ mpa}}{200000 \text{ mpa}} = 1$$

7.2.5. Predimensionamiento Del Puente

Propiedades geométricas y características del sistema estructural y de aislación del puente real.

Figura 45. Sección típica transversal del puente



Fuente: Autores

La figura 45 nos muestra la sección ingresada al programa SAP v 2000 que corresponde al sección tipo cajón del puente con estas características geométricas se comenzó los respectivos cálculos para definir las medidas del modelo para posteriormente proceder al ensamble y fabricación de la estructura principal de tablero y de los elementos estructurales que componen el puente. Ahora se muestra en la tabla 24 los valores correspondientes a la geometría de esta sección así como las propiedades elásticas del sistema de aislación.

Tabla 24. Características actuales de la geometría real y sistema de aislación.

DATOS INICIALES PUENTE			
		MODELO REAL	
MAGNITUDES FISICAS		UNIDADES DE MEDIDA	VALOR
Luz total del puente		mts	114
Seccion transversal	Ancho total (b)	mts	6,94
	Alto total (h)	mts	2,15
	Peralte izq (Pi)	mts	0,47
	Peralte der (Pd)	mts	0,41
	espesor placa (e)	mts	0,4
	longitud borde de placa a eje aleta de cajon izq	mts	1,71
	longitud borde de placa a eje aleta de cajon der	mts	1,76
Ancho pila norte-sur		mts	1,0-2,5
Largo pila norte - sur		mts	1
Alto pila norte		mts	7,1
Alto pila sur		mts	6,6
Resistencia fluencia acero		MPA	420
Resistencia fluencia concreto		MPA	28
CARACTERISTICAS DE RIGIDEZ SISTEMA AISLACION-PILA NORTE			
RIGIDEZ EFECTIVA MINIMA DEL SISTEMA DE AISLACION K_{Dmin} PARA T_D		N/mm	2785,455491
RIGIDEZ EFECTIVA MINIMA DEL SISTEMA DE AISLACION K_{Mmin} PARA T_M		N/mm	1934,344091
RIGIDEZ EFECTIVA MAXIMA DEL SISTEMA DE AISLACION K_{Dmax} PARA T_D		N/mm	3621,092138
RIGIDEZ EFECTIVA MAXIMA DEL SISTEMA DE AISLACION K_{Mmax} PARA T_M		N/mm	2514,647318
RIGIDEZ HORIZONTAL DEL AISLADOR K_H		N/mm	3496,06902
RIGIDEZ POST FLUENCIA K_2		N/mm	4020,479373
RIGIDEZ ELASTICA K_1		N/mm	40204,79373
RIGIDEZ EFECTIVA K_{eff}		N/mm	5271,337746
RIGIDEZ VERTICAL DEL AISLADOR K_v		N/mm	5824223,224
FUERZA FLUENCIA DEL AISLADOR F_y		N	500291
CARACTERISTICAS DE RIGIDEZ SISTEMA AISLACION-PILA SUR			
RIGIDEZ EFECTIVA MINIMA DEL SISTEMA DE AISLACION K_{Dmin} PARA T_D		N/mm	2865,162456
RIGIDEZ EFECTIVA MINIMA DEL SISTEMA DE AISLACION K_{Mmin} PARA T_M		N/mm	1989,69615
RIGIDEZ EFECTIVA MAXIMA DEL SISTEMA DE AISLACION K_{Dmax} PARA T_D		N/mm	3724,711193
RIGIDEZ EFECTIVA MAXIMA DEL SISTEMA DE AISLACION K_{Mmax} PARA T_M		N/mm	2586,604995
RIGIDEZ HORIZONTAL DEL AISLADOR K_H		N/mm	3537,688889
RIGIDEZ POST FLUENCIA K_2		N/mm	4068,342222
RIGIDEZ ELASTICA K_1		N/mm	40683,42222
RIGIDEZ EFECTIVA K_{eff}		N/mm	5319,200595
RIGIDEZ VERTICAL DEL AISLADOR K_v		N/mm	5837909,893
FUERZA FLUENCIA DEL AISLADOR F_y		N	513260

Fuente: Autores

Luego de determinar las características actuales del puente se procede a definir las unidades y factores de escala de cada una de las características principales,

en el siguiente cuadro se muestran las magnitudes así como su factor de escala reducida.

Tabla 25. Factores de escala de cada una de las magnitudes físicas del modelo a escala.

SIMBOLO	MAGNITUD FISICA	UNIDAD MEDIDA	DIMENSION ESCALA SEGÚN SEISMIC ENGINEERING RESEARCH INFRASTRUCTURES FOR EUROPEAN SYNERGIES
W	VELOCIDAD ANGULAR	RPM	LT^{-1}
M	MASA	Ton - Kg	ρL_3
L	LONGITUD	m-mm	SL
K	RIGIDEZ	N/mm	FK
T	PERIODO	s	FT

Teniendo claro los factores de escala para cada medida se deben ahora calcular las medidas reducidas del modelo en base al factor de escala calculado anteriormente de (SL=100).

Luz del puente

$$l_m = \frac{114 \text{ m}}{100} = 1.14 \text{ m}$$

Sección transversa

$$l_m = \frac{1 \text{ mts}}{100} = 1.14 \text{ m}$$

Ancho pila norte-sur

$$l_m = \frac{1,5 - 2,5 \text{ mts}}{100} = 0,015 \text{ m} - 0,025$$

Largo pila norte - sur

$$l_m = \frac{1 \text{ mts}}{100} = 0,01 \text{ m}$$

Alto pila norte

$$l_m = \frac{7,1 \text{ mts}}{100} = 0,071 \text{ m}$$

Alto pila sur

$$l_m = \frac{6,6 \text{ mts}}{100} = 0,066 \text{ m}$$

Rigidez sistema de aislación

$$K_{Dmin} = \frac{2785 \text{ N/mm}}{100} = 27,85 \text{ N/MM}$$

Los demás análisis de rigidez del sistema de aislación se muestran en la siguiente tabla resumen, con la equivalencia de unidades tanto para la pila sur como la pila norte.

Tabla 26. Rigidez del sistema de aislación del sistema pila norte

CALCULO DE PROPIEDADES AISLADOR DE ESCALA REDUCIDA- PILA NORTE		
Factor	Unidades	Valores
Rigidez efectiva minima del sistema de aislacion k _{Dmin} para TD	N/mm	27,8545549
Rigidez efectiva minima del sistema de aislacion k _{Mmin} para TM	N/mm	19,3434409
Rigidez efectiva maxima del sistema de aislacion k _{Dmax} para TD	N/mm	36,2109214
Rigidez efectiva maxima del sistema de aislacion k _{Mmax} para TM	N/mm	25,1464732
Rigidez horizontal del aislador k _H	N/mm	34,9606902
Rigidez post fluencia K ₂	N/mm	40,2047937
Rigidez elastica K ₁	N/mm	402,047937
Rigidez efectiva K _{eff}	N/mm	52,7133775
Rigidez vertical del aislador K _v	N/mm	58242,2322
Fuerza fluencia del aislador F _y	N	26,29

Fuente: Autores

Tabla 27. Rigidez del sistema de aislación del sistema pila sur

CALCULO DE PROPIEDADES AISLADOR DE ESCALA REDUCIDA- PILA SUR		
Factor	Unidades	Valores
Rigidez efectiva minima del sistema de aislacion k _{Dmin} para TD	N/mm	28,6516246
Rigidez efectiva minima del sistema de aislacion k _{Mmin} para TM	N/mm	19,8969615
Rigidez efectiva maxima del sistema de aislacion k _{Dmax} para TD	N/mm	37,2471119
Rigidez efectiva maxima del sistema de aislacion k _{Mmax} para TM	N/mm	25,86605
Rigidez horizontal del aislador k _H	N/mm	35,3768889
Rigidez post fluencia K ₂	N/mm	40,6834222
Rigidez elastica K ₁	N/mm	406,834222
Rigidez efectiva K _{eff}	N/mm	53,192006
Rigidez vertical del aislador K _v	N/mm	58379,0989
Fuerza fluencia del aislador F _y	N	26,62

Fuente: Autores

Calculo velocidad angular del sistema

Con los resultados obtenidos del sistema de aislación se procede a calcular la velocidad angular del sistema de aislación, según la dinámica se puede relacionar el periodo fundamental con la velocidad angular.

$$T = \frac{2\pi}{w}$$

Debido a que el periodo fundamental de la estructura está en un rango de 0,12 segundos, se debe adoptar el valor de periodo de diseño del aislador el cual será 2.5 segundos tanto para el modelo real como el modelo escala por lo cual la velocidad angular expresada en rad / s será:

$$w = \frac{2\pi}{2.5} = 2.513 \frac{Rad}{seg}$$

Finalmente la tabla 28 permite evidenciar los valores del modelo real y del modelo a escala 1:100 del puente, de esta manera se procede con las labores de fabricación del modelo a escala con los materiales adecuados y proceder a la experimentación.

Tabla 28. Resumen valores modelo a escala y modelo real

DATOS INICIALES PUENTE					
		MODELO REAL		MODELO A ESCALA	
MAGNITUDES FISICAS		UNIDADES DE MEDIDA	VALOR	UNIDADES DE MEDIDA	VALOR
Luz total del puente		mts	114	mm	1140
Seccion transversal	Ancho total (b)	mts	6,94	mm	69,4
	Alto total (h)	mts	2,15	mm	21,5
	Peralte izq (Pi)	mts	0,47	mm	4,7
	Peralte der (Pd)	mts	0,41	mm	4,1
	espesor placa (e)	mts	0,4	mm	4
	longitud borde de placa a eje aleta de cajon izq	mts	1,71	mm	17,1
	longitud borde de placa a eje aleta de cajon der	mts	1,76	mm	17,6
Ancho pila norte-sur		mts	1,0-2,5	mm	10 y 25
Largo pila norte - sur		mts	1	mm	10
Alto pila norte		mts	7,1	mm	71
Alto pila sur		mts	6,6	mm	66
Resistencia fluencia acero		MPA	420	MPA	420
Resistencia fluencia concreto		MPA	28	MPA	28
CARACTERISTICAS DE RIGIDEZ SISTEMA AISLACION-PILA NORTE					
RIGIDEZ EFECTIVA MINIMA DEL SISTEMA DE AISLACION K_{Dmin} PARA T_D		N/mm	2785,455491	N/mm	27,85455491
RIGIDEZ EFECTIVA MINIMA DEL SISTEMA DE AISLACION K_{Mmin} PARA T_M		N/mm	1934,344091	N/mm	19,34344091
RIGIDEZ EFECTIVA MAXIMA DEL SISTEMA DE AISLACION K_{Dmax} PARA T_D		N/mm	3621,092138	N/mm	36,21092138
RIGIDEZ EFECTIVA MAXIMA DEL SISTEMA DE AISLACION K_{Mmax} PARA T_M		N/mm	2514,647318	N/mm	25,14647318
RIGIDEZ HORIZONTAL DEL AISLADOR K_H		N/mm	3496,06902	N/mm	34,9606902
RIGIDEZ POST FLUENCIA K_2		N/mm	4020,479373	N/mm	40,20479373
RIGIDEZ ELASTICA K_1		N/mm	40204,79373	N/mm	402,0479373
RIGIDEZ EFECTIVA K_{eff}		N/mm	5271,337746	N/mm	52,71337746
RIGIDEZ VERTICAL DEL AISLADOR K_v		N/mm	5824223,224	N/mm	58242,23224
FUERZA FLUENCIA DEL AISLADOR F_y		N	500291	N	26,29

CARACTERISTICAS DE RIGIDEZ SISTEMA AISLACION-PILA SUR				
RIGIDEZ EFECTIVA MINIMA DEL SISTEMA DE AISLACION K_{Dmin} PARA T_D	N/mm	2865,162456	N/mm	28,65162456
RIGIDEZ EFECTIVA MINIMA DEL SISTEMA DE AISLACION K_{Mmin} PARA T_M	N/mm	1989,69615	N/mm	19,8969615
RIGIDEZ EFECTIVA MAXIMA DEL SISTEMA DE AISLACION K_{Dmax} PARA T_D	N/mm	3724,711193	N/mm	37,24711193
RIGIDEZ EFECTIVA MAXIMA DEL SISTEMA DE AISLACION K_{Mmax} PARA T_M	N/mm	2586,604995	N/mm	25,86604995
RIGIDEZ HORIZONTAL DEL AISLADOR K_H	N/mm	3537,688889	N/mm	35,37688889
RIGIDEZ POST FLUENCIA K_2	N/mm	4068,342222	N/mm	40,68342222
RIGIDEZ ELASTICA K_1	N/mm	40683,42222	N/mm	406,8342222
RIGIDEZ EFECTIVA K_{eff}	N/mm	5319,200595	N/mm	53,19200595
RIGIDEZ VERTICAL DEL AISLADOR K_V	N/mm	5837909,893	N/mm	58379,09893
FUERZA FLUENCIA DEL AISLADOR F_Y	N	513260	N	26,62

Fuente: Autores

7.2.6 Construcción del modelo

Una vez que se ha finalizado el dimensionamiento de todos los elementos que conforman el puente se procede a la construcción del puente a escala con los resultados obtenidos con el procedimiento de definición de factores de escala del prototipo y el modelo a escala.

7.2.6.1 Materiales

Los materiales a utilizarse en la construcción deben cumplir características geométricas y mecánicas de sistema de aislación, deben ser similares a las del puente real o prototipo para cuando sea sometida al ensayo con la mesa vibratoria se tenga una respuesta semejante a la estructura actual. Los materiales seleccionados son:

- Lamina de acero tipo A 36 lámina de 3 mm
- Lamina de acero tipo A 36 lamina de 1.5 mm
- Pernos de anclajes 3/8 “
- Soldadura 60-13 3-32 y 1/8

7.2.6.2. Herramientas y equipo

Para la elaboración y manejo de los materiales que se necesita para la fabricación del modelo es necesario utilizar unos equipos adecuados y herramientas como:

- Equipo de soldadura
- Cortadora de laminas
- Pinza de agarre
- Prensa hidráulica
- Resina epoxica

7.2.6.3. Proceso constructivo

Se construyó un prototipo del puente, debido a que la geometría de la estructura es de tipo irregular y curvas tanto para las pilas y la sección típica transversal se eligió primero para que cumpliera con el modelo actual que fuese en láminas de acero debido a que su forma irregular en planta requería que el material fuese fácil de manipular para generar el radio del puente; para unir las piezas se debió soldar para que tuviera la forma esperada. En las siguientes imágenes se muestra los pasos a seguir durante el proceso de construcción del modelo a escala.

Figura 46. Definición de geometría sección pilas y su corte.



Fuente: Autores

Inicialmente se realizaron los actos preliminares de identificación de geometría y planos de la estructura actual del puente a medidas a escala, luego se procedió a dibujar las secciones típicas de las pilas, estribos, y tablero principal del puente, estas medidas son tomadas a partir del cálculo de la escala de cada uno de los elementos estructurales. Estas labores realizadas se pueden apreciar en las imágenes 46 Y 47. Luego de esto se procede al corte de cada una de las piezas verificando que la medida no se vea afectada.

Figura 47. Corte de sección frontal elemento tipo pila.



Fuente: Autores

Luego de haber culminado la labor de marcar la geometría de las secciones se procede a realizar los cortes pertinentes de cada una de estas piezas y seguido a ello a pulir las piezas de tal manera que se cumplan con las especificaciones del diseño. Para que la labor de corte fuese apropiada, se utilizó una tolerancia al momento de cortar estas piezas de 3 mm que es igual al espesor de un disco de corte, pues si se cortase a medida exacta, esta pieza se podría perder la medida. Luego de ello se procedía a pulir para que fuera la medida adecuada puesto las dimensiones del modelo a escala aunque se apropiaron a la mesa vibratoria tenían un valor muy pequeño.

7.2.6.4. Ensamblaje de los elementos estructurales

Se realizaron labores de soldadura para llevar a cabo la unión de las piezas de los elementos estructurales puesto que fue la manera más rápida y segura de que las piezas quedaran unidas y no se presentase que durante el ensayo de la mesa vibratoria los elementos no soportaran el movimiento y se desarmara la pieza. Para que las condiciones de armado fueran las mejores se usaron pinzas que sujetaran los elementos tan pequeños en medida y se pudieran manipular de una manera más eficaz.

Figura 48. Ensamble estructura pila



Fuente: Autores

Como se puede apreciar en la imagen 48 se da inicio a las primeras labores de conexión de partes de cada uno de los elementos inicialmente durante el proceso de fabricación de las pilas norte y sur así como de los estivos del puente. En las siguientes imágenes se muestra el proceso como se culminó esta etapa de unión de las piezas.

Figura 49. Unión pieza soporte pila



Fuente: Autores

Figura 50. Terminación ensamblaje pila norte



Fuente: Autores

Luego de ensamblar las piezas de los elementos estructurales tipo apoyo se procedió a realizar la conexión y fabricación del tablero de la superestructura inicialmente se debió realizar las labores de obtención de radio de curvatura así como se muestran en los planos estructurales; luego de definido ello se procedió a dibujar el radio del puentes y cortar la lámina donde se dibujó esta geometría. Finalmente se comenzaría con la labor de formar el cajón con ese mismo radio de curvatura. Estos procesos se aprecian en las siguientes imágenes:

Figura 51. Ensamble cajón puente.



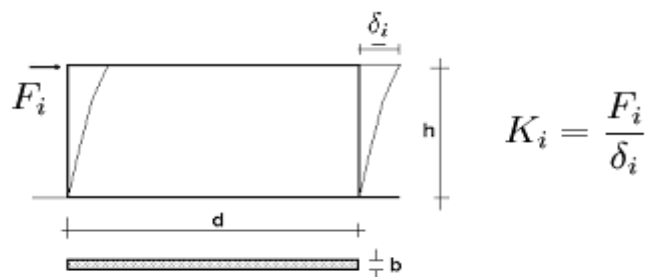
Fuente: Autores

7.2.6.5. Montaje del modelo y desarrollo experimentación

Finalizada la etapa de fabricación de modelo a escala se procede a realizar el montaje experimental del modelo en la mesa vibratoria para lo cual se realiza dos fases: la primera determinación y montaje del modelo, y la segunda incluir un material que cumpla con las propiedades de rigidez del sistema de aislación.

Debido a que los aisladores comercialmente son de mínimo un diámetro de 50 cm no hay posibilidad de llevar a uno de una escala tan reducida y mucho menos que cumpla con los valores de coeficientes de rigidez y de parámetros de aislación tan pequeños, por consiguiente se debió buscar la manera que se cumpliera ese valor de rigidez por ello se realizó una práctica para hallar los valores de rigidez para una silicona. De tal forma que se realizó el montaje de un sistema para determinar la rigidez de la silicona a diferentes medidas. En relación con de la rigidez de una barra.

Figura 52. Idealización de las estructuras para cálculo de rigidez



Fuente: Autores

Para el caso de la investigación el cálculo de la rigidez de los aisladores está en un promedio de 52 N / mm, para un modelo a escala 1:100, por cual se buscó hallar este valor con barras de silicona aplicado en un sistema de obtención de datos de deformación y un carga estándar que es igual a 233.37, en las próximas imágenes se muestra el sistema experimental y de la obtención de las variables.

Figura 53. Determinación de pesos de las muestras de cargas



Fuente: Autores

La carga estándar que se aplicó a la silicona para hallar los valores de rigidez fue una carga de 233.37 g lo equivalente a una pesa de 99.87 y un dispositivo que consta de una varilla y un cable que permitirá colgar la carga en la pieza de la silicona. En las imágenes siguientes se idéntica la rigidez para una barra de silicona con una longitud igual a 4 cm y el valor de su rigidez.

Figura 54 Montaje del sistema para la obtención de la rigidez de una barra de silicona



Fuente: Autores

Figura 55. Valores de deformación por carga 233 g con barra de 4 cm .



Fuente: Autores

Luego de determinar los valores de deformación se procedió a dar solución al cálculo de la rigidez de esa barra, pero como el valor a conseguir en N/mm^2 se realizó la equivalencia de unidades de gramos a newton.

$$K = \frac{F}{\delta}$$

$$K = \frac{2.3337 \text{ N}}{4.7 \text{ mm}} = 0.4965 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

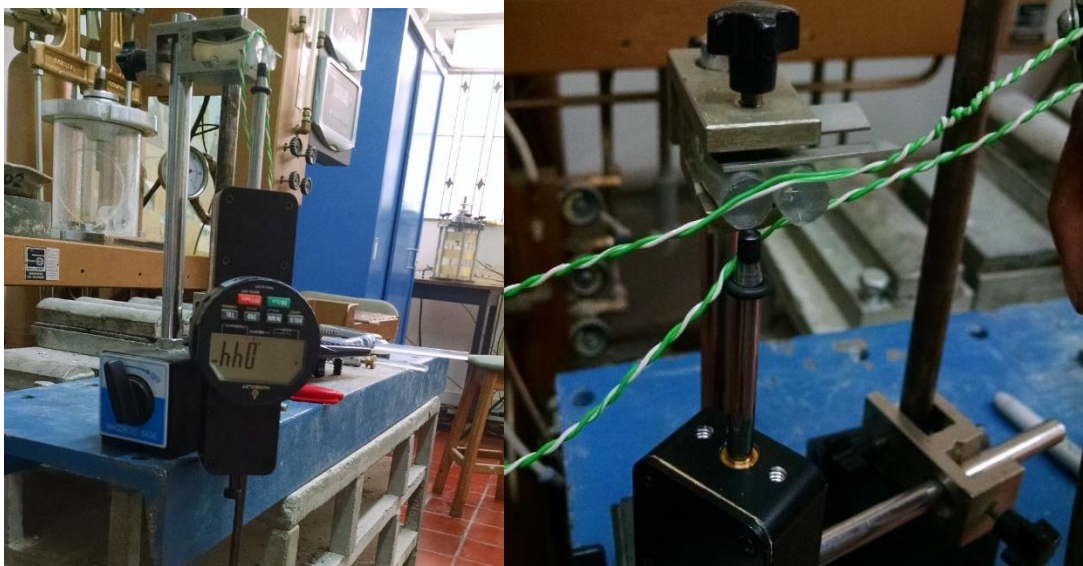
Definido estos resultados se analizó que para que se logre el valor de 52 N/mm se necesitaría de una muestra muy pequeña por lo cual se decidió unir dos muestras de silicona de 7 mm de alto por 10 mm de diámetro y deberían estar unidos dando el siguiente resultado.

$$K = \frac{F}{\delta}$$

$$K = \frac{2.3337 \text{ N}}{0.044 \text{ mm}} = 53.03 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Estos elementos seleccionados para colocar como aisladores sísmico en el puente a escala reducida tienen un 98% de efectividad, debido a que se experimentó con varias longitudes de siliconas hasta el punto de llegar a la rigidez necesaria.

Figura 56. Determinación de valores de deformación de barras de 7 mm unidas.



Fuente: Autores

7.2.6.6. Montaje del modelo a la mesa vibratoria

Luego de hallar las propiedades de rigidez del sistema de aislación se procede a instalar el modelo a escala en la mesa vibratoria y luego realizar la toma de datos de los desplazamientos y proceder a los análisis y realizar la comparación de los valores obtenidos.

Figura 57 Montaje de elementos estructurales del puente en la mesa vibratoria



Fuente: Autores

Figura 58. Instalación de deformímetros en las estructuras de las pilas para la determinación de desplazamientos totales del sistema de aislación.



Fuente: Autores

Luego del montaje del modelo a escala se ejecuta las labores de experimentación así que se inicia con una serie de toma de datos de los desplazamientos de la estructura con una velocidad angular de 2.513 rad/s por lo cual graduamos este valor en repeticiones por minuto en la mesa vibratoria luego se toma las mediciones de un minuto para las deformaciones. Algunos de los resultados se muestran en las imágenes mostradas a continuación.

Figura 59 valores de deformación de aisladores.



Fuente: Autores

Ahora se procede a la etapa de relacionar estos valores obtenidos con el modelo realizado en SAP, el cual podrá determinar de qué manera están acertados o que error se presenta en el modelo escala si los valores son acordes a los mostrados en el programa y dará una visión de análisis del fenómeno físico a estudiar y si afecta la estructura o que bondades permita el uso de los aisladores sísmicos como solución de amortiguamiento de fuerzas sísmicas.

7.3. RESULTADOS DESPLAZAMIENTOS, PERIODOS, ACELERACIONES DE LOS MODELOS EN SAP2000 Y CON LA MESA VIBRATORIA.

Después del proceso de modelación en el software y de hacer el modelo a escala se realiza el análisis de los desplazamientos totales máximos de la estructura del puente de la calle 26 con carrera 5 al igual que el análisis de otro tipo de variables arrojados en el análisis del programa como lo son los valores de los desplazamientos de los links o aisladores así como el periodo fundamental con y sin aisladores sísmicos en la base y relacionar el modelo a escala con el modelo real.(ver figura 26).

Frente a los valores que se aprecian en la tabla de la participación de masa en el caso modal de la estructura se evalúa que la estructura cumple el 90 % de la participación de la masa modal en el modo de vibración 13 con un valor de periodo fundamental de 0.123949 segundos, lo que permite analizar que actualmente la estructura presenta una rigidez muy grande, puesto que su periodo es muy pequeño, lo cual permite deducir que de alguna manera los desplazamientos de los elementos estructurales son mínimos.

Figura 60. Periodo fundamental de la estructura real con aisladores sísmicos.

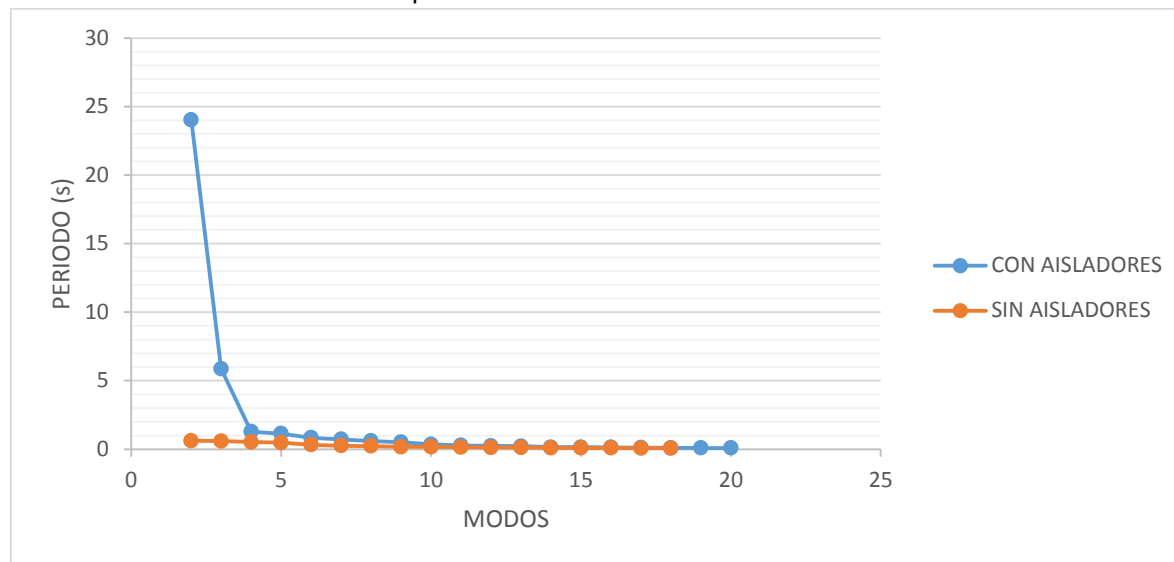
Output Case Text	Step Type Text	Step Num Unitless	Period Sec	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless	Sum UX Unitless	Sum UY Unitless
MODAL	Mode	1	-18390.1733	3.415E-15	5.399E-15	0.89841	3.415E-15	5.399E-15
MODAL	Mode	2	24.026143	0.00124	0.00018	0.0000003499	0.00124	0.00018
MODAL	Mode	3	5.866154	0.00333	0.05188	4.367E-14	0.00457	0.05206
MODAL	Mode	4	1.281739	0.16134	0.58015	8.587E-17	0.16591	0.63221
MODAL	Mode	5	1.147007	0.02774	0.00824	1.189E-18	0.19365	0.64045
MODAL	Mode	6	0.837553	0.01146	0.1032	2.914E-16	0.20511	0.74366
MODAL	Mode	7	0.724039	0.00002926	0.000001297	1.247E-17	0.20514	0.74366
MODAL	Mode	8	0.602918	0.10994	0.02879	4.597E-17	0.31509	0.77245
MODAL	Mode	9	0.512349	0.60219	0.13182	3.349E-17	0.91728	0.90427
MODAL	Mode	10	0.364081	0.0087	0.00276	6.634E-17	0.92598	0.90703
MODAL	Mode	11	0.276676	0.000074	0.00003135	0	0.92606	0.90706
MODAL	Mode	12	0.247104	0.00003624	0.00001329	1.109E-17	0.92609	0.90707
MODAL	Mode	13	0.224832	0.00215	0.00045	5.429E-17	0.92824	0.90752
MODAL	Mode	14	0.154999	0.0000002236	0.000016	3.519E-16	0.92824	0.90754
MODAL	Mode	15	0.145002	0.000004	0.00001024	7.709E-18	0.92825	0.90755
MODAL	Mode	16	0.134131	0.00003369	0.00003007	5.671E-16	0.92828	0.90758
MODAL	Mode	17	0.114163	0.00003889	0.0000203	2.979E-18	0.92832	0.9076
MODAL	Mode	18	0.102777	0.0000001844	0.0000613	0	0.92832	0.90766
MODAL	Mode	19	0.094014	0.00015	0.01791	2.107E-15	0.92846	0.92558
MODAL	Mode	20	0.088633	0.00003894	0.00002752	1.118E-16	0.9285	0.9256

Fuente: Autores

Se evidencia que con los aisladores sísmicos el periodo que se cumple para un 90 % de participación de la masa modal es mayor que el de la estructura sin aisladores sísmicos según los estudios de los aisladores sísmicos referentes a sus

propiedades concluye que los sistemas de aislación tienen unas características: la primera es que aumentan el sistema de amortiguamiento de las estructuras y al igual el periodo se incrementa con amortiguamiento efectivo del sistema de aislación debido a que los aisladores aumentan la disipación de energía a partir del movimiento de estos aisladores por eso se evidencia el crecimiento del periodo fundamental.

Grafica 1. Modos de vibración vs periodo modelo real



Fuente: Autores

En la gráfica 1 se muestra como es el comportamiento de los modos de vibración vs los periodos fundamentales frente a un fenómeno sísmico. En esta grafica se compararon los valores de los primeros 20 modos de vibración rango donde se encuentra el periodo fundamental de la estructura; de estos 20 modos se descartó el modo uno pues presentaba una variación alta en su periodo, por lo cual se graficaron los siguientes 19 modos en esto se puede apreciar que los aisladores tienen en los primeros modos un valor considerable de periodo luego se normaliza y continua con una tendencia que se hace similar a la estructura sin los aisladores. A partir del modo 5 la estructura tiene una similitud en ambos casos lo único es que la participación de la masa varia por lo cual se diferencian los periodos fundamentales.

7.3.1. Periodos fundamentales de la estructura- modelo escala

Ahora se evalúa de qué manera se evidencian variaciones del periodo del modelo a escala si en realidad son similares al modelo real o si por el contrario existen dispersiones referentes a los datos de casos modales.

Figura 61. Periodo fundamental de modelo a escala en SAP sin sistema de aislación

OutputCase Text	StepType Text	StepNum Unitless	Period Sec	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless	SumUX Unitless	SumUY Unitless
MODAL	Mode	1	0.006047	0.04525	0.01976	0.07166	0.04525	0.01976
MODAL	Mode	2	0.005377	0.39938	0.25572	0.00066	0.44463	0.27548
MODAL	Mode	3	0.004499	0.40284	0.39119	0.01772	0.84747	0.66666
MODAL	Mode	4	0.003263	0.02008	0.00495	0.18664	0.86755	0.67161
MODAL	Mode	5	0.002669	0.03667	0.02433	0.00187	0.90422	0.69594
MODAL	Mode	6	0.002539	0.00015	0.00023	0.38094	0.90437	0.69617
MODAL	Mode	7	0.002049	0.01373	0.092	0.000007405	0.9181	0.78816
MODAL	Mode	8	0.001728	0.00047	0.0000312	0.00472	0.91856	0.7882
MODAL	Mode	9	0.001436	0.01974	0.07126	0.00048	0.9383	0.85946
MODAL	Mode	10	0.001347	0.00023	0.03306	0.00017	0.93853	0.89251
MODAL	Mode	11	0.001174	0.00101	0.02225	0.00003328	0.93954	0.91477
MODAL	Mode	12	0.001087	0.00047	0.0022	0.00014	0.94	0.91697
MODAL	Mode	13	0.001063	0.0000846	0.00039	0.00559	0.94009	0.91736
MODAL	Mode	14	0.000925	0.00014	0.00176	0.04138	0.94023	0.91912
MODAL	Mode	15	0.000921	0.00042	0.00373	0.01145	0.94065	0.92285
MODAL	Mode	16	0.000806	0.000008058	0.00001089	0.01921	0.94066	0.92286
MODAL	Mode	17	0.000758	0.00009627	0.00003179	0.00004028	0.94075	0.92289
MODAL	Mode	18	0.000731	0.00000484	0.00001008	0.000002373	0.94076	0.9229
MODAL	Mode	19	0.000717	0.00179	0.000003698	0.0000001778	0.94255	0.92291
MODAL	Mode	20	0.000607	0.00007755	0.0000003824	0.0036	0.94263	0.92291

Fuente: Autores

Como primera similitud, se puede evidenciar que los modos de vibración son diferentes el modo de vibración para este modelo donde se cumpla el 90 % de la participación de masa se encuentra en el 11 mientras que en el modelo real aparece en modo 13 referente a la escala del periodo se evidencia que están muy cercanos a referencia de escala pues el periodo del real fue 0.12 s y si se pasa a escala 1:100 sería un periodo con un valor de 0.0012 s cercano al que arroja el programa para modelo reducido con un valor de 0.001174 s.

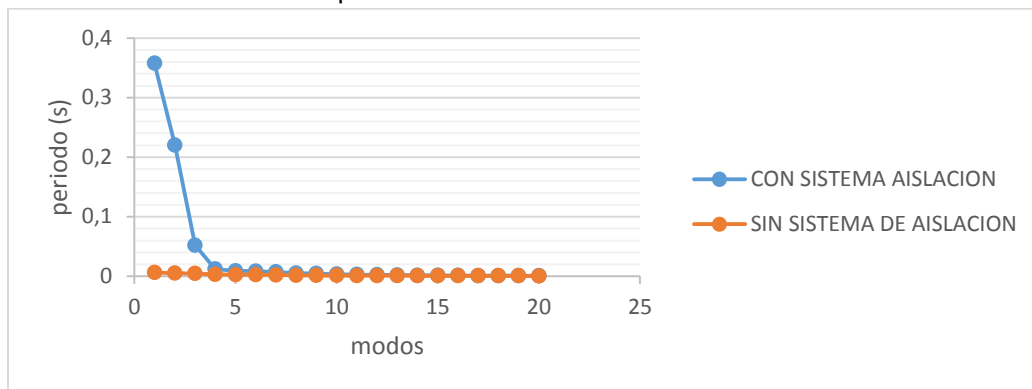
Figura 62. Periodo fundamental del modelo a escala en SAP con a sistema de aislación

OutputCase Text	StepType Text	StepNum Unitless	Period Sec	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless	SumUX Unitless	SumUY Unitless
MODAL	Mode	1	0.357514	0.00021	0.00001583	0.79549	0.00021	0.00001583
MODAL	Mode	2	0.220328	0.00105	0.00028	0.11538	0.00126	0.00029
MODAL	Mode	3	0.05199	0.00216	0.04112	0.00006157	0.00341	0.04141
MODAL	Mode	4	0.011992	0.16687	0.53202	0.0000007515	0.17028	0.57343
MODAL	Mode	5	0.008992	0.03069	0.00499	0.00002621	0.20097	0.57842
MODAL	Mode	6	0.00846	0.02429	0.14383	0.0000006538	0.22527	0.72226
MODAL	Mode	7	0.00722	0.00001085	0.00032	0.00000005484	0.22528	0.72257
MODAL	Mode	8	0.005392	0.09678	0.07745	0.0000001775	0.32206	0.80002
MODAL	Mode	9	0.004644	0.59425	0.11322	0.00000001305	0.91631	0.91324
MODAL	Mode	10	0.003611	0.02372	0.00665	0.00000001358	0.94003	0.91989
MODAL	Mode	11	0.002856	0.00011	0.00004041	0.0000001145	0.94014	0.91993
MODAL	Mode	12	0.00242	0.00016	0.00002624	0.0000003219	0.94029	0.91996
MODAL	Mode	13	0.002237	0.00359	0.00077	0.000000007572	0.94388	0.92073
MODAL	Mode	14	0.001545	0.000003278	0.0000219	0.000000000456	0.94388	0.92075
MODAL	Mode	15	0.001467	0.000006943	0.00001499	0.0000000001646	0.94389	0.92077
MODAL	Mode	16	0.001332	0.00003914	0.000003359	0.000000007599	0.94393	0.92077
MODAL	Mode	17	0.001137	0.00007805	0.00004949	0.000000000546	0.94401	0.92082
MODAL	Mode	18	0.001045	0.00013	0.01625	0.000002117	0.94413	0.93707
MODAL	Mode	19	0.001	0.00001447	0.00063	0.0000001259	0.94415	0.9377
MODAL	Mode	20	0.000882	0.00007806	0.00003298	0.000000005788	0.94422	0.93774

Fuente: Autores

Frente al segundo caso se evidencia diferente los valores coinciden respecto a los modos de vibración de la estructura se encuentran ambos en el modo 9 de vibración pero aun igual que el caso anterior se presentan diferencias con respecto a los valores de periodo. El puente en escala real presenta un valor de periodo de 0.51 s que a escala 1:100 seria 0.0051 mientras que el programa muestra un periodo de 0.0046 igual cercano que en caso anterior.

Grafica 2. Modos de vibración vs periodo modelo a escala 1:100

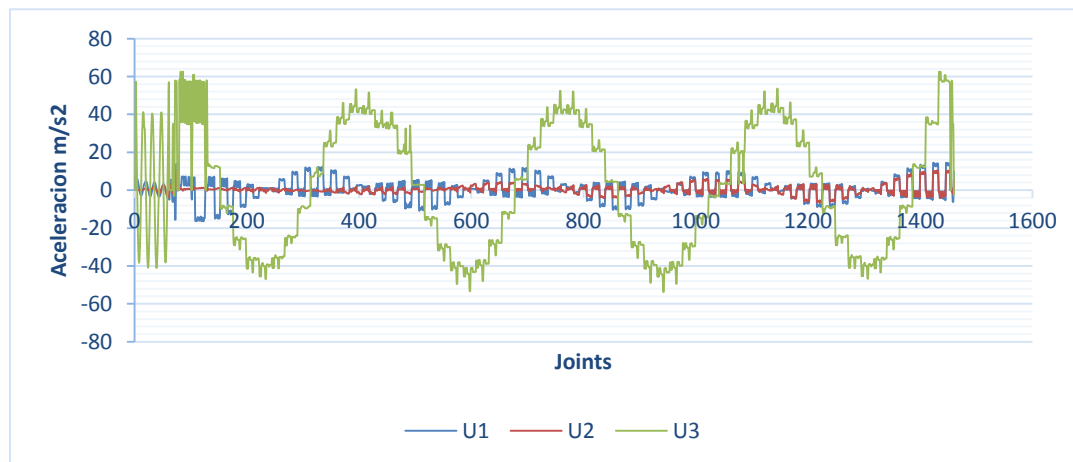


Fuente: Autores

Como se puede ver, la gráfica 2 permite evidenciar que los modos y los periodos tiene la tendencia similar si no es igual a la anterior vista para el modelo real después del 5 modo de vibración se aprecia que los sistemas se regulan frente al periodo fundamental de la estructura., lo que permitirá deducir que los valores si son apropiados a la escala.

7.3.2. Aceleración Absoluta

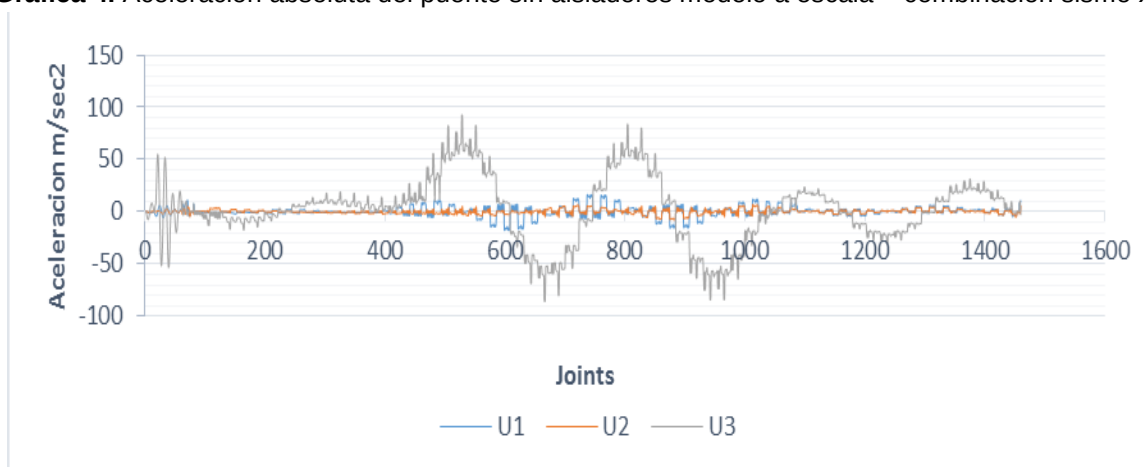
Grafica 3. Aceleración absoluta del puente con aisladores modelo a escala – combinación sismo X.



Fuente: Autores

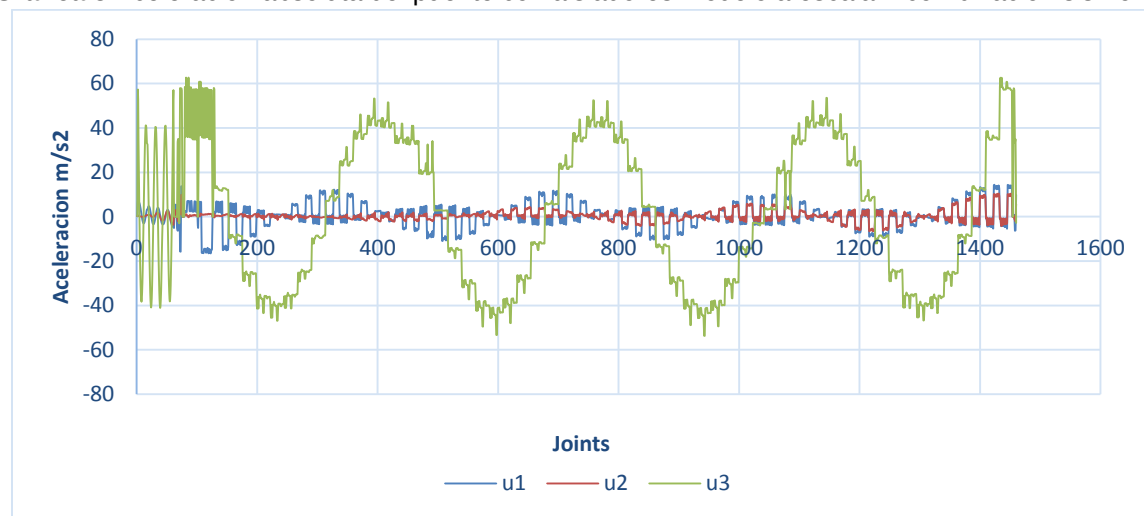
Las variaciones en aceleración del modelo a escala con sistema de aislación frente a uno que no lo tiene, presenta una serie de diferencias como se aprecia en la gráfica 5 y 6 para una combinación de sismo x con lo cual se puede deducir que los joints que hacen parte de la estructura presentan menores valores picos de aceleración frente al sistema tradicional sin aisladores sísmicos. Pero de igual manera con un sistema de aislación los joints que no presentaban aceleración en el primer caso sin sistema de aislación tienen cierto aumento en su aceleración.

Gráfica 4. Aceleración absoluta del puente sin aisladores modelo a escala – combinación sismo X.



Fuente: Autores

Gráfica 5. Aceleración absoluta del puente con aisladores modelo a escala – combinación sismo Y.

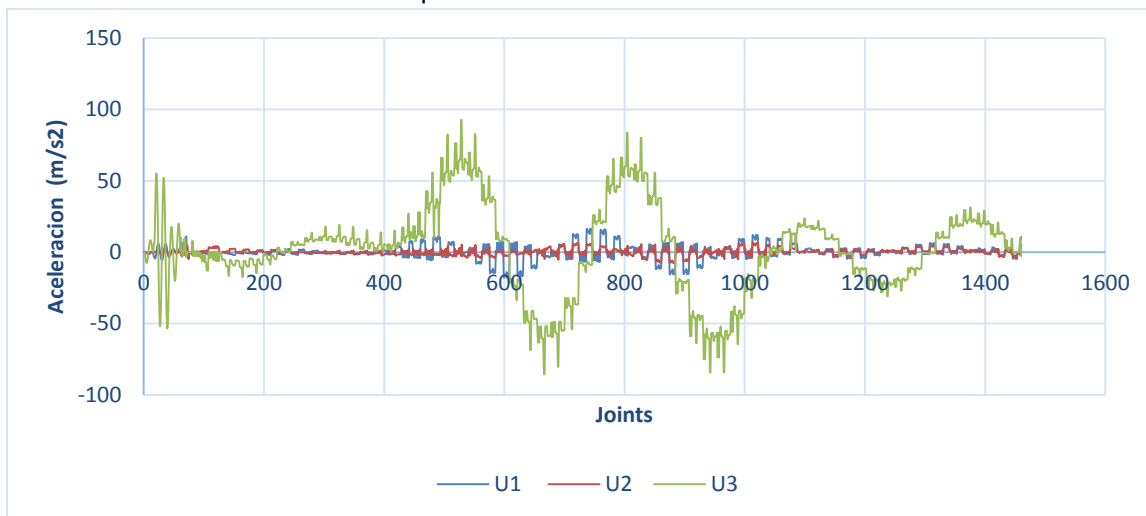


Fuente: Autores

Para la combinación de sismo Y, con sistema de aislación y sin sistema presentan gran similitud con respecto al caso anterior de la combinación para sismo x, esto

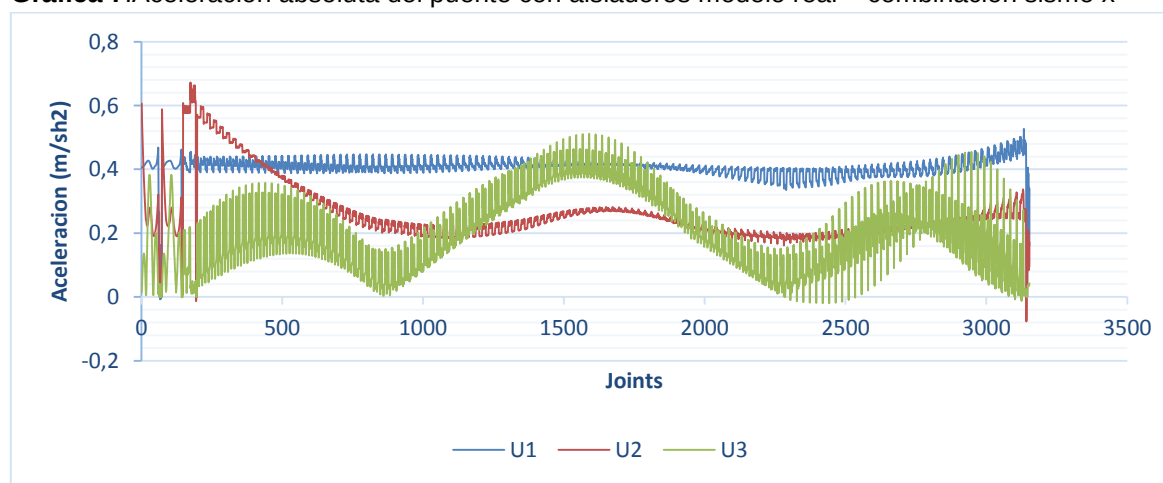
se puede dar tal vez porque los sistemas de aislación tienen características de rigidez efectiva casi iguales tal vez algunos joints presenten variaciones pero los valores para ambos casos son muy parecidas.

Grafica 6 .Aceleración absoluta del puente sin aisladores modelo a escala – combinación sismo Y.



Fuente: Autores

Grafica 7.Aceleración absoluta del puente con aisladores modelo real – combinación sismo x

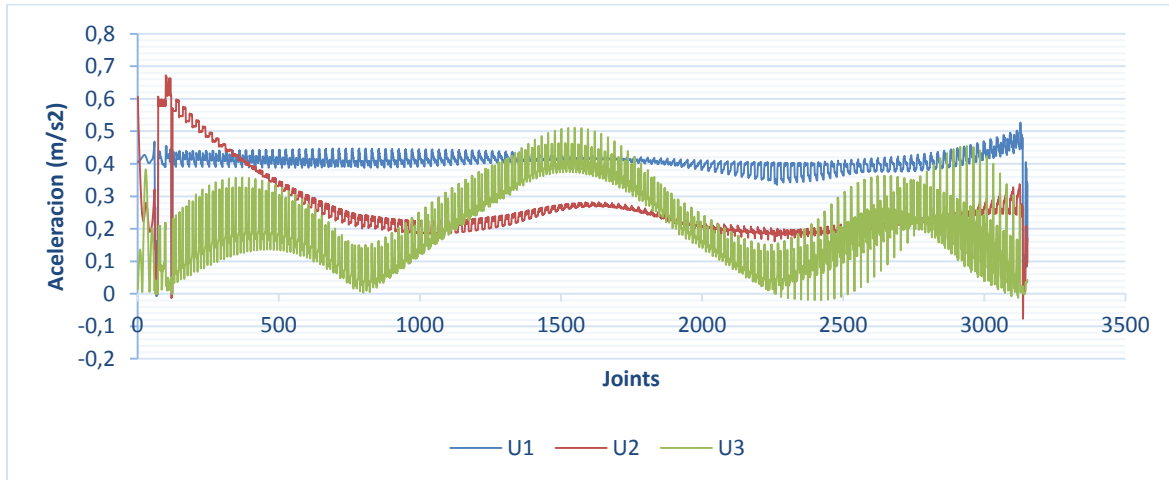


Fuente: Autores

Los valores de aceleración de los modelos con aisladores sísmicos y sin ellos para el prototipo o modelo real cambian de una manera más notoria puesto que este análisis es más detallado y como no se reducen geometrías, cargas ni valores del sistema elástico lineal y no lineal del sistema se evidencia más detallado el comportamiento del aislador, frente a ello las gráficas 7 y 8 , indica que los valores de aceleración son menores frente al modelo a escala y la variación de

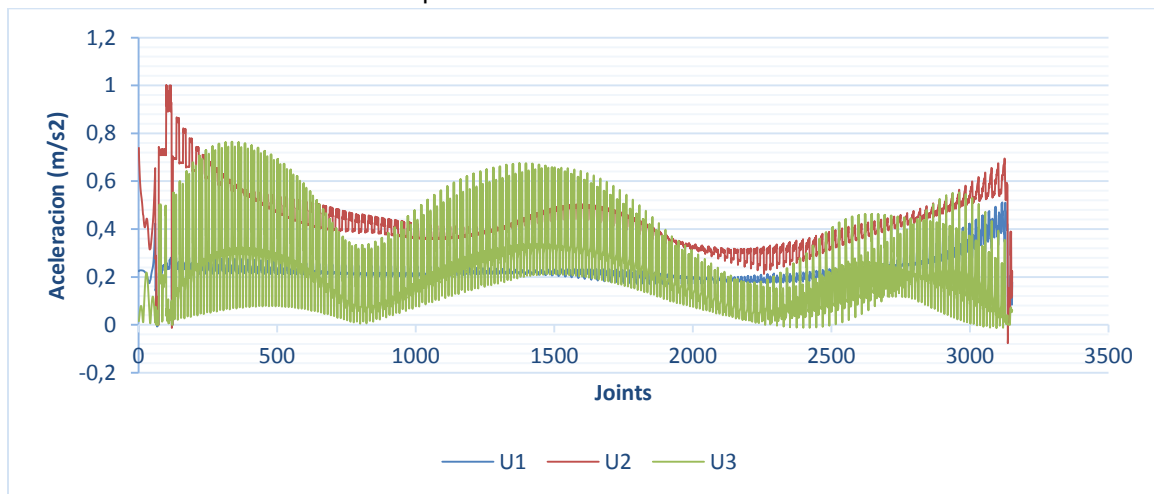
aceleraciones en las 3 direcciones es muy similar con y sin aisladores para la combinación de sismo X.

Grafica 8 .Aceleración absoluta del puente sin aisladores modelo real – combinación sismo x



Fuente: Autores

Grafica 9 .Aceleración absoluta del puente sin aisladores modelo real – combinación sismo Y

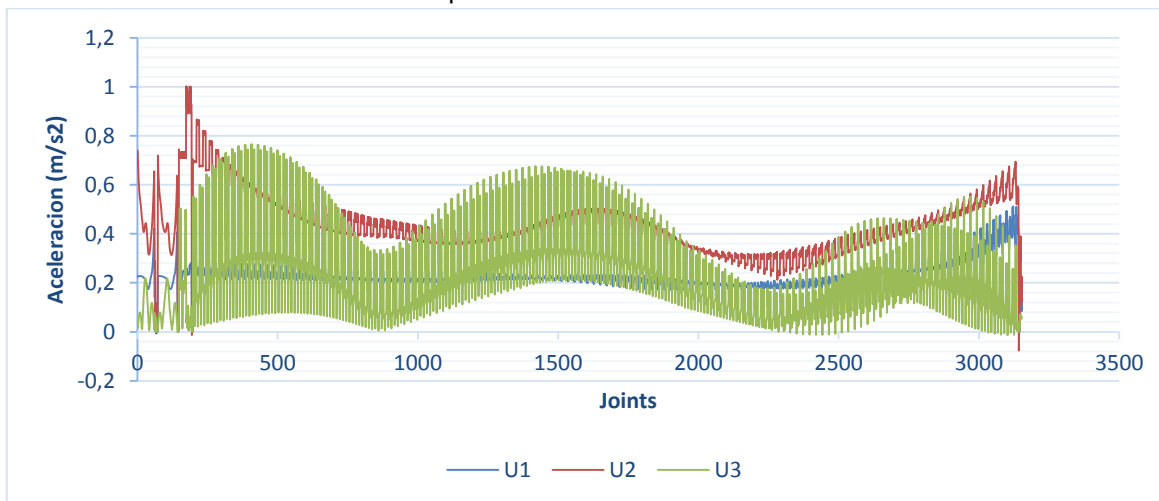


Fuente: Autores

Ahora para el análisis del caso en sismo en y de igual manera cambian frente al modelo a escala puesto que en este caso se presentan similitud los sistemas con y sin aisladores otra diferencia ya abordando ambos casos sismo X y sismo Y es que no hay ninguna similitud entre ninguno de los casos a diferencia del modelo a escala que las aceleraciones con aisladores eran muy parecidas tanto para el caso del sismo X y sismo Y igualmente sin aisladores. Esto no sucede en el modelo

real debido a que los valores macro de todas las características permiten que el programa genere un análisis más detallado.

Grafica 10. Aceleración absoluta del puente con aisladores modelo real – combinación sismo Y



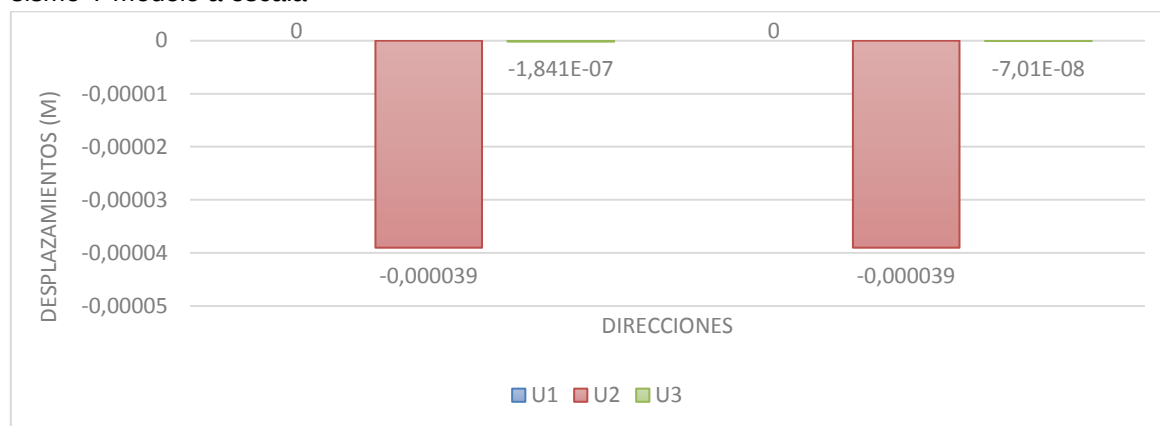
Fuente: Autores

7.3.3. Link (aisladores) desplazamientos- modelo a escala

Los valores de desplazamientos de los links como lo es el neopreno para los estribos norte y sur como para los aisladores sísmicos de las pilas norte y sur. Inicialmente se analizaran los valores presentados en el modelo a escala donde se analizaron los desplazamientos máximos causados por la combinación para sismo X y sismo Y.

Estos desplazamientos son cercanos a cero para la condición de aisladores en todas las direcciones U1, U2, U3. El valor máximo de desplazamiento fue de 0.01m para un estribo con apoyo de neopreno lo que podría inducir a afirmar que la estructura real cumpla con las condiciones de diseño sin el uso de aisladores sísmicos en la base.

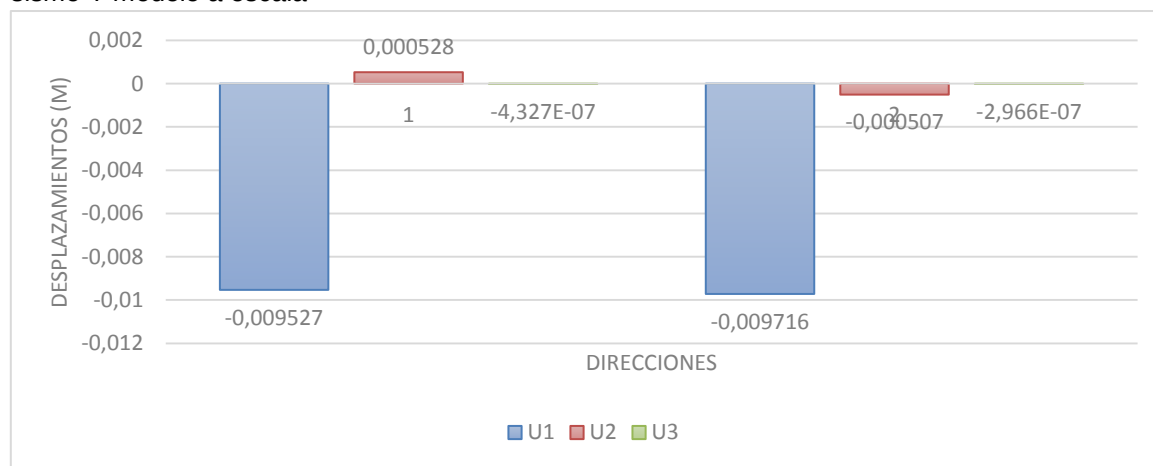
Grafica 11. Variación de desplazamientos máximos aislador sísmico pila norte para combinación sismo Y modelo a escala



Fuente: Autores

La grafica 11 representa el comportamiento del aislador de la pila norte del modelo a escala, frente a el caso de carga sismo y. Donde se aprecia que los desplazamientos máximos se presentan en u2 el equivalente al eje y, el valor máximo presentado en esta dirección fue 0.000039 m una cifra muy baja mientras que los valores en las direcciones x y z son mínimos tanto que en el eje x el valor es igual a cero.

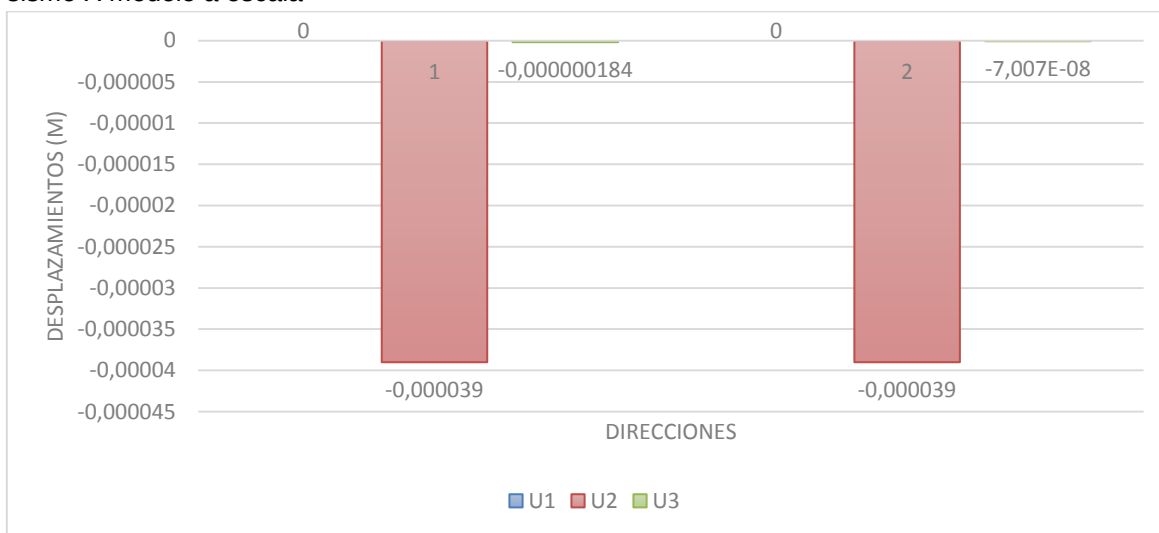
Grafica 12. Variación de desplazamientos máximos aislador sísmico pila sur para combinación sismo Y modelo a escala



Fuente: Autores

Los desplazamientos máximos del aislador en la pila sur se describen en la gráfica 12, se puede identificar que la dirección u1 presenta los valores máximos con respecto a las demás direcciones, aunque el caso de carga de esta grafica sea para un sismo en la dirección y.

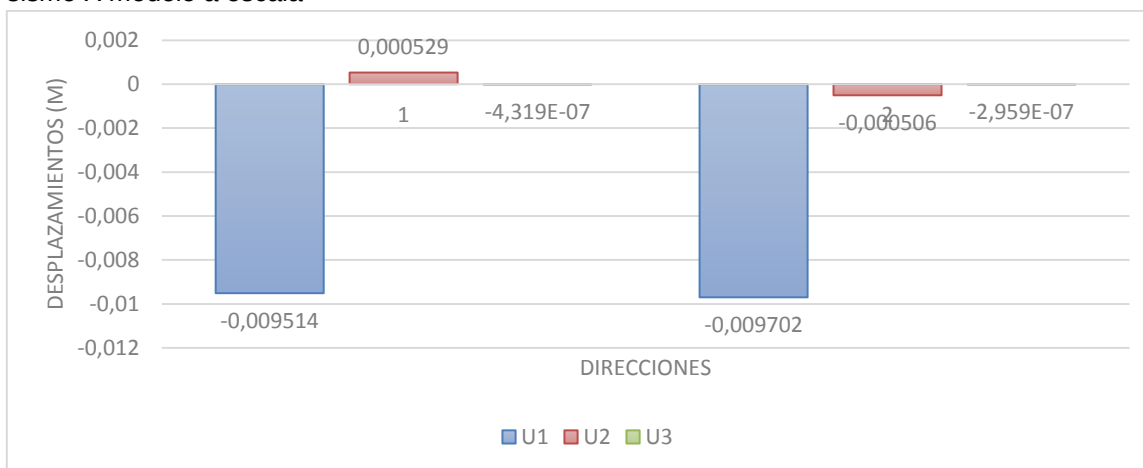
Grafica 13. Variación de desplazamientos máximos aislador sísmico pila norte para combinación sismo X modelo a escala



Fuente: Autores

Los valores que se presentan ahora en el caso de carga para el sismo en dirección x nos permite evidenciar que la rigidez del sistema de aislación para este eje es nula, aunque se presentan valores de desplazamiento el sentido del eje y valor que es igual a 0.000039 muy similar al caso mostrado en la gráfica 11.

Grafica 14. Variación de desplazamientos máximos aislador sísmico pila sur para combinación sismo X modelo a escala



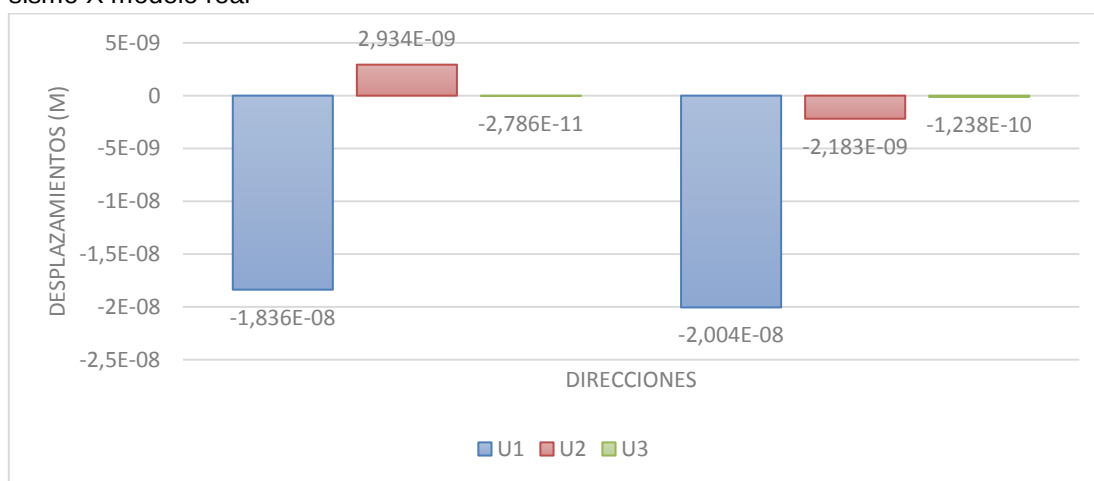
Fuente: Autores

Para la pila sur los valores de desplazamientos en el eje x son mayores frente a los de la pila norte, y los resultados en las direcciones u2 disminuyeron con relación al caso anterior.

7.3.4. Link (aisladores) desplazamientos- modelo real

Para los aisladores en la estructura real los valores entregados por el programa en el análisis son mucho menores a los presentados en el modelo en SAP para el prototipo a escala en todos los apoyos definidos como lo son aisladores y apoyos de neopreno para estribos. Estos desplazamientos causados por las combinaciones en Sismo X y Y. nos permite analizar primero que los aisladores no se deformaran frente a un posible fenómeno sísmico esto debido a que de igual manera el periodo fundamental de la estructura es muy pequeño lo que hace concluir que la estructura del puente presenta una gran rigidez lo cual permite que se presenten estos valores tan pequeños de desplazamientos para los sistemas de apoyo.

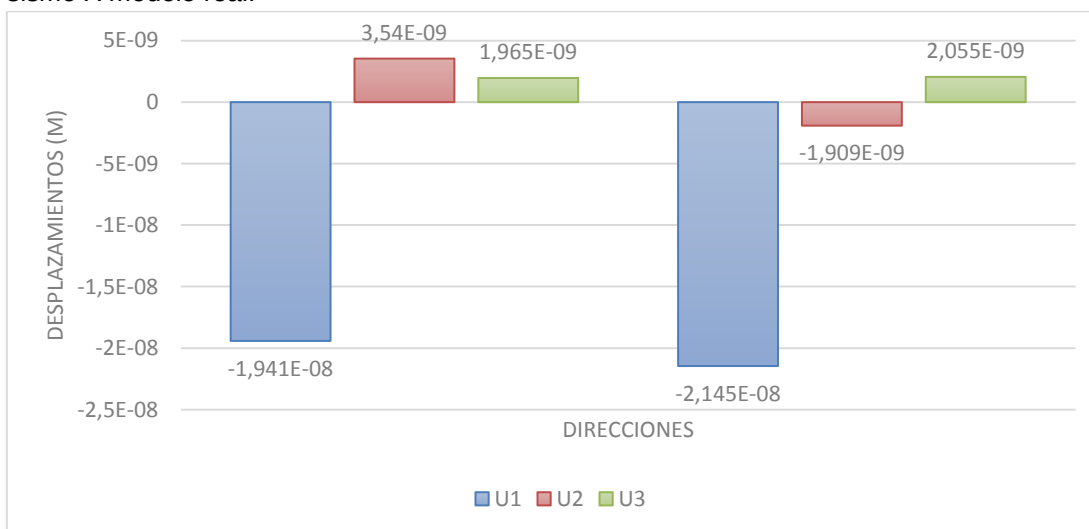
Grafica 15. Variación de desplazamientos máximos aislador sísmico, pila norte para combinación sismo X modelo real



Fuente: Autores

Se aprecia que en la gráfica 15 la cual corresponde a los resultados de desplazamientos de aisladores en el modelo real que los valores en el sentido u1 para un caso en la dirección x son los mayores. Aunque estos valores son demasiado pequeños casi nulos para la escala real. Anteriormente se indicó que la estructura real presentaba unos valores de periodo mínimos por lo cual se podría deducir que esto se debe a que los elementos estructurales que conforman el puente son demasiado rígido lo cual evita que se presente movimientos durante un fenómeno sísmico, debido a esto los aisladores que serán una herramienta de disipación de la energía lograrían disminuir los desplazamientos pero debido a anteriormente expuesto y que el puente sin aisladores tiene una gran rigidez los aisladores no sufrirá desplazamientos como se muestra en la gráfica 15, 16, 17 y 18.

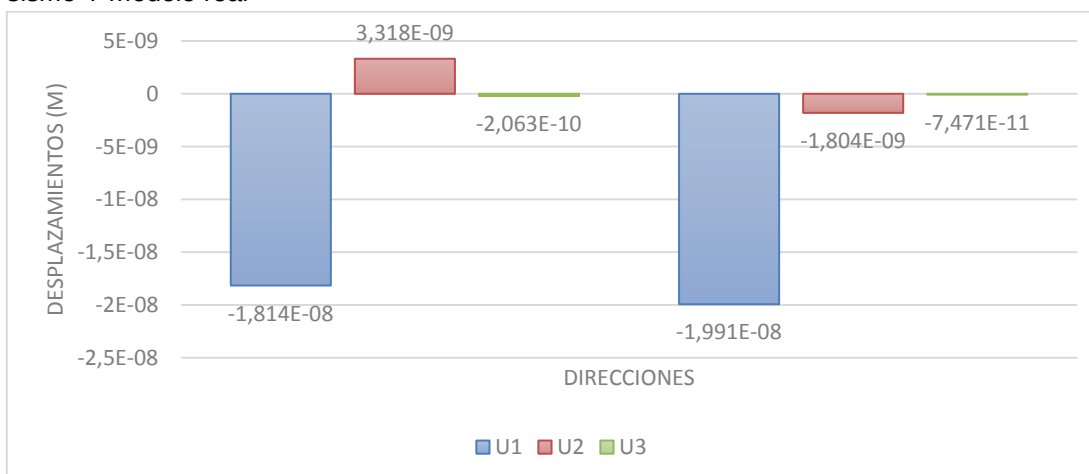
Grafica 16. Variación de desplazamientos máximos aislador sísmico, pila sur para combinación sismo X modelo real.



Fuente: Autores

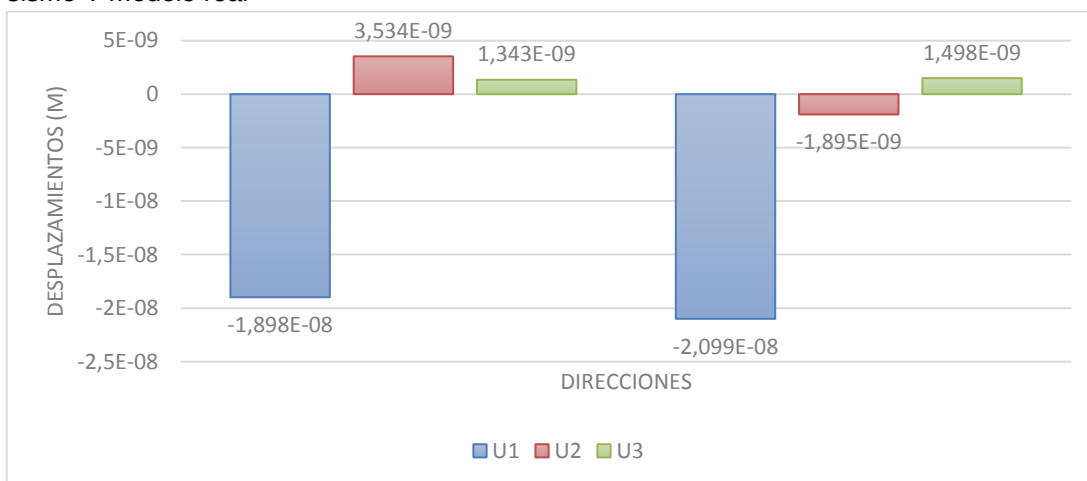
Como se expuso anteriormente los valores que se obtuvieron de los modelos realizados en SAP del modelo real nos muestra que sin importar la dirección del caso de carga ya sea el sismo en la dirección x o el sismo en la dirección y los desplazamientos no serán representativos para causar algún tipo de deformación o deficiencia estructural en la estructura del puente en la gráfica 16, 17, 18 los valores máximos están en la dirección u1 y le sigue la dirección u2 comportamiento que es similar en las dos pilas de apoyo, aunque se presentan unas variaciones en los valores los resultados no tienen un cambio considerable.

Grafica 17. Variación de desplazamientos máximos aislador sísmico, pila norte para combinación sismo Y modelo real



Fuente: Autores

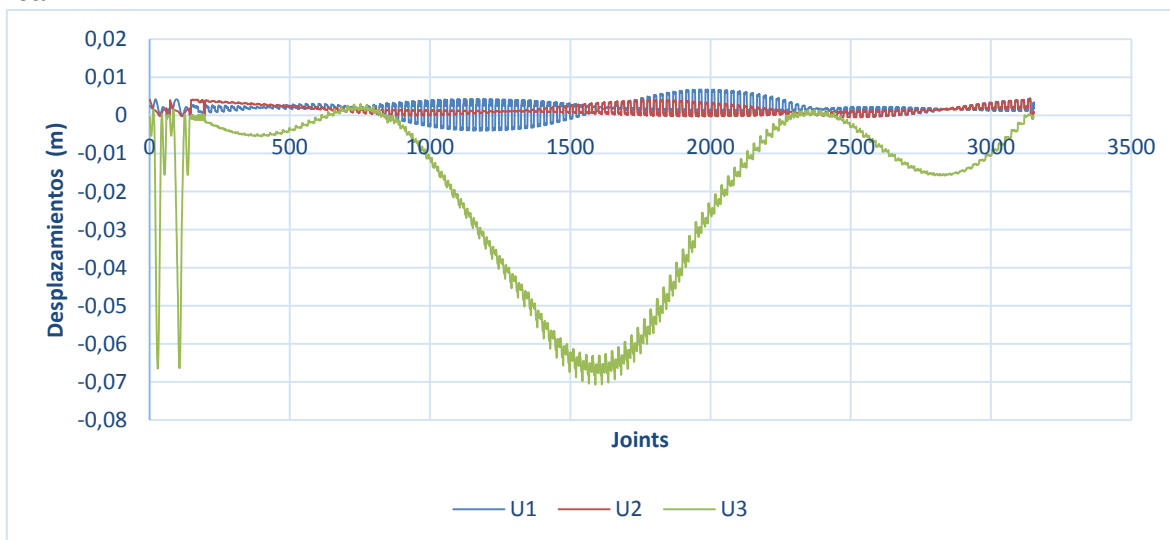
Grafica 18. Variación de desplazamientos máximos aislador sísmico, pila sur para combinación sismo Y modelo real



7.3.5. Desplazamientos totales

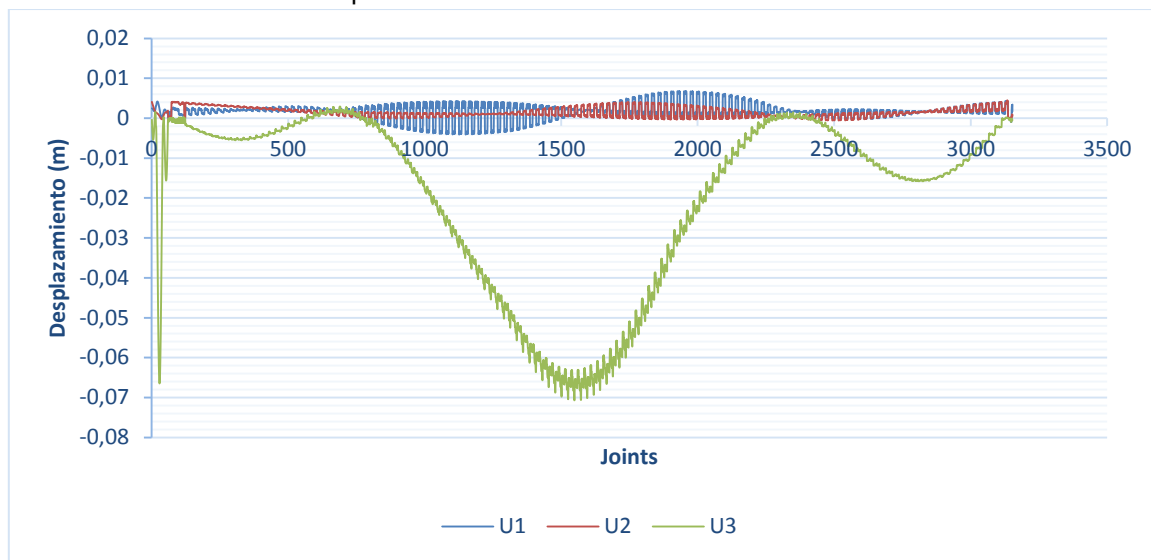
Finalmente se analizaran los desplazamientos totales en cada uno de los joints del sistema estructura del puente inicialmente analizaremos el modelo real el cual en sus resultados nos muestra que los desplazamientos con aisladores el valor pico máximo esta entre -0.06 y -0.08 m en todos los casos con aislador o sin aislador los valores de desplazamiento para Sismo X y Y son prácticamente igual tal vez lo único que se diferencien es que los valores en unos pocos joints disminuyen o aumentan dependiendo el sistema.

Grafica 19. Variación de desplazamientos máximos con aisladores en la base sismo X modelo real



Fuente: Autores

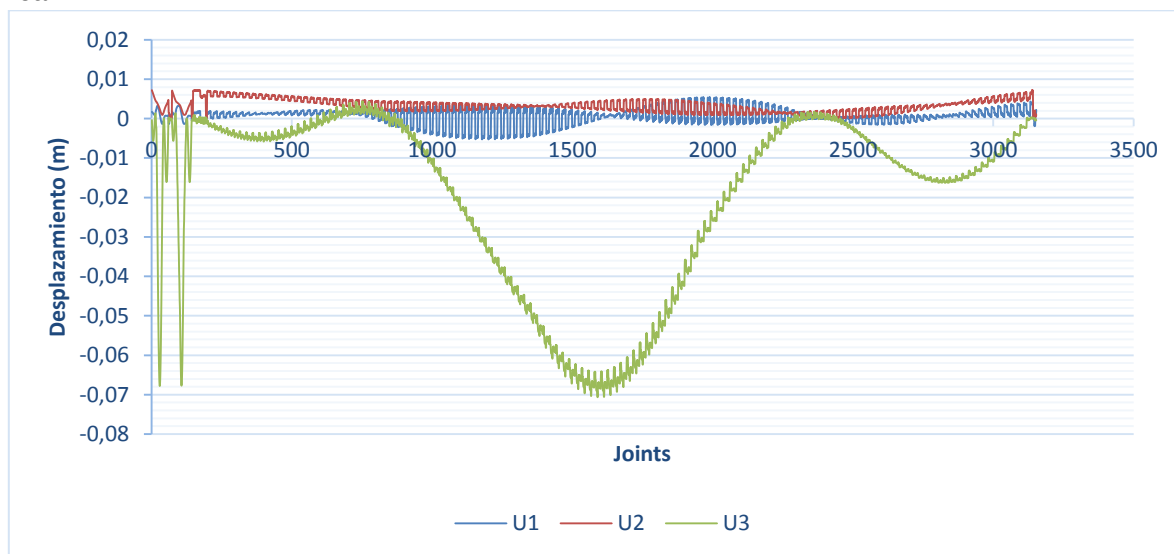
Grafica 20. Variación de desplazamientos máximos sin aisladores en la base sismo X modelo real



Fuente: Autores

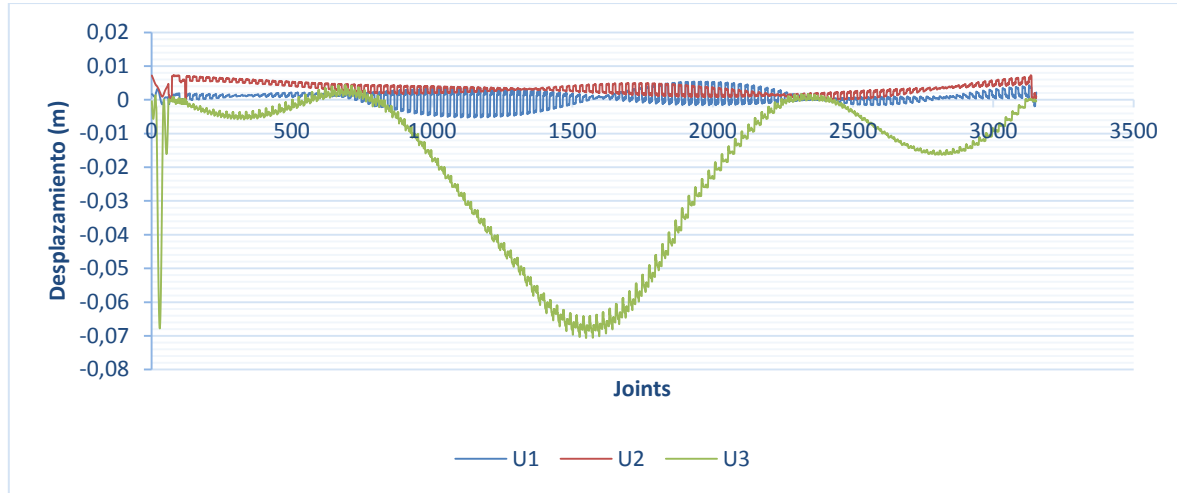
En las gráficas 19,20 ,21 y 22 se muestran el comportamiento a partir de una representación gráfica de los desplazamientos de cada uno de los nodos o joints que conforman parte de sistema estructural del puente donde se puede decir que el máximo valor que puede presentar la estructura durante un fenómeno sísmico será de 0,07 m en la dirección u3, mientras para la direcciones u1 y u2 equivalentes al eje x y y el valor máximo que puede llegar a darse sería de 0.01 m.

Grafica 21. Variación de desplazamientos máximos con aisladores en la base sismo Y modelo real



Fuente: Autores

Grafica 22. Variación de desplazamientos máximos sin aisladores en la base sismo Y modelo real

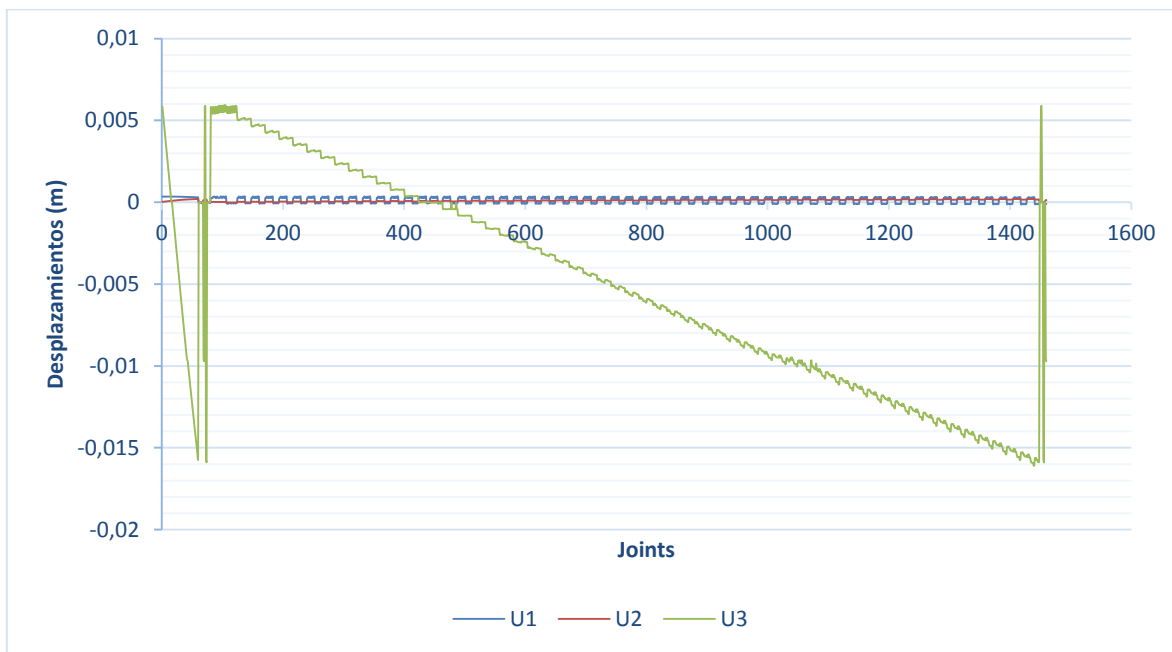


Fuente: Autores

7.3.6. Modelo a escala

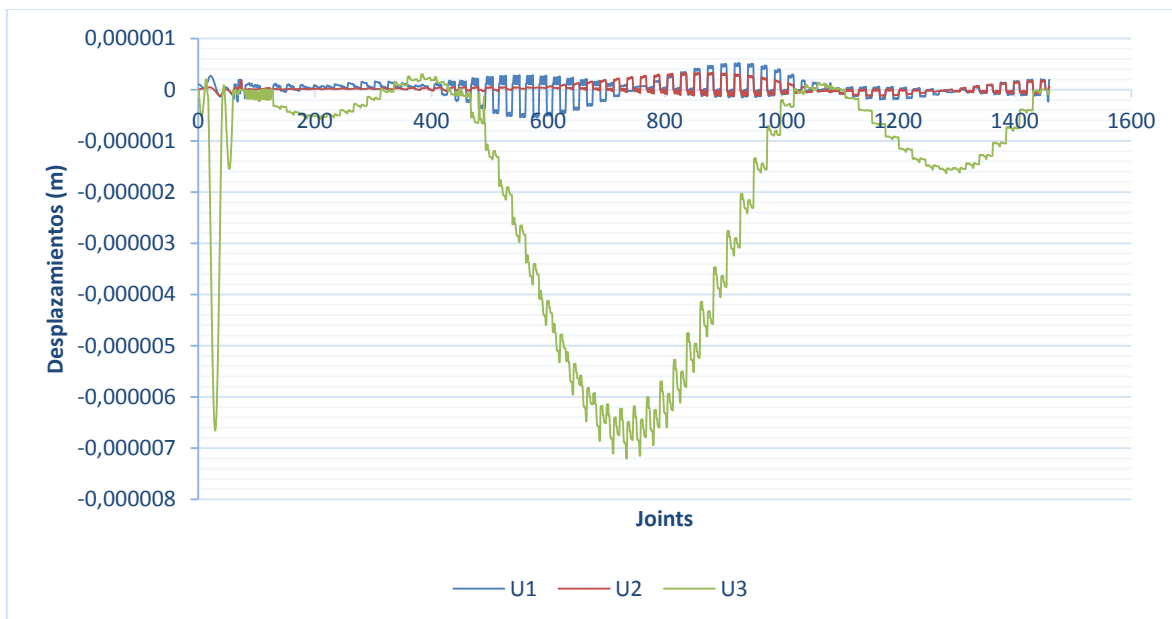
El modelo a escala presenta variaciones en sus resultados de desplazamientos primero los valores del sistema sin aisladores son acordes a la escala esperada frente a los resultados obtenidos en el modelo real otra variación es que los valores no son similares y el comportamiento de los joints con sistema de aislación y sin sistema de aislación, lo primero es que los valores no son cercano los desplazamientos son mayores en el modelo con sistema de aislación están en un rango de 0.015 m su valor pico máximo mientras que sin aisladores es 0.000006 m muy cercano a cero esta condición se puede presentar debido a que los sistemas de aislación aumentan el periodo de vibración y con ello los valores de desplazamiento de tal manera disipar la energía y que los elementos estructurales no se vean afectados estos valores son casi iguales tanto para el caso en Sismo X y Y.

Grafica 23. Variación de desplazamientos máximos con sistema de aislación sismo X modelo a escala



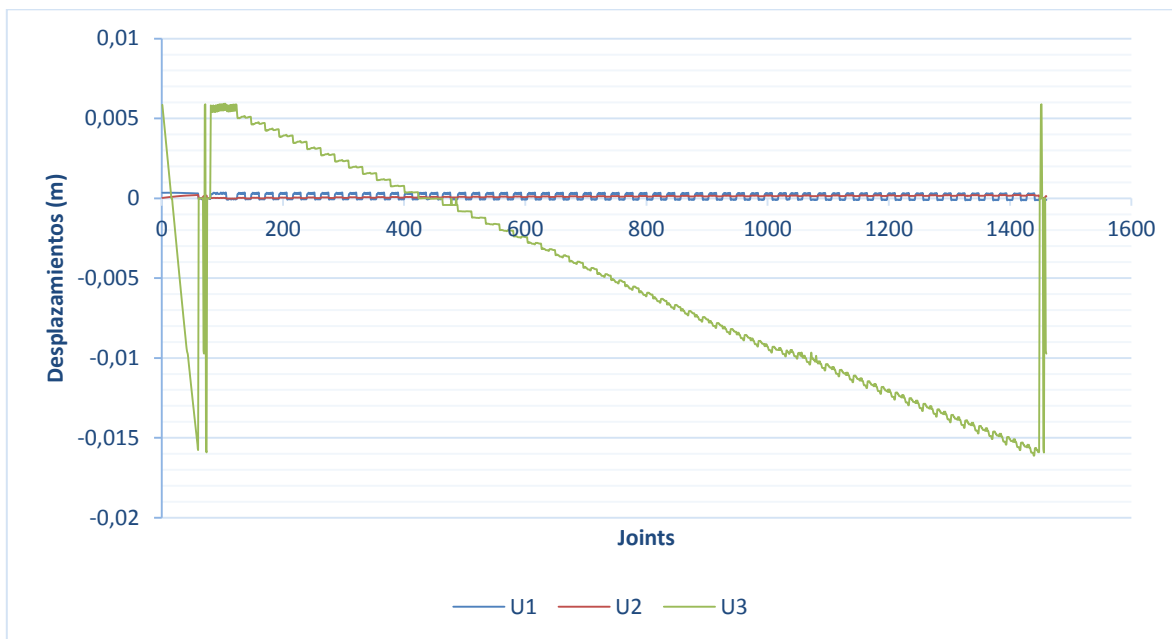
Fuente: Autores

Grafica 24. Variación de desplazamientos máximos sin sistema de aislación sismo X modelo a escala



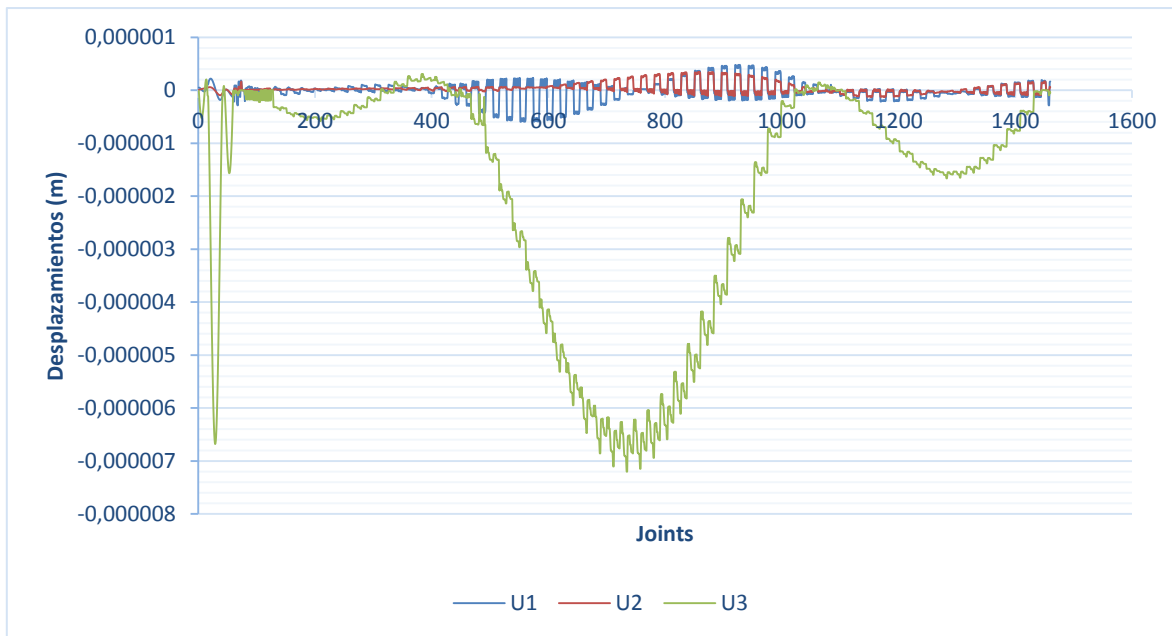
Fuente: Autores

Grafica 25. Variación de desplazamientos máximos con sistema de aislación sismo Y modelo a escala



Fuente: Autores

Grafica 26. Variación de desplazamientos máximos sin sistema de aislación sismo Y modelo a escala



Fuente: Autores

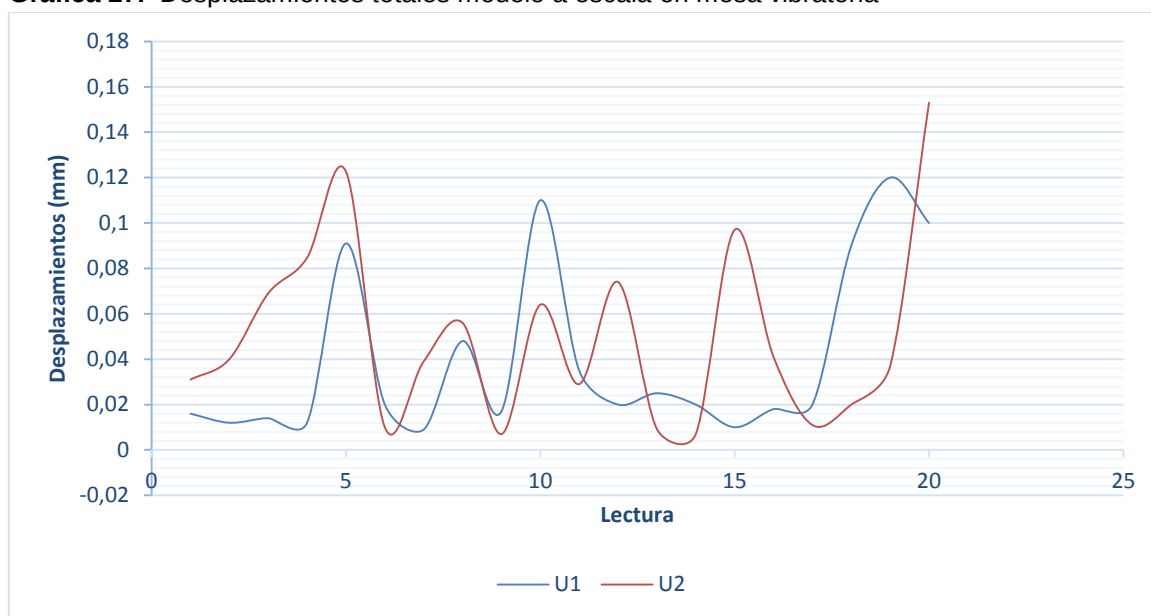
Tabla 29. Valores obtenidos en el ensayo de la mesa vibratoria

Desplazamientos Modelo Escala Mesa vibratoria				
Lectura	Tiempo Lectura (s)	Velocidad Angular RPM	U1	U2
			mm	mm
1	60	24	0,016	0,031
2	60	24	0,012	0,04
3	60	24	0,014	0,069
4	60	24	0,012	0,0847
5	60	24	0,091	0,1227
6	60	24	0,02	0,01
7	60	24	0,009	0,039
8	60	24	0,048	0,056
9	60	24	0,017	0,007
10	60	24	0,11	0,064
11	60	24	0,035	0,029
12	60	24	0,02	0,074
13	60	24	0,025	0,009
14	60	24	0,02	0,007
15	60	24	0,01	0,097
16	60	24	0,018	0,041
17	60	24	0,02	0,011
18	60	24	0,09	0,020
19	60	24	0,12	0,037
20	60	24	0,1	0,153

Fuente: Autores

Finalmente se describen los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio para obtener los resultados de desplazamiento del modelo a escala construido y evaluar si con el sistema de aislación los valores de desplazamiento fuesen similares a los obtenido por SAP en la tabla – y en la gráfica 27 se ilustran la obtención de datos y el comportamiento grafico de la toma de resultados donde para el modelo ensayado en la mesa vibratoria el valor máximo de desplazamiento para un total de 20 ensayos fue de 0.153 lo cual es un valor muy similar al obtenido en SAP en una de sus condiciones lo que nos permite afirmar que los resultados en el ensayo nos muestran que el modelo escala está acorde a el modelo computacional.

Grafica 27. Desplazamientos totales modelo a escala en mesa vibratoria



Fuente: Autores

8. CONCLUSIONES

El comportamiento del puente en el modelo analítico con aisladores sísmicos no contribuye con la reducción de desplazamientos debido a que la configuración del puente actual presenta una gran rigidez, lo que nos permite concluir que el puente sin la implementación de estos tipos de aisladores está diseñado para resistir un fenómeno sísmico en la ciudad de Bogotá estudiado con un espectro de diseño con un amortiguamiento del 5%.

Los resultados obtenidos por el modelo computacional tanto en escala real y reducida presentan variaciones dependiendo del sistema de aislación. Se obtienen mayores valores de periodos en la estructura y en consecuencia menores aceleraciones, provocando que las fuerzas sísmicas disminuyan.

Los modelos a escala son una herramienta práctica que nos permiten evidenciar fenómenos naturales desde una apreciación más analítica, puesto que estos fenómenos reales son difíciles de inducir y de estudiar, por lo cual los modelos constituyen una alternativa para el estudio de edificaciones de gran complejidad. La designación de la escala depende de los problemas constructivos como los materiales, los elementos del laboratorio a utilizar, y cabe decir que la escala entre más pequeña sea puede tener menos efectividad.

Los valores referentes a los cambios de periodos respecto a los sistemas estructurales con y sin aisladores se deben a que el sistema de amortiguamiento de los aisladores sísmicos altera las condiciones normales de una estructura ya sea puentes o edificaciones en concreto por ese motivo se aprecia la variación del periodo fundamental con y sin aisladores en la base tanto para el modelo a escala como para el modelo real.

Los desplazamientos registrados en el ensayo de la mesa vibratoria nos permiten inferir que debido a las condiciones de diseño de los elementos estructurales para la simulación de un prototipo a escala y del sistema de aislación en un material que cumpla con la rigidez equivalente al de un aislador se puede presentar errores de un rango entre el 2 y 4 % durante la lectura y que pueden variar frente al modelo realizado en programa de análisis estructural así como las condiciones de la mesa vibratoria, luego los valores registrados en el ensayo fueron acordes a los calculados en SAP , por tanto el modelo a escala cumple con las condiciones de simulación del prototipo de estudio .

Los desplazamientos máximos son semejantes en el modelo real con y sin aisladores sísmicos, a diferencia del modelo a escala debido a que los valores de desplazamientos obtenidos con sistema de aislación son mayores; frente al que no presenta aislación, los resultados de desplazamientos del modelo a escala cumple con la teoría de escalas del modelo real en las direcciones u_1 y u_2 .

9. RECOMENDACIONES

Si se busca una mayor efectividad es recomendable hacer el modelo a escala reducida con los materiales utilizados en la construcción del modelo real, debido a que si no se busca solo hallar los desplazamientos que dependen del peso y la aceleración, las propiedades de los materiales a utilizar alteran los resultados.

Elegir una escala adecuada, para que los resultados sean similares a los del prototipo, y no uno a escala muy reducida, porque entre más pequeña sea la escala menos confiable serán los resultados.

La silicona es una alternativa para simular la rigidez de un aislador sísmico a escala reducida, pero hay que elaborar más pruebas al material para saber si cumple con todas las propiedades de un aislador.

Definir parámetros de diseño de aisladores sísmicos en la normativa colombiana para el diseño sismo resistente debido a que estos elementos son una posible solución para evitar daños estructurales en edificaciones durante fenómenos sísmicos. La norma incluye en el título A numeral 3-8 donde referencia normativas como FEMA AASHTO normativas utilizadas para el desarrollo de este proyecto pero que debería realizarse a partir de estudios de casos particulares en el país.

Estudiar el comportamiento de estructuras con otro tipo de sistema de apoyo como lo son amortiguadores o aisladores de tipo friccional y evidenciar cual es la mejor opción de disipación de energía que evite desplazamientos y colapsos posteriores en las estructuras.

10. BIBLIOGRAFÍA

Alcaldía mayor de Bogotá. Bogotá permanece atenta.[en línea]. Colombia: Bogotá, 2015.[citado 20 de nov ,2015]. Disponible en: <http://www.bogota.gov.co/temasdeciudad/emergencias>.

AGUIAR, Roberto et al. Aisladores sísmicos de base elastómericos y fps. Primera edición. Quito: Escuela politécnica del ejercito,2008.26p.ISNB: 978-9978-30-104-3.

CSI SAP2000. Información general. [citado 18 octubre, 2015]. Disponible en http://www.csiespana.com/index.php?option=com_content&view=article&id=17&Itemid=45&lang=es.

Capitulo A.3 -Cargas. Código colombiano de puentes del 95. Colombia, 1995. P.

Google maps. Street view. .[en línea]. Colombia: Bogotá, 2015.[citado 20 de nov ,2015]. Disponible en: <https://www.google.com.co/maps/place/Cra.+5,+Bogot%C3%A1/@4.6093774,-74.0698922,17z/data=!3m1!4b1!4m2!3m1!1s0x8e3f9999ac47823f:0x41f91a66ba5cfd36>.

FRINGENIERIA. Descargas. [citado 18 marzo,2016]. Disponible en <http://www.fringenieria.com/descargas/D%20y%20C%20de%20apoyos%20de%20neopreno%20convencionales.pdf>_ Pg 2.

HARRIS,Harry; SABNIS,Gajanan.structural modeling and experimental techniques: Size Effects,Accuracy and Reliability in Materials System and Models.United States of America. 2 ed CRC press 1999.pág. 789.

Holmes Consulting Group.Ltd. Base Isolation of Structures Design Guidelines .Nueva Zelanda.

IDU. Repositorio institucional. [En línea]. Colombia: Bogotá, 2015.[citado 10 de Ene ,2016]. Disponible en: Alcaldía mayor de Bogotá. Bogotá permanece atenta.[en línea]. Colombia: Bogotá, 2015.[citado 20 de nov ,2015]. Disponible en: <http://www.bogota.gov.co/temasdeciudad/emergencias>.

INGEOMINAS.Microzonificación sísmica de Santa fe de Bogotá. Bogotá ingeominas agosto de 1997.87 y 108 p.

INVIAS. Especificaciones Invias 2013.Apoyos y sellos para juntas de puentes. Capítulo 6 Art 642.pg5

LOPEZ, Jeimy; FERREIRA, Jessika; ORTIZ, Luisa .Diseño de Una Mesa Vibratoria para el Análisis del Comportamiento Dinámico de Edificios a Escala. Universidad La Gran Colombia; Facultad de Ingeniería Civil; Bogotá; 2014.P.39.

NEHRP Recommended provision for seismic regulation for new buildings and other structures FEMA 450. [En línea]. Bogotá: UGC. [Citado 15 marzo,2016]. Disponible en http://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1532-20490-7602/fema_450_2_commentary.pdf.

RICO, Leocadio; CHIO, Gustavo. Uso de aisladores de base en puentes de concreto simplemente apoyados. Trabajo de especialización de grado. Universidad industrial de Santander; Facultad de Ingeniería Civil; Bucaramanga; 2011.

ROGER, Meza. Guía de diseño sísmico de aisladores elastomericos y de fricción para la republica de Nicaragua. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero civil. Universidad Nacional de Ingeniería, facultad de ingeniería civil; Nicaragua; 2010.

Tecnoav. Productos y aplicaciones. Aisladores y disipadores sísmicos. [citado 15 octubre, 2015]. Disponible en <http://www.tecnoav.cl/4-aisladores-sismicos-y-disipadores-sismicos/>

Univo. Tesis como opción de grado. Marco teórico conceptual Capítulo III. [citado 15 octubre, 2015]. Disponible en http://www.univo.edu.sv:8081/tesis/019116/019116_Cap3.pdf.

VIDEZ, Felix. Metodología para realizar modelos de concreto reforzado a escala reducida. . Universidad industrial de Santander; facultad de ingeniería civil; Bucaramanga; 2006.

11. ANEXOS N° 1

PLANOS IDU

