



Análisis del deslizamiento de elastómero reforzado convencional en puentes de vigas postensadas para zonas de amenazas sísmica alta.

Jasmin Alejandra Zapata Vélez

Informe de Práctica para optar al Título de Ingeniera Civil

Tutor:

Carlos Alberto Riveros Jerez, Doctor (PhD)

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Civil
Medellín, Antioquia, Colombia
2023

Cita	(Zapata, 2023)
Referencia	Zapata Vélez, L. (2023). <i>Análisis del deslizamiento de elastómero reforzado convencional en puentes de vigas postensadas para zonas de amenazas sísmica alta.</i> , [Trabajo de grado profesional].
Estilo APA 7 (2020)	Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: Jhon Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Julio Cesar Saldarriaga

Jefe departamento: Lina Maria Berroute Cadavid

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	8
Abstract.....	8
Introducción.....	10
1 Objetivos.....	12
1.1 Objetivo general	12
1.2 Objetivos específicos	12
2 Marco teórico.....	13
2.1 Aspectos Generales de deslizamiento de elastómeros reforzados con acero	13
2.2 Planteamiento teórico del deslizamiento del Neopreno	18
2.2.1 Constante de rigidez del apoyo de elastómero reforzado.....	19
2.2.2 Formulación teórica de deslizamiento de elastómeros reforzados.....	19
3 Metodología.....	21
3.1 Etapa preliminar: criterios generales	21
3.1.1 Geometría.....	21
3.1.2 Cargas estáticas	23
3.1.3 Cargas sísmicas	23
3.2 Etapa 1: Diseño de apoyos de elastómero	23
3.2.1 Diseño apoyos de elastómero reforzado en estribos.	23
3.3 Etapa 2: Modelación de puente de vigas postensadas	24
3.3.1 Modelación de puente de vigas postensadas con elastómeros reforzados con acero sin considerar el deslizamiento.....	25
3.3.2 Modelación de puente de vigas postensadas con elastómeros reforzados con acero considerando el deslizamiento.....	26
4 Resultados.....	29
4.1. Coeficientes de rigidez del elastómero para modelación sin deslizamiento	29
4.1. Función del elastómero para modelación con deslizamiento	29
4.1.1 Eje 1 y Eje 6, luz de 25 m	29

4.1.2 Eje 2 y Eje 5, luz de 25 m.	31
4.1.3 Eje 2, Eje 3, Eje 4 y Eje5, Luz de 35 m	33
4.2 Comportamiento de elastómeros reforzados sin deslizamiento.	36
4.2.1 Periodo del puente.....	36
4.2.2 Pseudo-aceleración de la estructura.	37
4.2.3 Cortante Basal	37
4.2.4 Desplazamiento espectral en el eje 1 del puente.	38
4.3 Comportamiento de elastómeros reforzados con deslizamiento.	39
4.3.1 Periodo del puente.....	39
4.3.2 Pseudo-aceleración de la estructura.	40
4.3.3 Cortante Basal	40
4.3.4 Desplazamiento espectral en el eje 1 del puente.	41
5 Análisis.	42
6 Conclusión.....	44
7 Referencias	45

Lista de figuras

Figura 1	Comportamiento de elastómeros reforzados cuando no están anclados.	14
Figura 2	Comportamiento de elastómeros reforzados cuando no están anclados.	14
Figura 3	Comportamiento de elastómeros reforzados de acero, cuando está sometido a deslizamiento entre superficies de contacto.	15
Figura 4	Comportamiento de elastómeros reforzados de acero, cuando está sometido a deslizamiento bajo cargas laterales.....	17
Figura 5	Perfil puente vigas postensadas	21
Figura 6	Planta puente vigas postensadas.	22
Figura 7	Sección transversal tablero (25,0 m y 35.0 m) – puente de vigas postensadas	22
Figura 8	Sección de elastómeros para estribos y apoyos intermedios – puente de vigas postensadas	24
Figura 9	Definición de rigidez de elastómeros para estribos– puente de vigas postensada.....	25
Figura 10	Definición de rigidez de elastómeros para apoyos intermedios – puente de vigas postensadas.....	25
Figura 11	Definición de rigidez de elastómeros para apoyos estribos, luz de 25 m – puente de vigas postensadas	26
Figura 12	Definición de rigidez de elastómeros para apoyos intermedios, luz de 25 m – puente de vigas postensadas	27
Figura 13	Definición de rigidez de elastómeros para apoyos intermedios, luz de 35 m – puente de vigas postensadas.	28
Figura 14	Función del comportamiento del deslizamiento para el elastómero del eje 1 y el eje 6, luz de 25,0 m- Puente de vigas postensadas.	31
Figura 15	Función del comportamiento del deslizamiento para el elastómero del eje 2 y el eje 5, luz de 35,0 m- Puente de vigas postensadas.	32
Figura 16	Función del comportamiento del deslizamiento para el elastómero del eje 3, eje 4, eje 4 y el eje 5, luz de 35,0 m- Puente de vigas postensadas.	35
Figura 17	Obtención de la Pseudo-aceleración de la estructura cuando se tiene en cuenta el deslizamiento del elastómero– puente de vigas postensadas.	37
Figura 18	Desplazamiento espectral en la dirección longitudinal y transversal del eje 1 del puente.....	38

Figura 19 Obtención de la Pseudo-aceleración de la estructura cuando se tiene en cuenta el deslizamiento del elastómero– puente de vigas postensadas. 40

Figura 20 Desplazamiento espectral en la dirección longitudinal y transversal del eje 1 del puente..... 41

Lista de tablas

Tabla 1 Propiedades físicas correlacionadas 29

Tabla 2 Constante de rigidez del elastómero, carga permanente, fuerza de fricción estática para eje 1 y eje 2, luz de 25 m – puente de vigas postensadas. 29

Tabla 3 Datos de fuerza y desplazamientos del elastómero reforzado tipo 1 - puente de vigas postensadas..... 30

Tabla 4 Constante de rigidez del elastómero, carga permanente, fuerza de fricción estática para eje 2 y eje 5, luz de 35 m – puente de vigas postensadas. 31

Tabla 5 Datos de fuerza y desplazamientos del elastómero reforzado tipo 2 - puente de vigas postensadas..... 32

Tabla 6 Constante de rigidez del elastómero, carga permanente, fuerza de fricción estática para eje 2, eje 3, eje 4 y eje 5, luz de 35 m – puente de vigas postensadas..... 33

Tabla 7 Datos de fuerza y desplazamientos del elastómero reforzado tipo 2 - puente de vigas postensadas..... 34

Tabla 8 Periodo de la estructura cuando no se tiene en cuenta el deslizamiento del elastómero– puente de vigas postensadas..... 36

Tabla 9 Cortante basal de la estructura cuando se tiene en cuenta el deslizamiento del elastómero– puente de vigas postensadas..... 38

Tabla 10 Periodo de la estructura cuando se tiene en cuenta el deslizamiento del elastómero– puente de vigas postensadas..... 39

Tabla 11 Cortante basal de la estructura cuando se tiene en cuenta el deslizamiento del elastómero– puente de vigas postensadas..... 41

Tabla 12 Resumen de resultados. 43

Lista de ecuaciones

Ecuación 1: Constante de rigidez del elastómero 19

Ecuación 2: Deformación de cortante 19

Ecuación 3: Deformación de cortante 20

Siglas, acrónimos y abreviaturas

CCP-14

Norma Colombiana de diseño de puentes

Resumen

El presente estudio presenta el análisis del comportamiento de elastómeros reforzados con acero, cuando son utilizados como sistemas de conexión entre la superestructura y la subestructura de puentes de vigas postensadas en zonas de amenaza sísmica alta. Adicionalmente, se plantea evaluar el comportamiento del puente bajo 2 escenarios, el primero considerando que el elastómero no se desliza entre las superficies de contacto y el segundo cuando si se presenta un deslizamiento entre el neopreno y el concreto. Bajo estas dos alternativas, se esperaría que el puente se vea sometido a diferentes sollicitaciones sísmicas, debido al comportamiento del elastómero reforzado.

Se plantea la modelación de un puente de vigas postensadas con 5 luces bajo la alternativa no de deslizamiento y de deslizamiento de elastómeros reforzados con acero, se evaluó el comportamiento dinámico del puente bajo las dos alterativas y se encontró que cuando se presenta el deslizamiento del elastómero entre las dos superficies de contacto el periodo del puente aumenta, lo que hace que la estructura sea más flexible y la pseudo aceleración de la gravedad disminuya, al igual que el cortante basal al que es sometido dicho puente.

Palabras clave: Puente, vigas postensadas, elastómero reforzado, zonas de amenazas sísmica, deslizamiento.

Abstract

This study presents the analysis of the behavior of steel-reinforced elastomers when used as connection systems between the superstructure and the substructure of post-tensioned beam bridges in high seismic hazard zones. Additionally, it is proposed to evaluate the behavior of the bridge under 2 scenarios, the first one considering that the elastomer does not slip between the contact surfaces and the second one when sliding between the neoprene and the concrete does occur. Under these two alternatives, the bridge would be expected to be subjected to different seismic requests, due to the behavior of the reinforced elastomer.

The modeling of a post-tensioned beam bridge with 5 spans under the non-sliding and sliding alternative of steel-reinforced elastomers is proposed. The dynamic behavior

of the bridge was evaluated under both alternatives, and it was found that when the elastomer sliding between the two contact surfaces occurs, the period of the bridge increases, which makes the structure more flexible and the pseudo acceleration of gravity decreases, as well as the basal shear to which the bridge is subjected.

Introducción

De acuerdo con el instituto distrital de gestión del riesgo y cambio climático (IDIGER) de Bogotá (IDIGER, 2021), en Colombia hay una actividad sísmica importante, presentando una categorización de diferentes niveles de amenaza sísmica (alta, intermedia y baja), donde aproximadamente el 83% de la población se encuentra en una zona de sismicidad alta e intermedia. Razón por la cual, las estructuras diseñadas en el país deben de cumplir con las normativas nacionales e internacionales vigentes para que puedan tener un tiempo de vida útil, cumpliendo con los estándares mínimos de seguridad y viabilidad de uso. Además, el diseño estructural no debe centrarse solamente en el cumplimiento de la seguridad de los elementos estructurales, sino también en los elementos de conexión entre estos, ya que son importantes en el comportamiento general y unificado de estructuras como puentes, los cuales contribuyen a darle continuidad a la red vial de una región sobre fuentes hídricas y/o topografías escapadas (Soldano, 2018)

Los puentes se diseñan para soportar cargas gravitacionales y laterales, asociadas al peso propio de la estructura, cargas vehiculares, expansión y contracción del concreto, fuerzas inducidas por el viento, fuerzas sísmicas, entre otras. Razón por la que el diseño debe garantizar una transmisión de las cargas entre la superestructura y la subestructura, es aquí donde cobran relevancia los elementos de conexión, que además permiten la transferencia y disipación de energía durante los eventos extremos como los sismos (CCP-14, 2014). La Normativa colombiana pone en consideración diferentes tipos de apoyos como los multi-rotacionales de carga alta, elementos de superficie curva o en forma de disco y elastómeros reforzados con acero (CCP-14, 2014)

Los apoyos de elastómero reforzados con acero están compuestos por diferentes capas simultáneas de caucho o elastómero (neopreno) y platinas de acero; estas últimas proporcionan rigidez vertical y el elastómero tiene una alta flexibilidad horizontal, de esta manera el apoyo soporta las cargas verticales sin generar desplazamientos significativos en esta misma dirección y las propiedades elásticas del material facilitan la disipación de energía por medio de desplazamientos horizontales (Dominguez y Rodriguez, 2018). A pesar de las ventajas de los elastómeros reforzados con acero, la normativa especifica una limitación cuando los apoyos son sometidos a cargas laterales que exceden la fuerza de

fricción generada entre las superficies de contacto, la cual consiste en anclar los elastómeros a la superficie de contacto (CCP-14, 2014).

Los elastómeros reforzados con acero son diseñados normalmente para satisfacer las condiciones del nivel de servicio como los movimientos de expansión y contracción del hormigón los efectos del frenado, entre otros (Xiang et al., 2021). Sin embargo, estudios indican que los elastómeros reforzados tienen la capacidad de soportar cargas laterales mayores a las inducidas por condiciones de servicio, ya que el apoyo se desliza cuando no presenta ningún sistema de anclaje al hormigón, este comportamiento permite que se genere un casi-aislamiento sísmico y que esta tipología de apoyo pueda ser empleada como elementos de disipación sísmica en zonas de amenaza sísmica moderada (Steelman et al., 2013).

En el presente estudio, se evalúa el deslizamiento friccional de apoyos de elastómero convencionales, su influencia en la respuesta global del puente cuando es construido en zona de amenaza sísmica alta. Para esto, se realiza el modelo de un puente de vigas postensadas apoyado sobre apoyos de elastómero reforzados con acero, cuyo diseño debe cumplir con lo estipulado en la CCP-14.

Dentro de la modelación se consideran 2 alternativas para el comportamiento del elastómero reforzado ante fuerzas sísmicas laterales; en la primer alternativa el comportamiento está controlado por las propiedades físico-mecánicas de los materiales del apoyo, las cuales proporcionan un comportamiento elástico lineal determinado por una constante de rigidez k del elastómero, en la segunda alternativa, la respuesta del elastómero reforzado considera la interacción entre las superficies de contacto y el deslizamiento inducido cuando las fuerzas laterales exceden la fuerza de fricción.

1 Objetivos

1.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de deslizamiento de apoyos de elastómero reforzados convencionales, en puentes de vigas postensadas ante solicitudes de carga sísmica alta

1.2 Objetivos específicos

- Determinar la formulación matemática para el comportamiento del elastómero reforzado convencional cuando es sometido a deslizamiento friccional
- Modelar el deslizamiento de los elastómeros reforzados convencionales como un comportamiento bilineal para zonas de amenaza sísmica alta
- Analizar la variación de la respuesta sísmica del puente de vigas postensadas, teniendo en cuenta el deslizamiento friccional.

2 Marco teórico

2.1 Aspectos Generales de deslizamiento de elastómeros reforzados con acero

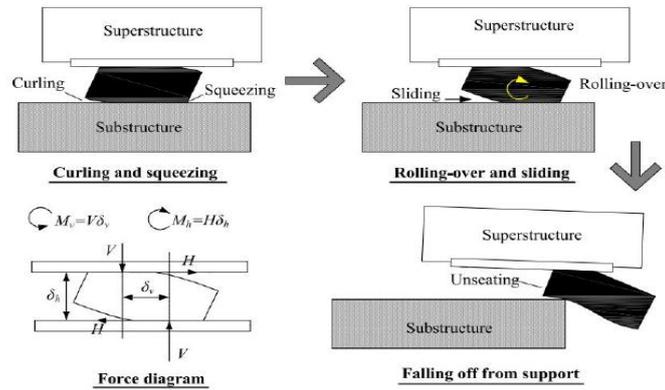
Los elastómeros reforzados con acero han sido de amplio interés investigativo, debido a que las propiedades físico-mecánicas permiten acomodar las rotaciones y las deformaciones que se dan en los puntos de apoyo en condiciones de servicio del puente (Castaño, 2022). Adicionalmente, son elementos ampliamente usados porque son de fácil comercialización e instalación entre la superestructura y subestructura (English et al., 1994)

En el presente estudio se resalta que hay 3 formas de instalación de los elastómeros reforzados, en la primera configuración los elastómeros tienen ambas caras libres en contacto con el hormigón, en la segunda configuración las caras del elastómero están ancladas con pernos al hormigón y la tercera configuración la cara superior está anclada al hormigón y la cara inferior está totalmente libre, cada una de estas alternativas condiciona el comportamiento del elastómero durante un evento sísmico y el patrón de daño de los elementos estructurales del puente (Xiang et al., 2021)

Para la primera configuración con ambas caras libres, la única fuerza que se opone al movimiento del elastómero es la fuerza de fricción, cuando inicia el sismo con una amplitud pequeña, el elastómero se ve sometido a deformación por cortante, acompañado de deformaciones de compresión y alabeo (volcamiento) en los bordes del elastómero; posteriormente con el aumento en la magnitud del sismo el alabeo aumenta gradualmente y se combina con la respuesta de deslizamiento por fricción que se da en la superficie de contacto, este comportamiento puede inducir desplazamientos permanentes en el elastómero de manera que pierde su capacidad de soporte y que la superestructura quede desplazada con respecto al eje de la subestructura (Xiang et al., 2021), lo anterior se muestra en la *Figura 1*.

Figura 1

Comportamiento de elastómeros reforzados cuando no están anclados.

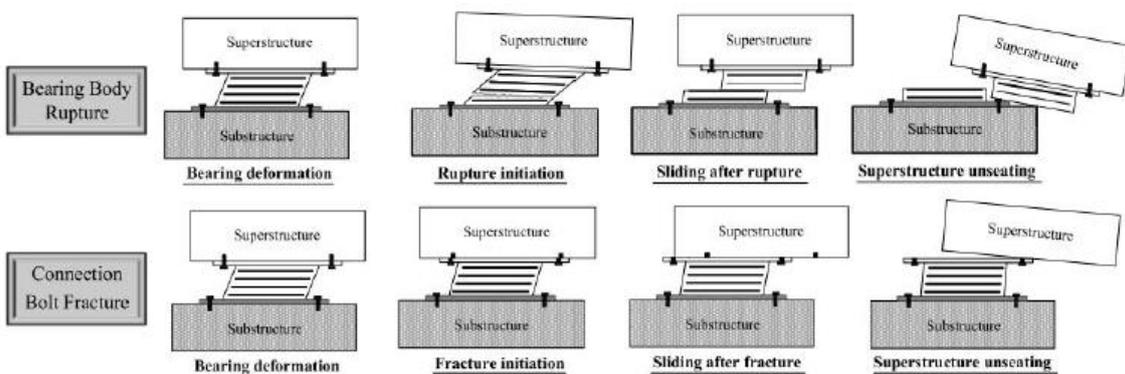


Nota: Se muestra el comportamiento del elastómero reforzado con acero cuando no está anclado en la superficie de contacto. Fue tomado de (Xiang et al., 2021).

En la segunda configuración, los apoyos están anclados en ambas caras y tienen la característica de aprovechar en mayor proporción la capacidad a cortante del elastómero y controla en mayor medida los desplazamientos relativos entre la superestructura y la subestructura. El mecanismo de falla cuando son adheridos en ambas caras es una falla por cortante del perno de anclaje y por deslaminación o separación de las láminas de acero con el caucho entre las capas, induciendo mayores solicitaciones en la estructura (Xiang et al., 2021), como se ilustra en la **Figura 2**.

Figura 2

Comportamiento de elastómeros reforzados cuando no están anclados.



(a) Two seismic damage mechanisms for fully bonded elastomeric bearings

Nota: Se muestra el comportamiento del elastómero reforzado con acero cuando está anclado en la superficie de contacto. Fue tomado de (Xiang et al., 2021).

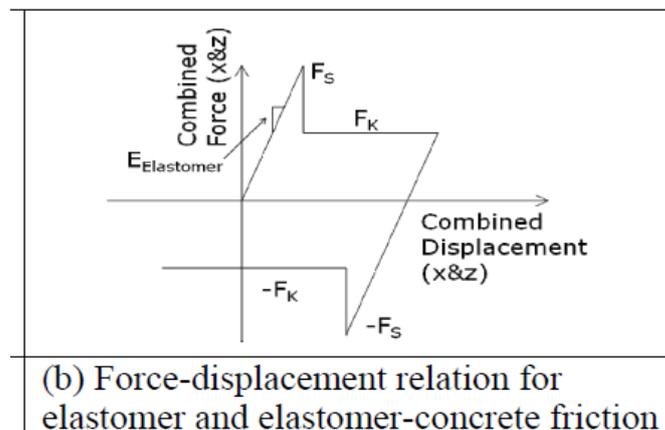
La tercera configuración, es un híbrido entre las dos condiciones anteriores, donde se considera la cara superior anclada y la cara inferior libre, esta configuración permite que se aproveche la capacidad cortante del elastómero en la primera etapa de aplicación de la fuerza, presentando una configuración de manera lineal y que ayuda a restringir los desplazamientos de la estructura, después de que se excede la fuerza de fricción crítica, se inicia el deslizamiento por fricción, limitando la acumulación de fuerzas y evitando daños en la subestructura al tener un funcionamiento similar a un aislador sísmico (Xiang et al., 2021).

Ahora bien, el enfoque principal de este estudio es evaluar el deslizamiento en los elastómeros reforzados cuando están totalmente libres; de esta manera se tiene que el deslizamiento se da cuando la estructura es sometida a una fuerza lateral que supera la fuerza de fricción que se genera en la superficie de contacto entre el elastómero y el hormigón (Xiang et al., 2021).

El comportamiento del elastómero está controlado al inicio del sismo por una condición estática bajo un respuesta elástica lineal del elastómero, hasta que la fuerza de fricción se alcanza en la interface del elastómero y del hormigón, en este punto se genera el deslizamiento y el modelo entra en una condición cinética, donde la fuerza entre las superficies de contacto se reducen a la fuerza de fricción cinética, esta condición se mantiene hasta que la fuerza es inferior a la fuerza de fricción cinética, lo cual hace que la parte inferior del elastómero se detenga y entre en la condición estática nuevamente y se reinicia el ciclo de carga (Filipov et al., 2011).

Figura 3

Comportamiento de elastómeros reforzado de acero, cuando está sometido a deslizamiento entre superficies de contacto.



Nota: Se muestra el comportamiento del elastómero reforzado con acero cuando es sometido a cargas laterales que superan la fuerza de fricción, de esta manera se induce un deslizamiento en el elastómero. Fue tomado de (Filipov et al., 2011)

En la **Figura 3** se muestra el comportamiento explicado anteriormente, donde se genera una alternancia entre la adhesión y el deslizamiento entre dos superficies, denominado “Stick-Slip”, el cual se produce por la variación en la fuerza de fricción entre superficies de contacto, consecuencia de que el coeficiente de fricción estático es mayor al coeficiente de fricción cinético, de manera que cuando se presenta una fuerza lateral que supera la fuerza de fricción estática, esta cambia a la fuerza de fricción cinética, provocando una variación en la velocidad del movimiento (Kligerman Varenberg, 2014).

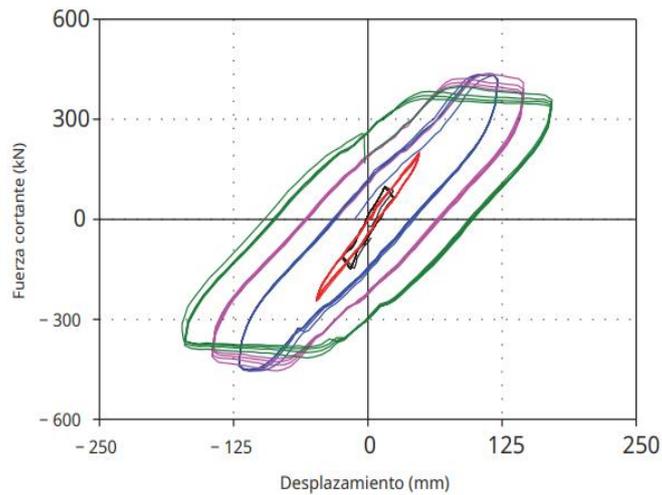
La determinación de la fuerza de fricción tanto estática como cinética del elastómero con otra superficie es compleja, ya que el coeficiente de fricción depende de la geometría, la carga normal, la temperatura y la composición del elastómero (INTERNATIONAL STANDARD ISO 15113, 2015). Sin embargo, investigaciones plantean metodologías que permiten obtener la fuerza de fricción teniendo en cuenta el comportamiento de “stick-slip”, donde se induce el deslizamiento de una de las superficies con respecto a la otra, donde se presenta una fuerza que se opone al movimiento, la cual es monitoreada para determinar la relación entre esta y la fuerza normal, conocido como coeficiente de fricción; la obtención del coeficiente de fricción cinético está en función de la variación en la velocidad con la que se impulsa una superficie en relación con la otra y el coeficiente de fricción estático se obtiene cuando la velocidad más baja induce un movimiento apenas perceptible del elastómero (INTERNATIONAL STANDARD ISO 15113, 2015), en la literatura se tienen valores para el coeficiente de fricción estático y cinético de 0.35 y 0.15, respectivamente (Filipov et al., 2011), en otras investigaciones el coeficiente de fricción estático se encuentra entre 0.2 y 0.4 (Liu et al., 2008).

La instalación de elastómeros reforzados con acero totalmente libres tiene ventajas proporcionadas por el mecanismo de fricción entre las superficies de contacto, ya que se genera una curva de histéresis de forma bilineal que representa la energía disipada por el elastómero cuando es sometido a cargas laterales, inicialmente se evidencia una forma estrecha lineal donde la disipación de energía es mínima, cuando el desplazamiento

aumenta el elastómero experimenta un mayor deslizamiento por fricción y hay mayor disipación de energía, a medida que aumentan los ciclos la fuerza de fricción empieza a disminuir (Liu et al., 2008), como se muestra

Figura 4

Comportamiento de elastómeros reforzados de acero, cuando está sometido a deslizamiento bajo cargas laterales.



Nota: Se muestra el comportamiento del elastómero reforzado con acero cuando es sometido a cargas laterales que superan la fuerza de fricción, de esta manera se induce un deslizamiento en el elastómero y se da una liberación de energía controlada con un ciclo histéretico. Fue tomado de (Li y Wu, 2017)

Siguiendo el concepto anterior, se ha discutido que el mecanismo de deslizamiento por fricción de los elastómeros se podría considerar como un cuasi-aislamiento y es investigado como una alternativa para mejorar la resistencia de los puentes ante eventos sísmicos, ya que el elastómero se diseña como un fusible, de manera que exceda su capacidad última y falle garantizando así que el puente continúe en operación y no colapse (Filipov et al., 2011). De esta manera, los elastómeros reforzados se usan ampliamente en china, una de las razones es que el deslizamiento por fricción entre las dos superficies de contacto reduce las cargas sísmicas transmitidas a la superestructura, esto juega un papel importante en el aislamiento sísmico (Li y Wu, 2017).

Un claro ejemplo de que las fuerzas inerciales del sismo pueden reducirse debido al efecto de cuasi-aislamiento sísmico proporcionado por el deslizamiento del neopreno, se pudo observar en el terremoto de Taiwán del 21 de septiembre de 1999, donde

aproximadamente el 90% de los puentes no tuvieron daños graves en sus elementos estructurales, ya que el deslizamiento limitó la transferencia de cargas sísmicas a las columnas de los puentes, provocando daños pequeños en las mismas, de lo cual se deduce que la respuesta global en cuanto a la demanda de la fuerza en la columna disminuyó (Liu et al., 2008).

Una limitación del uso de los elastómeros totalmente libres es que el desplazamiento del elastómero con respecto a la posición inicial aumenta gradualmente con el sismo, esto hace que la superestructura quede desplazada con respecto a la subestructura (Steelman et al., 2013). Esta consecuencia se asocia a que no hay una fuerza restauradora que garantice que el elastómero vuelva a su posición inicial después de los ciclos de histéresis (Hu Li, 2012), esto puede ocasionar que el elastómero pierda su capacidad de soporte vertical (Xiang et al., 2021). Este comportamiento se evidenció en el sismo de Taiwán del 21 de septiembre, donde la superestructura quedó desplazada con respecto a la subestructura (Liu et al., 2008).

En la literatura se recomienda aumentar las dimensiones del asiento o viga cabezal para evitar que con el desplazamiento del neopreno y de la superestructura con respecto a la subestructura, se dé la caída de la superestructura (Liu et al., 2008), otra alternativa viable es aumentar la rigidez a cortante del elastómero, con esto se puede garantizar una fuerza restauradora que permita que el sistema vuelva a la condición inicial, inclusive después de varios ciclos, disminuyendo así los desplazamientos excesivos de las vigas y/o superestructura (Hu Li, 2012). También, se puede anclar la parte superior del elastómero, de este modo se aprovecha en mayor magnitud la capacidad a cortante del elastómero y se controlan los desplazamientos, garantizando de igual modo las ventajas del deslizamiento como como disipador sísmico (Xiang et al., 2021).

2.2 Planteamiento teórico del deslizamiento del Neopreno

De acuerdo con la CCP-14 (2014), el diseño del neopreno debe cumplir con requerimientos específicos y debe tener propiedades físicas específicas.

2.2.1 Constante de rigidez del apoyo de elastómero reforzado.

La constante de rigidez del elastómero reforzado se calcula con la **Ecuación 1**

$$k = \frac{G * A}{e}$$

Ecuación 1: Constante de rigidez del elastómero

Donde,

k: constante del elastómero

A: Área del elastómero (m²)

e: espesor del elastómero, depende del diseño (m)

G: Módulo de cortante del elastómero (PSI)

2.2.2 Formulación teórica de deslizamiento de elastómeros reforzados

Se tiene en cuenta que el comportamiento del elastómero reforzado con acero, bajo cargas laterales presenta dos fases mostradas a continuación:

2.2.2.1 Adherencia

En la primera fase se presenta una condición estática del elastómero, donde hay una respuesta elástica lineal controlada por el coeficiente de rigidez del elastómero, el cual se determina como se especificó en el ítem anterior.

2.2.2.2 Deslizamiento

En la segunda fase el comportamiento del elastómero, una vez la fuerza lateral inducida supera la fuerza de fricción estática y se genera el deslizamiento, el cual es controlado por la fuerza de fricción cinética. La fuerza de fricción estática y dinámica se determina de la siguiente manera.

Fuerza de fricción estática

$$Fr_s = \mu_s * N$$

Ecuación 2: Deformación de cortante

Donde,

μ_s : Es el coeficiente de fricción estático (0.20)

N: Cargas verticales asociadas al peso propio de la superestructura (ton).

Fr_s: Fuerza de fricción estática (ton).

Fuerza de fricción cinética

$$Fr_c = \mu_c * N$$

Ecuación 3: Deformación de cortante

Donde,

μ_c: Es el coeficiente de fricción cinético (0.15)

N: Cargas verticales asociadas al peso propio de la superestructura (ton).

Fr_c: Fuerza de fricción estática (ton).

2.2.2.3 Combinación de adherencia y deslizamiento.

El comportamiento del deslizamiento es un conjunto de los comportamientos especificados anteriormente, si se aplica la base matemática especificada en el ítem 2.2.2.1 y en el 2.2.2.2, la función que controla este comportamiento se evidencia en la ***Figura 3.***

3 Metodología

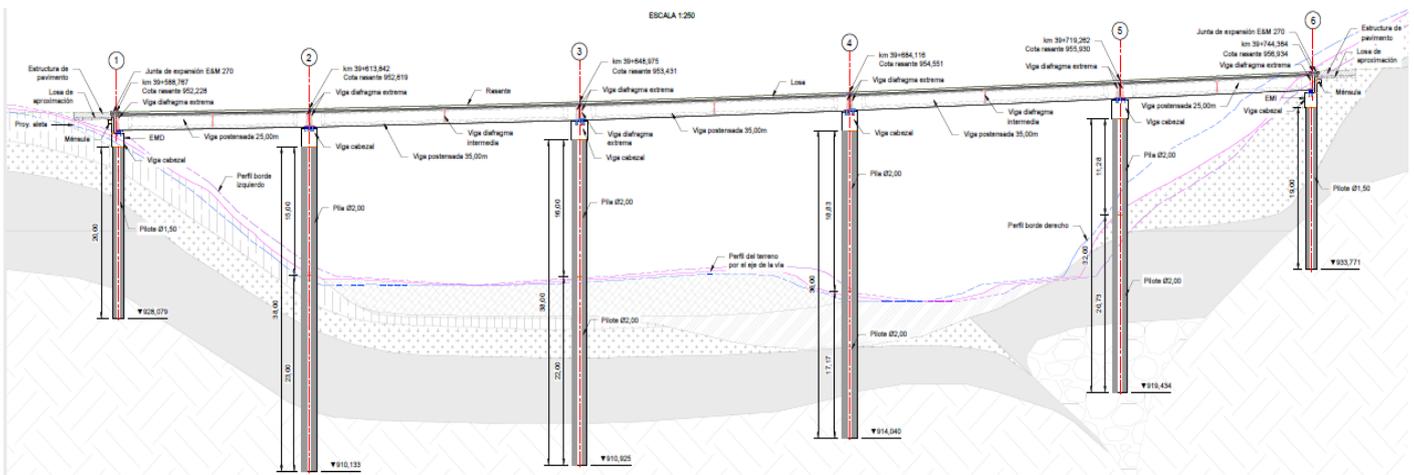
3.1 Etapa preliminar: criterios generales

3.1.1 Geometría

Estudiando la topografía, el alineamiento vial, las condiciones hidráulicas, las facilidades constructivas y disposición de materiales, se consideró como alternativa óptima un puente con cuatro vigas “P” postensadas de altura constante.

Se tendrán para la estructura cinco (5) luces de 25 y 35 m con una longitud total de 155 m aproximadamente, como se muestra en la **Figura 5**

Figura 5
Perfil puente vigas postensadas



Nota: Muestra el perfil del puente de vigas postensadas objetivo de estudio con 2 luces de 30.0 m y 40.0 m y fue tomado de la base de datos de L&L consultores (L&L, 2023).

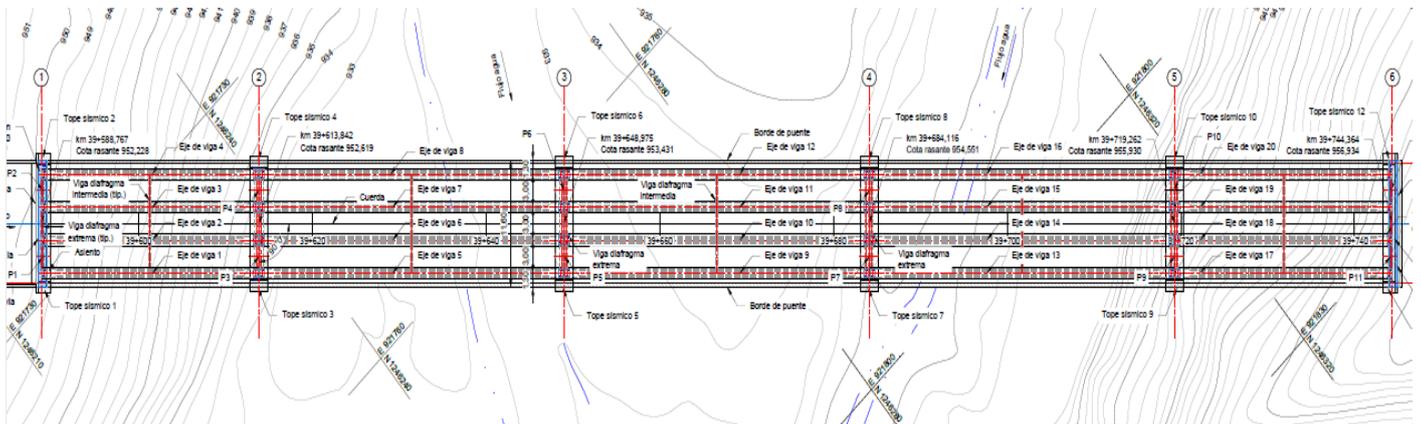
3.1.1.1 Geometría de losa, vigas postensadas y apoyos del puente.

Para la luz de 25 m se plantea un tablero conformado por tres (4) vigas postensadas con doble tensionamiento de 1,83 m de altura y patines de 1,03 m, simplemente apoyadas en los apoyos intermedios, soportando una losa de concreto reforzado de 11,60 m de ancho y 0,23 m de espesor. La luz de 30 m está conformada por un tablero de tres (4) vigas postensadas con doble tensionamiento de 1,83 m de altura y patines de 1,07 m,

simplemente apoyadas en los apoyos intermedios, soportando una losa igual a la anterior.

En la **Figura 6** se representa la geometría

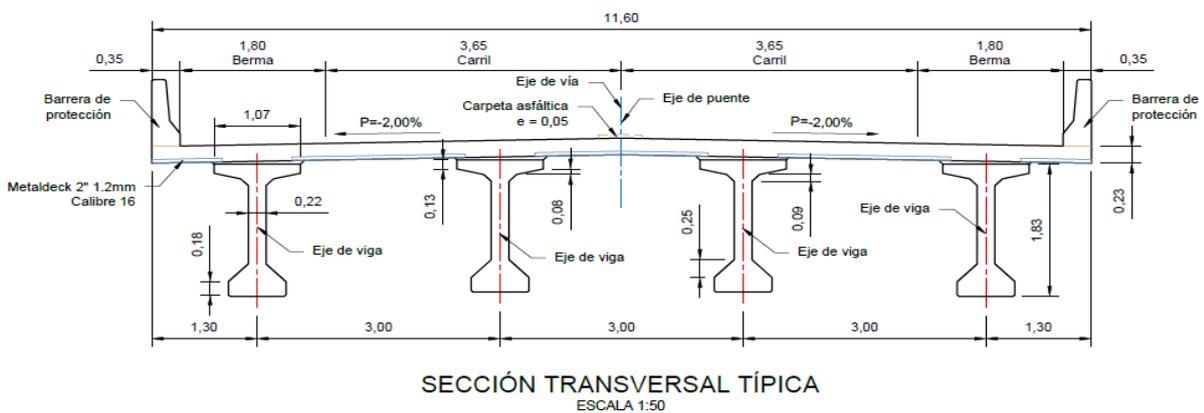
Figura 6
Planta puente vigas postensadas.



Nota: Muestra la planta del puente vigas postensadas objetivo de estudio con 5 luces de 25.0 m y 35.0 m y fue tomado de la base de datos de L&L consultores (L&L, 2023).

El puente dispondrá de dos (2) carriles de 3,65m, con bermas de 1,80 m en ambos costados y contará con barreras para protección vehicular tipo new jersey de 0.35 m en cada costado como se muestra en la **Figura 7**.

Figura 7
Sección transversal tablero (25,0 m y 35.0 m) – puente de vigas postensadas



Nota: Muestra la sección transversal del puente de vigas postensadas objetivo de estudio para la luz de 25.0 m y 35.0 m, fue tomado de la base de datos de L&L consultores (L&L, 2023).

3.1.2 Cargas estáticas

De acuerdo con lo especificado en los requerimientos de la CCP-14, se tienen en cuenta las cargas muertas asociadas al peso propio de la superestructura y las cargas vivas asociadas al vehículo de diseño.

3.1.3 Cargas sísmicas

3.1.3.1 Espectro de diseño

Teniendo en cuenta el objetivo del presente estudio, de analizar el comportamiento del deslizamiento de elastómeros reforzado en una zona de amenaza sísmica alta, se tomó como ubicación del puente Neiva-Mocoa y se definieron los parámetros del espectro de diseño, teniendo en cuenta la tipología de suelo, en este caso D y los criterios de diseño especificados en la CCP-14. Para el espectro de diseño se deben usar el coeficiente de aceleración pico del terreno (PGA), el coeficiente de periodo corto (S_s) y el coeficiente de periodo largo (S_1).

3.2 Etapa 1: Diseño de apoyos de elastómero

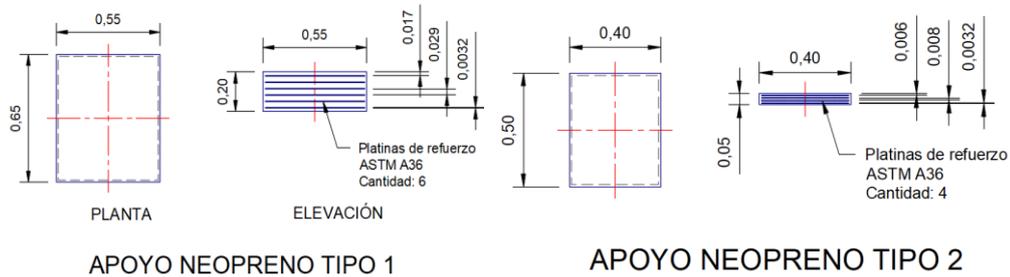
3.2.1 Diseño apoyos de elastómero reforzado en estribos.

Para determinar la geometría de los elastómeros se realiza el diseño teniendo en cuenta lo especificado en la CCP-14, las cargas verticales asociadas al peso propio de la superestructura y a las cargas vivas de diseño del puente.

Para el puente de la presente modelación se tienen dos tipos de neoprenos, los neoprenos tipo 1, tienen una altura de 0.20m y una sección transversal de 0.65mx0.55m y están ubicados en los estribos en los cuales se apoyan vigas postensadas de 25m de longitud. Los neoprenos tipo 2, tienen una altura de 0.05m y una sección transversal de 0.40mx0.50m y están ubicados en los apoyos intermedios, en los cuales se apoyan vigas postensadas de 35m de y 25m de longitud. En las siguientes figuras se presenta la geometría de los apoyos.

Figura 8

Sección de elastómeros para estribos y apoyos intermedios – puente de vigas postensadas



Nota: Muestra la geometría de los elastómeros del puente de vigas postensadas objetivo de estudio para los estribos y los apoyos intermedios, respectivamente, fue tomado de la base de datos de L&L consultores (L&L, 2023).

Para el diseño del espesor del neopreno se debe garantizar los criterios especificados en el marco teórico basados en la CCP-14 y se realiza un proceso iterativo teniendo en consideración los desplazamientos espectrales inducidos por las fuerzas horizontales en la modelación del puente completo.

3.3 Etapa 2: Modelación de puente de vigas postensadas

Para encontrar los desplazamientos espectrales se debe realizar el montaje del puente de vigas postensadas como se indica a continuación.

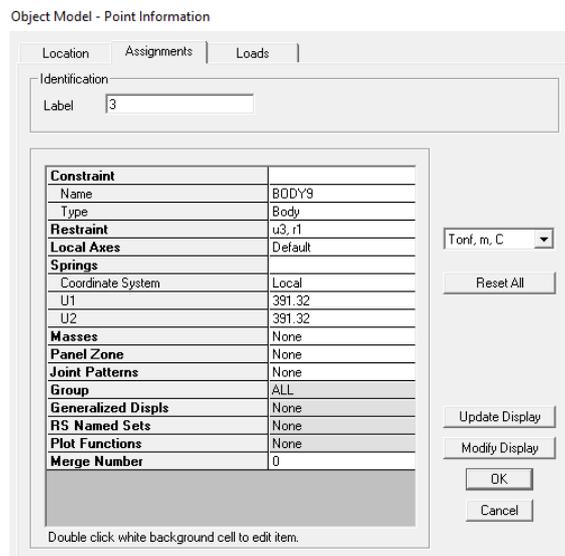
1. Definir los materiales de los elementos estructurales como el concreto y el acero.
2. Definir la geometría de los elementos estructurales
3. Definir los “load patterns” y “load cases”, de acuerdo con las cargas muertas, vivas, viento, sísmicas.
4. Definir las combinaciones de carga establecidas en la CC-14.
5. Dibujar la geometría del puente en el software.
6. Aplicar cargas.
7. Asignar el espectro de diseño.
8. Definir comportamiento del neopreno (con deslizamiento y sin deslizamiento)
9. Realizar el análisis del modelo en el software

3.3.1 Modelación de puente de vigas postensadas con elastómeros reforzados con acero sin considerar el deslizamiento.

Para la modelación del puente bajo la consideración de no deslizamiento del elastómero, se define en el modelo la rigidez del elastómero de acuerdo con las propiedades físico-mecánicas de este para los estribos y los apoyos intermedios, como se muestra en la **Figura 9** y la **Figura 10**, respectivamente.

Figura 9

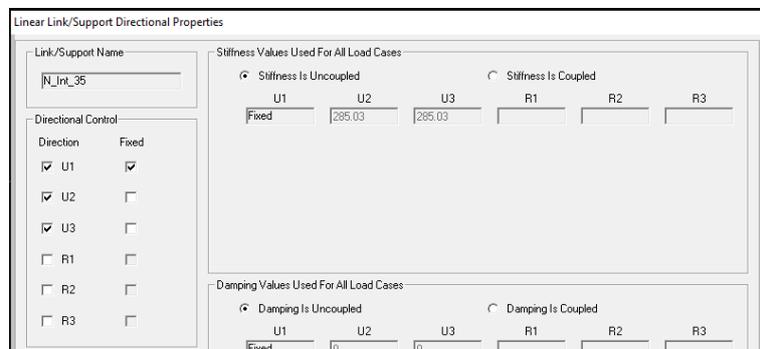
Definición de rigidez de elastómeros para estribos– puente de vigas postensada.



Nota: Muestra la asignación de la rigidez del elastómero para estribos, respectivamente, Elaboración propia (2023).

Figura 10

Definición de rigidez de elastómeros para apoyos intermedios – puente de vigas postensadas

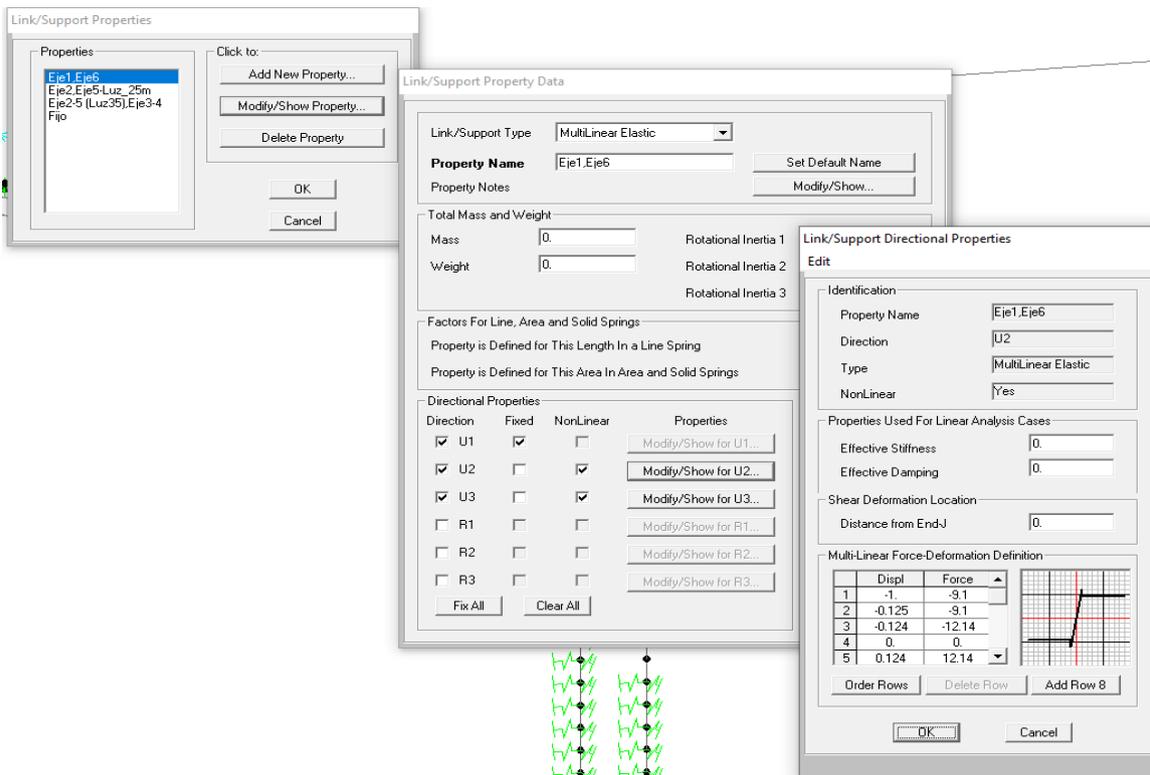


Nota: Muestra la asignación de la rigidez del elastómero para apoyos intermedios, Elaboración propia (2023).

3.3.2 Modelación de puente de vigas postensadas con elastómeros reforzados con acero considerando el deslizamiento.

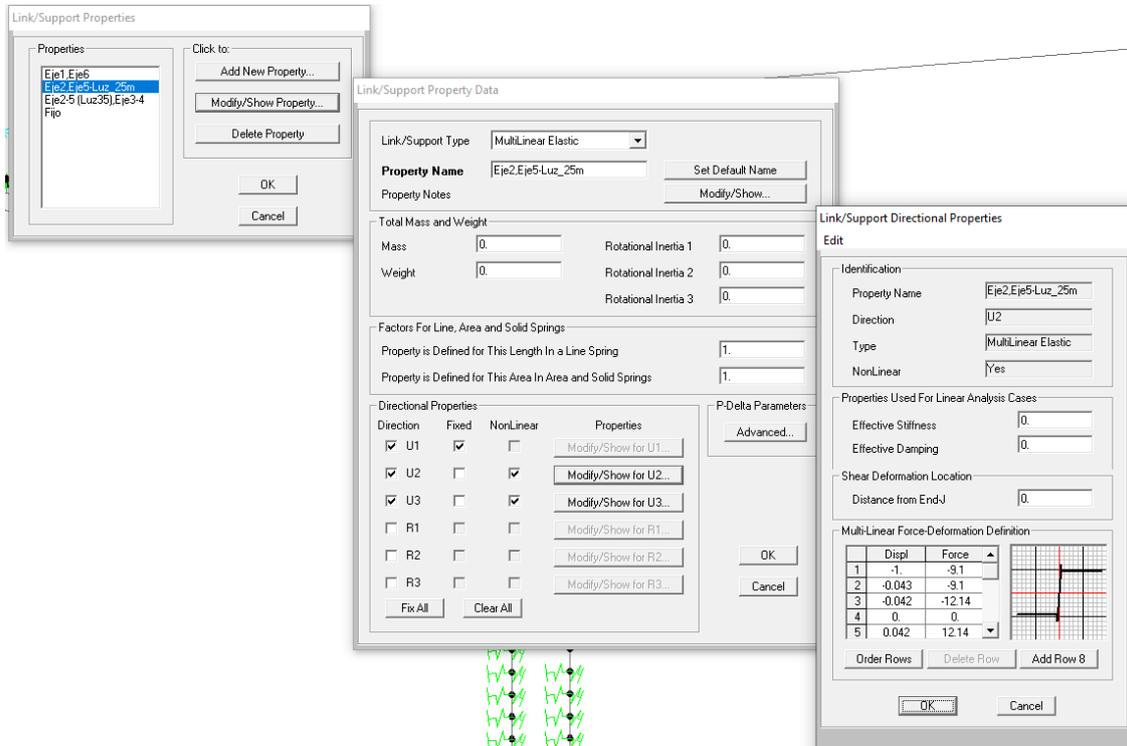
Para la modelación del puente teniendo en cuenta el deslizamiento del elastómero, se define una función condicionada por el comportamiento del elastómero en la fase de adherencia y en la fase de deslizamiento, las cuales están controladas con la rigidez del elastómero y la fuerza de fricción estática y/o cinética, respectivamente. Para esto se definen los coeficientes de fricción estático y cinético, con valores de 0.20 y 0.15, respectivamente. La función característica del comportamiento del elastómero se ingresa en el modelo para los estribos y los apoyos intermedios, como se muestra en la **Figura 11**, **Figura 12** y **Figura 13**; para los estribos, los apoyos intermedios de 25,0 m y 35,0 m, respectivamente.

Figura 11
Definición de rigidez de elastómeros para apoyos estribos, luz de 25 m – puente de vigas postensadas



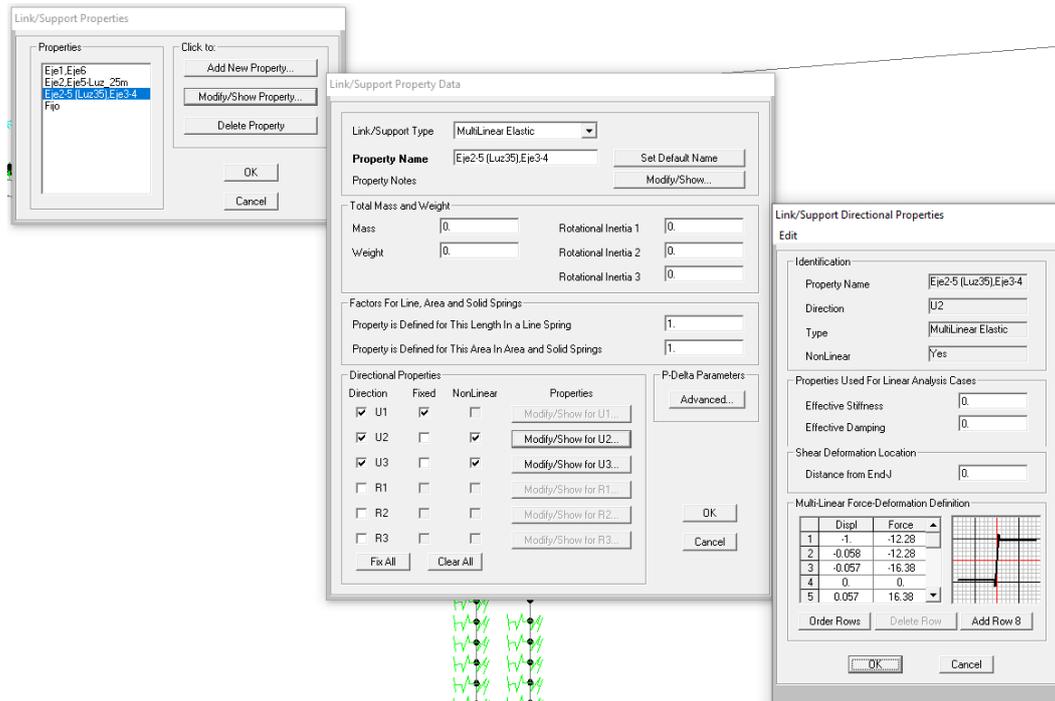
Nota: Muestra la asignación de la función del deslizamiento del elastómero para estribos, Elaboración propia (2023).

Figura 12
*Definición de rigidez de elastómeros para apoyos intermedios, luz de 25 m –
 puente de vigas postensadas*



Nota: Muestra la asignación de la función del deslizamiento del elastómero para apoyos intermedios, luz de 25 m, Elaboración propia (2023).

Figura 13
 Definición de rigidez de elastómeros para apoyos intermedios, luz de 35 m –
 puente de vigas postensadas.



Nota: Muestra la asignación de la función del deslizamiento del elastómero para apoyos intermedios, luz de 35 m, Elaboración propia (2023).

4 Resultados

4.1. Coeficientes de rigidez del elastómero para modelación sin deslizamiento

En la **Tabla 1** se muestran los coeficientes de rigidez para el elastómero tipo 1 y el tipo 2 de la **Figura 8**, para estribos y apoyos intermedios, respectivamente.

Tabla 1
Propiedades físicas correlacionadas

Coeficiente de Rigidez de Elastómeros para el puente de Vigas postensadas (ton/m)	
Estribos del Puente	193.22
Apoyos intermedios del Puente	358.60

Nota: Muestra el coeficiente de rigidez del elastómero tipo 1 y tipo 2, Elaboración propia (2023).

4.1. Función del elastómero para modelación con deslizamiento

Las funciones que representan el comportamiento del elastómero para los estribos y los apoyos intermedios de las vigas de 25,0 m y 35,0 m, se muestran en las siguientes líneas.

4.1.1 Eje 1 y Eje 6, luz de 25 m

Para el eje 1 y el eje 6, donde están posicionadas las vigas postensadas de 25,0 m se tuvo en cuenta la carga del peso propio que llega al elastómero, la rigidez del elastómero mostrado en la **Tabla 1**, los coeficientes de fricción estático y dinámico, como se muestra en la **Tabla 2** y los datos de la función de adherencia-deslizamiento, los cuales se muestran en **Tabla 3** y en la **Figura 14**

Tabla 2
Constante de rigidez del elastómero, carga permanente, fuerza de fricción estática para eje 1 y eje 2, luz de 25 m – puente de vigas postensadas.

EJE 1 (Luz 25 metros), EJE 6 (Luz 25 metros)	
K (Ton/m)_viga	97.83
	Rigidez neopreno

EJE 1 (Luz 25 metros), EJE 6 (Luz 25 metros)		
μ	0.2	Coefficiente de fricción estático
μ	0.15	Coefficiente de fricción dinámico
N (Ton)	60.68	Carga muerta permanente
Ff (Ton)	12.14	Fuerza de fricción máxima

Nota: Muestra el coeficiente de rigidez del elastómero, la cara permanente, los coeficientes de fracción estático y cinético, y la fuerza de fricción estática para tipo el eje 1 y el eje 6. Elaboración propia (2023).

Tabla 3

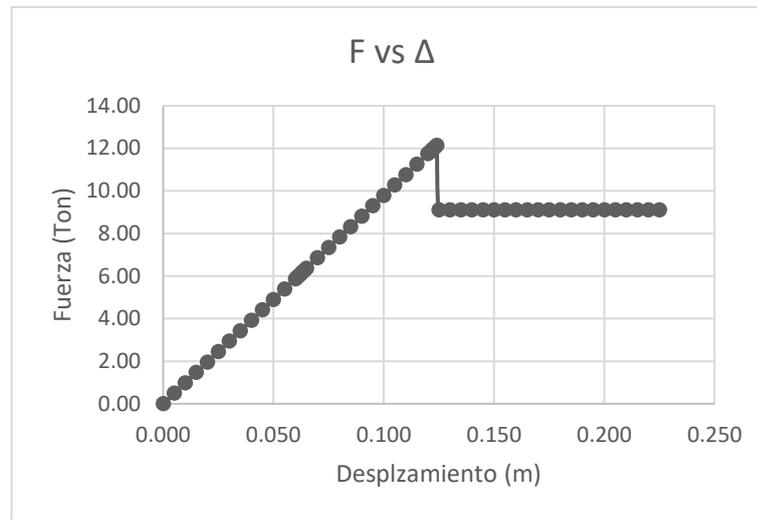
Datos de fuerza y desplazamientos del elastómero reforzado tipo 1 - puente de vigas postensadas.

Desplazamiento (m)	Fuerza (ton)	Desplazamiento (m)	Fuerza (ton)
0.000	0.00	0.090	8.80
0.005	0.49	0.095	9.29
0.010	0.98	0.100	9.78
0.015	1.47	0.105	10.27
0.020	1.96	0.110	10.76
0.025	2.45	0.115	11.25
0.030	2.93	0.120	11.74
0.035	3.42	0.121	11.84
0.040	3.91	0.122	11.94
0.045	4.40	0.123	12.03
0.050	4.89	0.124	12.13
0.055	5.38	0.125	9.10
0.060	5.87	0.130	9.10
0.061	5.97	0.135	9.10
0.062	6.07	0.140	9.10
0.063	6.16	0.145	9.10
0.064	6.26	0.150	9.10
0.065	6.36	0.155	9.10
0.070	6.85	0.160	9.10
0.075	7.34	0.165	9.10
0.080	7.83	0.170	9.10
0.085	8.32	0.175	9.10

Nota: Se muestran los datos de la fuerza y el desplazamiento al que es sometido el elastómero tipo I por las cargas laterales asociadas a al sismo. Elaboración propia (2023).

Figura 14

Función del comportamiento del deslizamiento para el elastómero del eje 1 y el eje 6, luz de 25,0 m- Puente de vigas postensadas.



Nota: La función muestra la variación en el comportamiento del elastómero cuando está en la fase de adherencia y en la fase de deslizamiento, para el eje 1 y el eje 2 para una luz de 25,0 m. Elaboración propia (2023).

4.1.2 Eje 2 y Eje 5, luz de 25 m.

Para el eje 2 y el eje 5, donde están posicionadas las vigas postensadas de 25,0 m se tuvo en cuenta la carga del peso propio que llega al elastómero, la rigidez del elastómero mostrado en la **Tabla 1**, los coeficientes de fricción estático y dinámico, como se muestra en la **Tabla 4**, y los datos de la función de adherencia-deslizamiento, los cuales se muestran en **Tabla 4** y en la **Figura 15**

Tabla 4

Constante de rigidez del elastómero, carga permanente, fuerza de fricción estática para eje 2 y eje 5, luz de 35 m – puente de vigas postensadas.

Eje 2 (Luz 25 metros). Eje 5 (luz 25 metros)		
K(Ton/m)_Viga	285.03	Rigidez neopreno
μ	0.2	Coefficiente de fricción
μ	0.15	Coefficiente de fricción dinámico
N (Ton)	60.68	Carga muerta permanente
Ff (Ton)	12.14	Fuerza de fricción máxima

Nota: Muestra el coeficiente de rigidez del elastómero, la carga permanente, los coeficientes de fracción estático y cinético, y la fuerza de fricción estática para tipo el eje 2 y el eje 5, luz de 35,0 m. Elaboración propia (2023).

Tabla 5

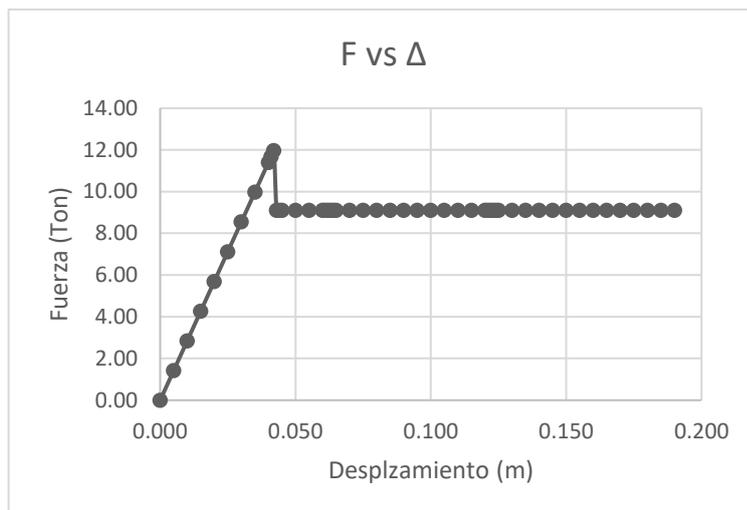
Datos de fuerza y desplazamientos del elastómero reforzado tipo 2 - puente de vigas postensadas.

Desplazamiento (m)	Fuerza (ton)	Desplazamiento (m)	Fuerza (ton)
0.000	0.00	0.090	9.10
0.005	1.43	0.095	9.10
0.010	2.85	0.100	9.10
0.015	4.28	0.105	9.10
0.020	5.70	0.110	9.10
0.025	7.13	0.115	9.10
0.030	8.55	0.120	9.10
0.035	9.98	0.121	9.10
0.040	11.40	0.122	9.10
0.041	11.69	0.123	9.10
0.042	11.97	0.124	9.10
0.043	9.10	0.125	9.10
0.044	9.10	0.130	9.10
0.045	9.10	0.135	9.10
0.050	9.10	0.140	9.10
0.055	9.10	0.145	9.10
0.060	9.10	0.150	9.10
0.061	9.10	0.155	9.10
0.062	9.10	0.160	9.10
0.063	9.10	0.165	9.10
0.064	9.10	0.170	9.10
0.065	9.10	0.175	9.10
0.070	9.10	0.180	9.10
0.075	9.10	0.185	9.10
0.080	9.10	0.190	9.10
0.085	9.10		

Nota: Se muestran los datos de la fuerza y el desplazamiento al que es sometido el elastómero tipo I por las cargas laterales asociadas a al sismo. Elaboración propia (2023).

Figura 15

Función del comportamiento del deslizamiento para ele elastómero del eje 2 y el eje 5, luz de 35,0 m- Puente de vigas postensadas.



Nota: La función muestra la variación en el comportamiento del elastómero cuando está en la fase de adherencia y en la fase de deslizamiento, para el eje 2 y el eje 5 para una luz de 35,0 m. Elaboración propia (2023).

4.1.3 Eje 2, Eje 3, Eje 4 y Eje5, Luz de 35 m

Para el eje 2, eje 3, eje 4 y el eje 5, donde están posicionadas las vigas postensadas de 35,0 m se tuvo en cuenta la carga del peso propio que llega al elastómero, la rigidez del elastómero mostrado en la **Tabla 1**, los coeficientes de fricción estático y dinámico, como se muestra en la **Tabla 6**.

Tabla 6

Constante de rigidez del elastómero, carga permanente, fuerza de fricción estática para eje 2, eje 3, eje 4 y eje 5, luz de 35 m – puente de vigas postensadas.

EJE 2 (Luz 35 metros), EJE 3, EJE 4, EJE 5 (Luz 35 metros)		
K (Ton/m)_viga	285.03	Rigidez neopreno
μ	0.2	Coefficiente de fricción
μ	0.15	Coefficiente de fricción dinámico
N (Ton)	81.89	Carga muerta permanente
Ff (Ton)	16.38	Fuerza de fricción máxima

Nota: Muestra el coeficiente de rigidez del elastómero, la carga permanente, los coeficientes de fracción estático y cinético, y la fuerza de fricción estática para tipo el eje 2, eje 3, eje 4 y el eje 5, luz de 35,0 m. Elaboración propia (2023).

Tabla 7

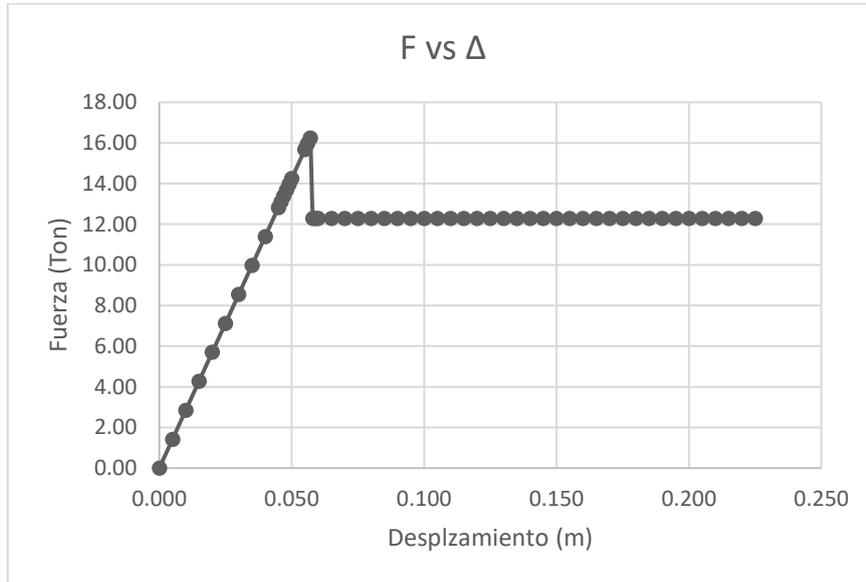
Datos de fuerza y desplazamientos del elastómero reforzado tipo 2 - puente de vigas postensadas.

Desplazamiento (m)	Fuerza (ton)	Desplazamiento (m)	Fuerza (ton)
0.000	0.00	0.059	12.28
0.005	1.43	0.060	12.28
0.010	2.85	0.065	12.28
0.015	4.28	0.070	12.28
0.020	5.70	0.075	12.28
0.025	7.13	0.080	12.28
0.030	8.55	0.085	12.28
0.035	9.98	0.090	12.28
0.040	11.40	0.095	12.28
0.045	12.83	0.100	12.28
0.046	13.11	0.105	12.28
0.047	13.40	0.110	12.28
0.048	13.68	0.115	12.28
0.049	13.97	0.120	12.28
0.050	14.25	0.125	12.28
0.055	15.68	0.130	12.28
0.056	15.96	0.135	12.28
0.057	16.25	0.140	12.28
0.058	12.28		

Nota: La función muestra la variación en el comportamiento del elastómero cuando está en la fase de adherencia y en la fase de deslizamiento, para el eje 2, eje 3, eje 4 y el eje 5 para una luz de 35,0 m. Elaboración propia (2023).

Figura 16

Función del comportamiento del deslizamiento para el elastómero del eje 3, eje 4, eje 4 y el eje 5, luz de 35,0 m- Puente de vigas postensadas.



Nota: La función muestra la variación en el comportamiento del elastómero cuando está en la fase de adherencia y en la fase de deslizamiento, para el eje 2, eje 3, eje 4 y el eje 5 para una luz de 35,0 m. Elaboración propia (2023).

4.2 Comportamiento de elastómeros reforzados sin deslizamiento.

A continuación se muestra el comportamiento dinámico del puente cuando no se tiene en cuenta el deslizamiento de los elastómeros.

4.2.1 Periodo del puente

En la **Tabla 8**, se evidencia los periodos de la estructura para 24 modos de vibración, se tiene que el primer modo de vibración corresponde a la dirección longitudinal del puente y tiene un valor de 2,60 s aproximadamente.

Tabla 8

Periodo de la estructura cuando no se tiene en cuenta el deslizamiento del elastómero–puente de vigas postensadas.

Modal Periods and Frequencies			
OutputCase Text	Step Type Text	StepNum Unitless	Period Sec
MODAL	Mode	1	2.60
MODAL	Mode	2	1.51
MODAL	Mode	3	1.33
MODAL	Mode	4	1.09
MODAL	Mode	5	0.96
MODAL	Mode	6	0.72
MODAL	Mode	7	0.72
MODAL	Mode	8	0.70
MODAL	Mode	9	0.69
MODAL	Mode	10	0.67
MODAL	Mode	11	0.63
MODAL	Mode	12	0.63
MODAL	Mode	13	0.58
MODAL	Mode	14	0.58
MODAL	Mode	15	0.52
MODAL	Mode	16	0.51
MODAL	Mode	17	0.46
MODAL	Mode	18	0.23
MODAL	Mode	19	0.17
MODAL	Mode	20	0.17
MODAL	Mode	21	0.16
MODAL	Mode	22	0.12
MODAL	Mode	23	0.08

Modal Periods and Frequencies			
OutputCase Text	Step Type Text	StepNum Unitless	Period Sec
MODAL	Mode	24	0.06

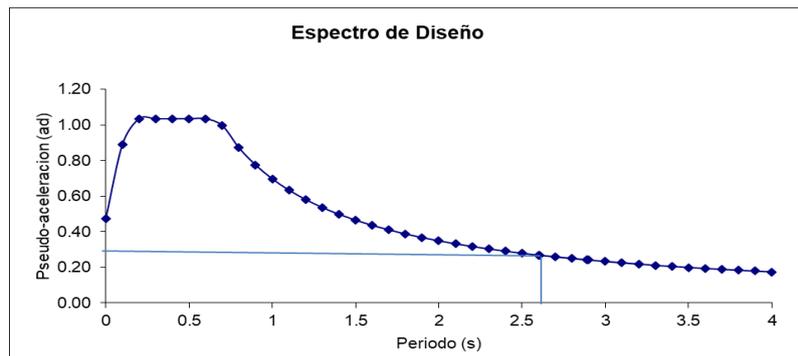
Nota: Se muestran los periodos de 24 modos de vibración de la estructura cuando no se considera en la modelación el deslizamiento del elastómero. Tomado de SAP 2000 (SAP2000, 2023).

4.2.2 Pseudo-aceleración de la estructura.

La pseudo-aceleración de la estructura para el primer modo de vibración se obtiene del espectro de diseño, donde se encontró que para un periodo de 2,6 s la estructura está afectada por una pseudo-aceleración de la gravedad de 0.27 como se muestra en la **Figura 17**

Figura 17

Obtención de la Pseudo-aceleración de la estructura cuando se tiene en cuenta el deslizamiento del elastómero– puente de vigas postensadas.



Nota: Se muestra la pseudo-aceleración a la que es sometido el puente cuando los elastómeros son modelados sin considerar el deslizamiento de estos. Elaboración propia (2023).

4.2.3 Cortante Basal

La Cortante Basal del puente teniendo en cuenta los 24 modos de Vibración de la estructura, es de 828,48 ton en la dirección longitudinal del puente como se puede ver en la **Tabla 9**

Tabla 9

Cortante basal de la estructura cuando se tiene en cuenta el deslizamiento del elastómero– puente de vigas postensadas.

Base Reactions				
OuputCase	CaseType	StepType	GlobalFX	GlobalFY
Text	Text	Text	Tonf	Tonf
Sx	LinRespSpec	Max	851.8162	1.2871
Sy	LinRespSpec	Max	1.9551	1445.4344

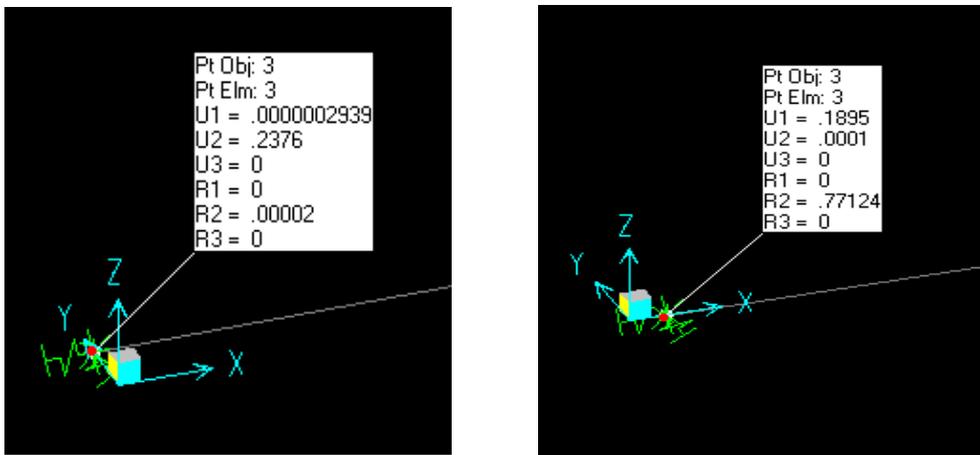
Nota: Se muestra la cortante basal a la que es sometido el puente cuando los elastómeros son modelados sin considerar el deslizamiento de estos. Elaboración propia (2023).

4.2.4 Desplazamiento espectral en el eje 1 del puente.

Para el eje 1 del puente, donde se apoyan las vigas postensadas de 25,0 m se encontró un desplazamiento espectral de 19,0 cm en la dirección longitudinal del puente y en la dirección transversal de 24,0 cm, aproximadamente como se muestra en **Figura 18**.

Figura 18

Desplazamiento espectral en la dirección longitudinal y transversal del eje 1 del puente.



Nota: Se muestra el desplazamiento en el eje 1 en la dirección longitudinal del puente y en la dirección transversal del mismo. Tomados de SAP200 (2023).

4.3 Comportamiento de elastómeros reforzados con deslizamiento.

A continuación se muestra el comportamiento dinámico del puente cuando se tiene en cuenta el deslizamiento de los elastómeros.

4.3.1 Periodo del puente.

En la *Tabla 10*, se evidencia los periodos de la estructura para 24 modos de vibración, se tiene que el primer modo de vibración corresponde a la dirección longitudinal del puente y tiene un valor de 2,9 s aproximadamente.

Tabla 10

Periodo de la estructura cuando se tiene en cuenta el deslizamiento del elastómero–puente de vigas postensadas

Modal Periods and Frequencies			
OutputCase Text	Step Type Text	StepNum Unitless	Period Sec
MODAL	Mode	1	2.89
MODAL	Mode	2	1.51
MODAL	Mode	3	1.33
MODAL	Mode	4	0.96
MODAL	Mode	5	0.72
MODAL	Mode	6	0.72
MODAL	Mode	7	0.71
MODAL	Mode	8	0.69
MODAL	Mode	9	0.67
MODAL	Mode	10	0.63
MODAL	Mode	11	0.62
MODAL	Mode	12	0.60
MODAL	Mode	13	0.58
MODAL	Mode	14	0.52
MODAL	Mode	15	0.50
MODAL	Mode	16	0.47
MODAL	Mode	17	0.45
MODAL	Mode	18	0.42
MODAL	Mode	19	0.23
MODAL	Mode	20	0.17
MODAL	Mode	21	0.17
MODAL	Mode	22	0.12
MODAL	Mode	23	0.12

Modal Periods and Frequencies			
OutputCase Text	Step Type Text	StepNum Unitless	Period Sec
MODAL	Mode	24	0.06

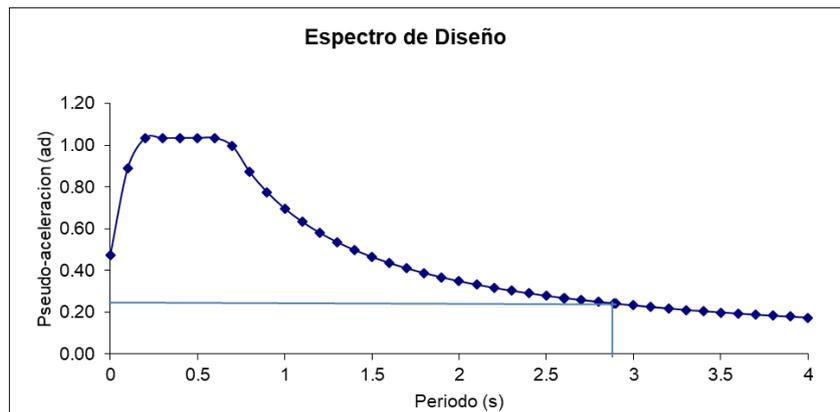
Nota: Se muestran los periodos de 24 modos de vibración de la estructura cuando se considera en la modelación el deslizamiento del elastómero. Tomado de SAP 2000 (SAP2000, 2023).

4.3.2 Pseudo-aceleración de la estructura.

La pseudo-aceleración de la estructura para el primer modo de vibración se obtiene del espectro de diseño, donde se encontró que para un periodo de 2,9 s la estructura está afectada por una pseudo-aceleración de la gravedad de 0.27 como se muestra en la **Figura 19**

Figura 19

Obtención de la Pseudo-aceleración de la estructura cuando se tiene en cuenta el deslizamiento del elastómero– puente de vigas postensadas.



Nota: Se muestra la pseudo-aceleración a la que es sometido el puente cuando los elastómeros son modelados considerando el deslizamiento de estos. Elaboración propia (2023).

4.3.3 Cortante Basal

La Cortante Basal del puente teniendo en cuenta los 24 modos de Vibración de la estructura, es de 828,48 ton en la dirección longitudinal del puente como se puede ver en la **Tabla 11**

Tabla 11

Cortante basal de la estructura cuando se tiene en cuenta el deslizamiento del elastómero–puente de vigas postensadas.

Base Reactions				
OuputCase	CaseType	StepType	GlobalFX	GlobalFY
Text	Text	Text	Tonf	Tonf
Sx	LinRespSpec	Max	828.4884	7.8396
Sy	LinRespSpec	Max	8.422	1446.9557

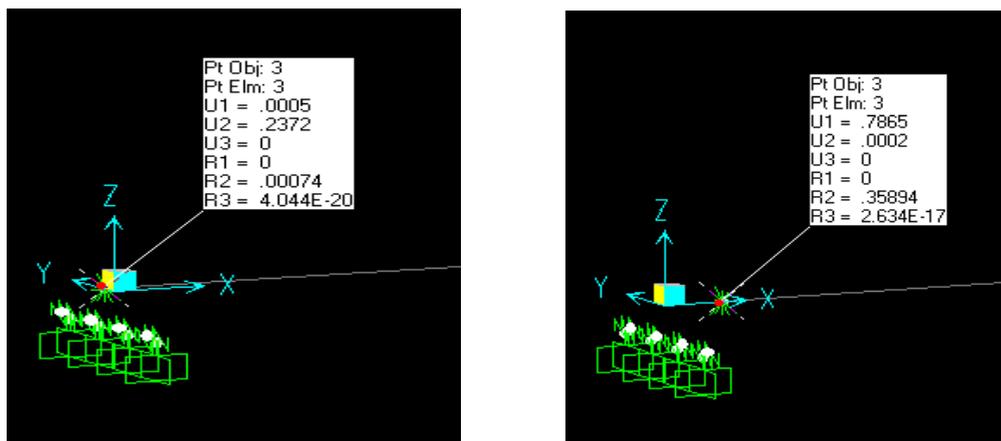
Nota: Se muestra el cortante basal al que es sometido es sometido el puente cuando los elastómeros son modelados considerando el deslizamiento de estos. Elaboración propia (2023).

4.3.4 Desplazamiento espectral en el eje 1 del puente.

Para el eje 1 del puente, donde se apoyan las vigas postensadas de 25,0 m se encontró un desplazamiento espectral de 79,0 cm en la dirección longitudinal del puente y en la dirección transversal de 24,0 cm, aproximadamente como se muestra en **Figura 18**.

Figura 20

Desplazamiento espectral en la dirección longitudinal y transversal del eje 1 del puente.



Nota: Se muestra el desplazamiento en el eje 1 en la dirección longitudinal del puente y en la dirección transversal del mismo. Tomados de SAP200 (2023).

5 Análisis.

En la **Tabla 12** se muestra el resumen de los resultados en las dos modelaciones que se hicieron, teniendo en cuenta la diferencia en el comportamiento del elastómero reforzado cuando no se considera el deslizamiento del elastómero y cuando se considera el deslizamiento, se puede ver haciendo un análisis comparativo entre los dos resultados, que cuando se considera el deslizamiento del elastómero el periodo de la estructura aumenta en un 11% aproximadamente en la dirección longitudinal del puente, la variación en el periodo influye en la flexibilidad del puente y en el porcentaje de pseudo-aceleración de la gravedad con la que vibra la estructura ante un evento sísmico, en este caso para el primer modo de vibración la pseudo-aceleración disminuyó en el 10%.

En cuanto a la cortante basal de toda la estructura disminuyó en un 2,7% de acuerdo a la modelación por la combinación Modal del CQC, la cual tiene en consideración todos los modos de vibración de la estructura y el porcentaje de participación de la masa que es excitado en cada modo de vibración, en base a esto la relación entre el cortante basal general de la estructura no se relaciona directamente con la pseudo-aceleración del primer Modo de vibración. Sin embargo, se obtuvo el cortante basal para el primer modo de vibración de cada uno de los modelos y se obtuvo una reducción del 9,8%, consecuente con la variación de la pseudo-aceleración para el primero modo de vibración correspondiente a la dirección longitudinal del puente. Esta variación en la cortante basal a la que es sometido el puente, es consecuencia de la disipación sísmica que induce el deslizamiento del elastómero, este comportamiento disminuye la fuerza lateral del sismo transmitida a las vigas cabezales y a los pilotes.

Para el desplazamiento espectral en el eje 1 del puente, se obtuvo un aumento de 19,0 cm a 78,0 cm, se aumentó el desplazamiento aproximadamente 3 veces con respecto a la modelación donde no se considera el deslizamiento, la literatura especifica que el deslizamiento de los elastómeros induce mayores desplazamiento y esto puede llevar a que la superestructura quede desplazada con respecto a la subestructura y que el elastómero pierda su capacidad a transmitir las cargas verticales, es por esto que recomienda que los asientos donde se apoyan las vigas tengan mayores dimensiones. Sin embargo, esta condición no ha sido ampliamente estudiada.

Tabla 12*Resumen de resultados.*

Análisis Comparativo de Modelación sin deslizamiento y con deslizamiento del elastómero reforzado con acero.			
Parámetro a analizar	Elastómero Sin Deslizamiento	Elastómero con Deslizamiento	Porcentaje de variación
Periodo del puente (s)	2.60 s	2,90 s	11 %
Pseudo-aceleración	0.27	0.24	10%
Modo 1			
Cortante basal General (ton) -CQC	851.8	828.5	2.7%
Cortante basal General software (ton) -ABS	1550.9159	1475.3488	-
Cortante basal General calculado (ton) -ABS	1468.94	1382.61	-
Cortante basal General software (ton) - SRSS	844.8696	816.6512	3.3%
Cortante basal General calculado (ton) -SRSS	790.3286	778.78375	1.5%
Cortante Basal Modo 1(ton)	758.5	683.8	9.8%
Desplazamiento	19,0	78,0	310%

Nota: Se muestra una comparación entre los resultados encontrados para la modelación de puente de vigas postensadas cuando se tiene se considera el deslizamiento del elastómero. Tomados de SAP200 (2023).

6 Conclusión

De acuerdo con la literatura los elastómeros reforzados con acero cuando no son anclados, experimentan con la superficie de contacto un deslizamiento controlado por la variación entre la fuerza de fricción estática y la fuerza de fricción cinética. Cuando la fuerza sísmica lateral supera la fuerza de fricción se genera un ciclo de desplazamiento de manera histérica en el elastómero durante la vibración del sismo, que contribuye a la disipación de energía y las fuerzas inerciales transmitidas a la subestructura disminuyen y los desplazamientos en los elastómeros son mayores.

Se encontró en la Modelación del puente de vigas postensadas de 5 luces, para una zona de amenaza sísmica alta, que el deslizamiento del elastómero induce un aumento en la flexibilidad del puente evidenciado en la variación del periodo de la estructura. Adicionalmente, las fuerzas inerciales transmitidas a la subestructura claramente disminuyeron como lo muestra la cortante basal. Por último, los desplazamientos se aumentaron, lo cual concuerda con lo planteado en la literatura.

7 Referencias

- Castaño, C. (2022). *Evaluación sísmica de apoyos elastoméricos en puentes considerando condiciones de sitio*. [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia.
- CCP-14, *Norma Colombiana de Diseño de Puentes*, (2014).
- Dominguez, C., y Rodriguez, A. (2018). *Cavitación dinámica en sólidos hiperelásticos : un análisis numérico* .[Tesis de Pregrado]. Universidad Carlos III de Madrid.
- English, B. A., Klingner, R. E., y Yura, J. A. (1994). *Elastomeric bearings : Background information and field study*. Center for Transportation Research The University of Texas at Austin.
- Filipov, E. T., Hajjar, J. F., Steelman, J. S., Fahnestock, J. M., y Foutch, D. A. (2011). Computational Analyses of Quasi-Isolated Bridges with Fusing Bearing Components. *Structures Congress 2011*. [https://doi:10.1061/41171\(401\)25](https://doi:10.1061/41171(401)25)
- Hu, T., & Li, J. Z. (2012). Displacement Control Method for Continuous Bridges on Laminated Rubber Bearing Under Earthquake Excitacion. *China Journal of Highway and Transport*, 26(3): 110-116.
- INVIAS, *Norma colombiana de diseño de puentes – LRFD – CCP 14*. 2014.
- ISO 15113, *International Organization for Standardization -ISO 15113* (2015).
- Kligerman, Y., & Varenberg, M. (2014). Elimination of stick-slip motion in sliding of split or rough surface. *Tribology Letters*, 53(2), 395–399. <https://doi.org/10.1007/s11249-013-0278-8>
- Li, Y., & Wu, Q. (2017). Experimental Study on Friction Sliding Performance of Rubber Bearings in Bridges. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/5845149>

Liu, K. Y., Chang, K. C., Lu, C. H., y Cheng, W. C. (2008). Seismic performance of skew bridge with friction type rubber bearings. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*.

Soldano, E. (2018). *Estudio del comportamiento de la sección cajón del tablero de un puente en curva*. [Tesis de Pregrado]. Universidad Nacional de Córdoba.

Steelman, J. S., Fahnestock, L. A., Filipov, E. T., LaFave, J. M., Hajjar, J. F., & Foutch, D. A. (2013). Shear and Friction Response of Nonseismic Laminated Elastomeric Bridge Bearings Subject to Seismic Demands. *Journal of Bridge Engineering*, 18(7), 612–623. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0000406](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000406)

Xiang, N., Goto, Y., Alam, M. S., & Li, J. (2021). Effect of bonding or unbonding on seismic behavior of bridge elastomeric bearings: lessons learned from past earthquakes in China and Japan and inspirations for future design. *Advances in Bridge Engineering*, 2(1). <https://doi.org/10.1186/s43251-021-00036-9>