

Efecto de la componente vertical sísmica en el comportamiento estructural de un puente de concreto reforzado de dos vanos y pila intermedia tipo pórtico.

Lino Andrés Quiroga Rueda e Ismael Fernando Porras Dávila

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director:

Gustavo Chio Cho

PhD. en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.

Codirector:

José Miguel Benjumea Royero

PhD. en Ingeniería Civil y Ambiental

Universidad Industrial de Santander

Facultad de físico mecánicas

Escuela de Ingeniería civil

Bucaramanga

2023

**Dedicatoria**

*A mis padres, Lino Quiroga Quiroga & Milena Rueda Martínez, por siempre brindarme su apoyo incondicional que me han dado en el transcurso de mi vida, por siempre creer en mí y por el amor que siempre me han dado. Gracias a ellos soy lo que hoy en día soy, mis triunfos y todas mis metas siempre serán de ellos y por ellos.*

*A mis hermanos Karem Hazdeiby Quiroga Rueda y Alejandro Sanabria Rueda por su amor incondicional, ellos son la razón de siempre seguir adelante.*

*También quiero agradecer a toda mi familia, amigos y docentes que de una u otra forma han aportado en mi formación como persona.*

***Lino Andrés Quiroga Rueda.***

*A Dios, mis padres, Ismael Porras y Magdalena Dávila, y a mis hermanos, quienes han sido la guía y el camino para poder llegar a este punto de mi carrera.*

***Ismael Fernando Porras Dávila.***

### **Agradecimientos**

Queremos agradecer a el Servicio Geológico Colombiano por brindarnos los datos necesarios para la realización de nuestro proyecto de grado.

También queremos agradecer al servicio de soporte de Midas Civil por la ayuda y el servicio brindado.

Un agradecimiento especial a nuestro director de proyecto de grado Gustavo Chio Cho y a nuestro codirector José Miguel Benjumea Romero por la dedicación y guía que nos brindaron en el transcurso de desarrollo de este proyecto de investigación.

**Lino & Ismael.**

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción.....	12
1. Objetivos.....	16
1.1 Objetivo general.....	16
1.1 Objetivo específicos.....	16
2. Alcances - resultados esperados.....	17
3. Características del registro sísmico.....	18
3.1 Características del registro sísmico.....	18
4. Metodología.....	19
4.1 Proceso constructivo.....	19
4.2 Geometría del puente en estudio.....	20
4.3 Propiedades de los materiales.....	22
4.4 Selección de los registros y cálculo del factor de escalamiento.....	23
4.5 Análisis y evaluación de cargas.....	25
4.5.1 Cargas gravitacionales.....	25
4.5.2 Cargas sísmicas.....	25
4.6 Descripción del modelo Midas civil.....	26
4.7 Comportamiento de los apoyos elastoméricos.....	26
4.8 Índice de impacto del movimiento vertical.....	27
5. Resultados y Análisis.....	29
5.1 Selección de los registros y cálculo del factor de escalamiento.....	29
5.2 Variación de las fuerzas internas debido a la componente vertical del sismo.....	33
5.2.1 Viga externa.....	33
5.2.2 Viga interna.....	35
5.2.3 Viga cabezal.....	37
5.2.4 Pilar.....	39
5.3 Variación en los desplazamientos debido a la componente vertical del sismo.....	40
5.3.1 Viga externa y viga interna.....	40
5.3.2 Viga cabezal.....	41
5.3.2 Pilar de la pila.....	42

5.4 Reacciones de los apoyos de neopreno.....	43
5.4.1 Apoyo de Neopreno en la viga externa .....	43
5.4.2 Apoyo de Neopreno en la viga interna. ....	44
6. Conclusiones .....	45
Referencias bibliográficas .....	46

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Propiedades mecánicas de los materiales .....	23
Tabla 2. Cargas gravitacionales .....	25
Tabla 3. Resultados del factor de escalamiento de los registros seleccionados.....	30
Tabla 4. Variación de la fuerza axiales en la viga externa debido a la componente vertical del sismo .....	34
Tabla 5. Variación de la fuerza cortante $V_z$ en la viga externa debido a la componente vertical del sismo .....	34
Tabla 6. Variación del momento flector $M_y$ en la viga externa debido a la componente vertical del sismo .....	35
Tabla 7. Variación de la fuerza axial en la viga interna debido a la componente vertical del sismo .....	36
Tabla 8. Variación de la fuerza cortante $V_z$ en la viga interna debido a la componente vertical del sismo .....	36
Tabla 9. Variación del momento flector $M_y$ en la viga interna debido a la componente vertical del sismo .....	37
Tabla 10. Variación de la fuerza cortante $V_z$ en la viga cabezal debido a la componente vertical del sismo .....	38
Tabla 11. Variación del momento flector $M_y$ en la viga cabezal debido a la componente vertical del sismo .....	38

Tabla 12. Variación de la fuerza axial en el pilar izquierdo de la pila intermedia, debido a la componente vertical del sismo.....	39
Tabla 13. Variación del desplazamiento en la dirección del eje Z en la viga externa al incluir la componente vertical sismo.....	40
Tabla 14. Variación del desplazamiento en la dirección del eje Z en la viga interna al incluir la componente vertical del sismo.....	41
Tabla 15. Variación del desplazamiento en la dirección del eje Z en la viga cabezal al incluir la componente vertical del sismo.....	42
Tabla 16. Variación del desplazamiento en la dirección del eje Z en el pilar de la pila al incluir la componente vertical del sismo.....	43

### Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Puente de dos vanos y pila intermedia tipo pórtico .....	13
Figura 2. Daño en elemento estructural de concreto reforzado causado por el sismo de Santa venerina 2002.....	14
Figura 3. Falla por compresión y abombamiento en pilares del puente de canal Bull creek canyon .....	15
Figura 4. Fallo por compresión de los pilares en cuclillas del Second shinmey overbridge .....	15
Figura 5. Epicentros de los sismos usados en el análisis .....	18
Figura 6. Sección transversal del puente.....	21
Figura 7. Sección longitudinal del puente.....	21
Figura 8. Sección viga I.....	22
Figura 9. Modelo Midas civil puente viga-losa .....	26
Figura 10. Neopreno para apoyo de vigas .....	27
Figura 11. Espectro de diseño para Bucaramanga con suelo tipo C.....	29
Figura 12. Espectro de diseño vs la SRSS escalada de las componentes horizontales de los tres registros.....	31
Figura 13. Espectro de diseño vs la componente vertical escalada de los tres registros .....	31
Figura 14. Traza de aceleración de las tres componentes para R-1 (Córdoba) multiplicadas por el factor de escalamiento (0.34).....	32
Figura 15. Traza de aceleración de las tres componentes para R-2 (Calima) multiplicadas por el factor de escalamiento (2.21).....	32

Figura 16. Traza de aceleración de las tres componentes para R-3 (Mesetas) multiplicadas por el factor de escalamiento (1.29).....	33
Figura 17. Variación porcentual de la fuerza axial en el apoyo de neopreno de la viga externa.	44
Figura 18. Variación porcentual de la fuerza axial en el apoyo de neopreno en la viga interna .	44

## Resumen

**Título:** Efecto de la componente vertical sísmica en el comportamiento estructural de un puente de concreto reforzado de dos vanos y pila intermedia tipo pórtico.\*

**Autores:** Lino Andrés Quiroga Rueda e Ismael Fernando Porras Dávila\*\*

**Palabras Clave:** Componente vertical, Puente, Dos vanos, Losa continua, Estribos, Pilares, Registros sísmicos, MIDAS Civil.

### Descripción:

La presente investigación tiene como objetivo en determinar el efecto producido por la componente vertical sísmica en respuesta estructural de un puente de concreto reforzado de dos vanos con tablero de vigas y losa continua, simplemente apoyado en estribos y sobre un pilar intermedio debido a una familia de acelerogramas seleccionados de la base de datos del servicio geológico colombiano. Se escogieron tres registros sísmicos ubicados en varios sectores de Colombia que cumplen con magnitudes de momento mayores a 4.0, registrados a menos de 50 km de la distancia epicentral y con picos de aceleración horizontales (PGA<sub>H</sub>) mayores a 0.02g. Se desarrollaron modelos mediante el programa MIDAS Civil, donde se compara la respuesta estructural debido a los tres registros tomados con y sin la componente vertical. Los resultados obtenidos ilustran la importancia del efecto de la componente vertical del sismo en los desplazamientos y las fuerzas internas de la superestructura, con incrementos desde el 5% hasta el 19,13%.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de físico mecánicas. Escuela de Ingeniería civil Director: Gustavo Chio Cho PhD. en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Codirector: José Miguel Benjumea Royero PhD. en Ingeniería Civil y Ambiental

**Abstract**

**Title:** Effect of the vertical seismic component in the structural behavior of a reinforced concrete bridge of two spans and intermediate pile type gantry.\*

**Authors:** Lino Andrés Quiroga Rueda e Ismael Fernando Porras Dávila\*\*

**Keywords:** Vertical component, Bridge, Two spans, Continuous slab, Abutments, Pillar, Seismic records, Civil MIDAS.

**Description:**

The present investigation aims to determine the effect produced by the vertical seismic component on the structural response of a two-span reinforced concrete bridge with girder deck and continuous slab, simply supported on abutments and on an intermediate abutment due to a family of accelerograms selected from the Colombian Geological Survey database. Three seismic records located in various sectors of Colombia were chosen that comply with moment magnitudes greater than 4.0, recorded within 50 km of the epicentral distance and with peak horizontal acceleration (PGAH) greater than 0.02g. Models were developed using the MIDAS Civil program, comparing the structural response due to the three records taken with and without the vertical component. The results obtained illustrate the importance of the effect of the vertical component of the earthquake on the displacements and internal forces of the superstructure, with increases from 5% to 19.13%.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de físico mecánicas. Escuela de Ingeniería civil Director: Gustavo Chio Cho PhD. en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Codirector: José Miguel Benjumea Royero PhD. en Ingeniería Civil y Ambiental

## Introducción

Los puentes viga-losa de concreto reforzado o presforzado son unas de las opciones más frecuentes a utilizar para las construcciones de infraestructura en Colombia. Para el 2001 el 91% de los puentes de concreto presentaban una sección transversal viga-losa, siendo está la tipología más utilizada a nivel nacional (Rodríguez & Urrea, 2020).

A través de la historia de la construcción, los componentes sísmicos horizontales han generado daño esencial en las estructuras, motivo por el cual estas componentes han sido ampliamente estudiadas y analizadas. Por consiguiente, la componente sísmica vertical ha sido investigada en una menor escala. Esto es debido a que primordialmente la mayoría de los registros sísmicos demuestran que la aceleración vertical pico efectiva es significativamente menor que la aceleración horizontal pico efectiva, también cabe destacar que las construcciones existen factores de mayoración para las cargas estáticas verticales que brindan un factor de seguridad contra los movimientos verticales del suelo producidos por los sismos (Fernández & Ardila, 2020).

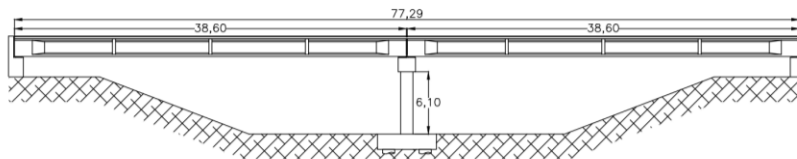
Una gran cantidad de ingenieros civiles asumen que los movimientos verticales que ejerce el suelo no son de gran importancia ya que suponen que la aceleración vertical máxima es una fracción de la aceleración horizontal pico, cuando se incluye la componente vertical está es igual a dos tercios del espectro horizontal, además algunos estudios han demostrado que la relación V/H “componente vertical respecto a la componente horizontal” en regiones cercanas a la falla y en periodos cortos puede causar daños y variaciones importantes en la respuesta estructural de edificaciones (Papazoglou & Elnashai, 1996), (Yang, Yin, Hao, & Bi, 2015) y puentes (Button, Cronin, & Mayes, 2002), (Dehghanpoor, Thambiratnam, Taciroglu, & Chan, 2019), (Falsone,

Recupero, & Spinella, 2020), (Kim, Holub, & Elnashai, 2011), (Li, Dou, & Zhu, 2007), (Lin & Song, 2015); por consiguiente, resulta importante analizar las principales características de esta componente para poder establecer relaciones entre estas y su efecto en la estructura.

[1] Este proyecto de investigación determina el efecto que genera la componente vertical sísmica en la respuesta de un puente de concreto reforzado de dos vanos con tablero de vigas y losa continua, simplemente apoyado en estribos y sobre una pila intermedia (ver Figura 1) debido a tres registros sísmico de aceleraciones. Los acelerogramas fueron seleccionados de la base de datos del servicio geológico colombiano (SGC) (Servicio Geológico colombiano, 2022); y analizados por el código de MATLAB (MathWorks, Matlab, 2022) elaborado por Fernández et al (Fernández & Ardila, 2020). El análisis estructural del puente debido a cada registro sísmico seleccionado se realizó en el software MIDAS civil<sup>1</sup> siguiendo la norma colombiana de diseños de puentes CCP14 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2014).

### Figura 1.

*Puente de dos vanos y pila intermedia tipo pórtico*



<sup>1</sup> Midas civil es un software de elementos finitos desarrollado por MIDAS IT, usado para el análisis y diseño de puentes y obras de infraestructura. El software es licenciado por la universidad industrial de Santander

### **Evidencia de daño en campo por el efecto de la componente vertical**

Las aceleraciones sísmicas verticales son las principales causantes de daños en estructuras de concreto reforzado y existen suficientes evidencias que lo demuestran (ver las Figuras 2, 3 y 4), los daños que se atribuyen a las aceleraciones verticales muestran las siguientes características (Falsone, Recupero, & Spinella, 2020) , (Papazoglou & Elnashai, 1996), (Jara, Hernández, & Álvarez, 2022):

- Estribos transversales abiertos.
- Deformación axial permanente en el elemento estructural dañado.
- Pandeo en las varillas longitudinales de forma simétrica.
- Desprendimiento total del recubrimiento de concreto.
- Núcleo de concreto desintegrado.
- Falla por cortante debida a la interacción axial-cortante.

En las siguientes fotografías se ilustra algunos ejemplos con los fallos ya descritos.

#### **Figura 2.**

*Daño en elemento estructural de concreto reforzado causado por el sismo de Santa venerina 2002*



*Nota.* Tomado de: Falsone, Recupero & Spinella, N. (2020).

**Figura 3.**

*Falla por compresión y abombamiento en pilares del puente de canal Bull creek canyon*



*Nota.* Tomado de: Papazoglou & Elnashai (1996).

**Figura 4.**

*Fallo por compresión de los pilares en cuclillas del Second shinmey overbridge*



*Nota.* Tomado de: Papazoglou & Elnashai (1996).

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo general

Determinar el efecto que genera la componente vertical sísmica en la respuesta de un puente de concreto reforzado de dos vanos, con tablero de viga y losa continua, simplemente apoyado en estribos y un pilar intermedio tipo pórtico debido a una familia de acelerogramas de la base de datos del servicio geológico colombiano.

### 1.1 Objetivo específicos

1. Seleccionar 3 registros sísmicos que generen una amenaza compatible con la amenaza sísmica de diseño.
2. Determinar la respuesta del puente con o sin la componente vertical mediante un análisis dinámico lineal cronológico, utilizando un modelo tridimensional en un software de análisis estructural.
3. Comparar la respuesta máxima de los parámetros más importantes en el análisis estructural del puente (reacciones, desplazamientos y fuerzas internas) de los elementos principales que componen el puente (vigas, pilares y apoyos) debido a la aplicación o no aplicación de la componente vertical del sismo.

## 2. Alcances - resultados esperados

La estructura para analizar es un puente ubicado en el país de Colombia donde el puente es de concreto reforzado de dos vanos con tablero de viga y losa continua, simplemente apoyado en los extremos por estribos y un pilar intermedio tipo pórtico en la mitad de la luz del puente. Los estribos son tipo estribo cerrado de muro frontal de concreto reforzado sobre cimentación superficial y el pilar intermedio es tipo pórtico compuesto de concreto reforzado unidos por una viga cabezal de concreto reforzado. El tablero estará conformado por vigas de concreto reforzado o presforzado y losa de concreto reforzado simplemente apoyado sobre apoyos de neopreno. Se construirá un modelo tridimensional del puente en un software de análisis estructural MIDAS civil, se realizará un análisis dinámico modal cronológico, tridimensional lineal elástico, sometido a las cargas gravitacionales y componentes sísmicas (Componente longitudinal, componente transversal y la componente vertical de una familia de acelerogramas obtenidos de la base de datos de servicios geológicos colombiano según el Código de diseño sísmico de puentes de Colombia vigente en la actualidad. Los registros de la familia de acelerogramas se hará en base al estudio realizado en el proyecto de grado para optar al título de ingeniero civil realizado (Fernández & Ardila, 2020).

Se espera obtener los siguientes resultados:

1. Una tabla de comparación de los desplazamientos, reacciones y fuerzas internas en los elementos de la estructura con y sin la componente vertical del sismo. Diferencia porcentual respecto a la variación en los resultados de análisis dinámico al considerar el efecto de la componente vertical del sismo.

2. Grafica de variación de los desplazamientos y fuerzas en función del parámetro V/H que caracteriza al sismo.

3. Análisis de los resultados obtenidos exponiendo una discusión de los resultados, conclusiones y recomendaciones.

### 3. Características del registro sísmico

#### Figura 5.

*Epicentros de los sismos usados en el análisis*



#### 3.1 Características del registro sísmico

La selección del registro sísmico utilizado en el estudio se realizó en base a los parámetros más comúnmente utilizados (Fernández & Ardila, 2020), tales como:

- **Magnitud del sismo:** Se usan para describir la fuerza general de un terremoto, para este estudio se utilizó la magnitud de momento ( $M_w$ ).
- **Distancia epicentral:** Distancia existente entre el epicentro del sismo hasta la estación que tomo el registro.
- **Condición local:** Tipo de suelo se encuentra la estación que tomo el registro.
- **PGA, PGV y PGD:** El máximo valor absoluto de cada componente de aceleración, velocidad y desplazamiento.
- **Intervalo entre picos:** Es el tiempo que hay entre resultados máximos de aceleración, velocidad y desplazamientos entre componentes del sismo.
- **Media geométrica (HGM):** Es un tipo de media que se calcula como la raíz del producto de un conjunto de números.
- **Raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS):** Este método estima la respuesta pico por la raíz cuadrada de la suma de las respuestas modales máximas al cuadrado.

## 4. Metodología

### 4.1 Proceso constructivo

El proceso constructivo de la estructura se encuentra estrechamente vinculados con los parámetros de diseño, en el caso de los puentes viga-losa el procedimiento constructivo de la superestructura de concreto reforzado y presforzado puede ser con el uso de grúas para poder alzar

las vigas prefabricadas, para luego descargarla sobre la subestructura ya fabricada (Rodríguez & Urrea, 2020).

Después las vigas se ubican sobre los apoyos de la subestructura, el tablero generalmente es fundido en el sitio, o puede ser instalado mediante placas prefabricadas, para luego situar los demás componentes de la superestructura como las barreras, barandas y capa asfáltica (Rodríguez & Urrea, 2020).

Al momento de originar continuidad en el tablero se debe tener en cuenta el agrietamiento producido por el momento negativo en la zona de continuidad. Se debe ejecutar apoyos fijos en las vigas, proveer de un refuerzo especial en la zona de momento negativo, utilizar concretos de alta calidad y desempeño en la zona de continuidad del tablero y adjuntar membranas impermeables en el refuerzo con el objetivo de impedir la corrosión del acero (Rodríguez & Urrea, 2020).

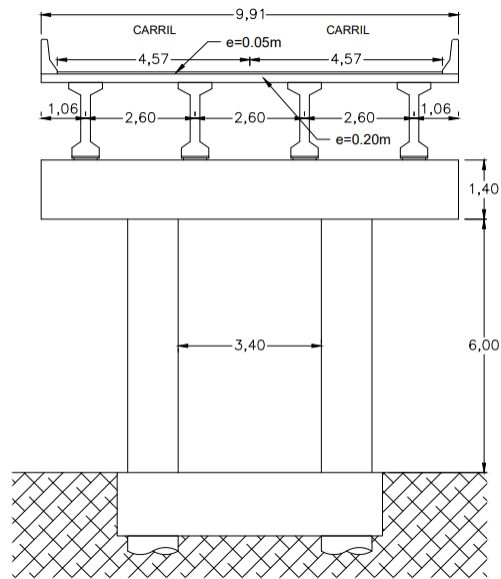
#### **4.2 Geometría del puente en estudio**

La conformación geométrica del puente de estudio corresponde a un puente hipotético de dos luces, cuyas dimensiones geométricas se describen a continuación, La sección transversal del puente vigas-losa continua está compuesto por cuatro vigas prefabricadas de concreto presforzado en sección I; un tablero con un ancho de 9.91 m y de un espesor de 0.2 m, con una capa asfáltica de 0.05 m. Tiene una sección longitudinal de luces de 38 m de apoyo a apoyo, en la mitad del puente hay una pila tipo pórtico de 2 columnas con un diámetro de 1.2 m y una altura de 6 metros con una viga cabezal de 1.4 m de altura y una base de 1.7 m como se visualiza en la Figura 6. Las

vigas están simplemente apoyadas sobre apoyos de Neopreno, mientras que la losa es continua sobre el apoyo intermedio, como se visualiza en la Figura 7. En cada vano se ubican 5 riostras con una base de 0.3 m y una altura de 1.55 m. Las vigas tipo I tienen un patín superior de 0.85 m y un patín inferior de 0.65 m con unos espesores de 0.15 m y 0.2 m, con un espesor de alma de 0.23 m y un peralte de 1.75 m como se visualiza en la Figura 8 (Rodríguez & Urrea, 2020).

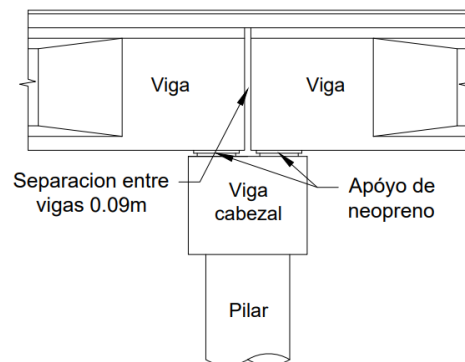
### Figura 6.

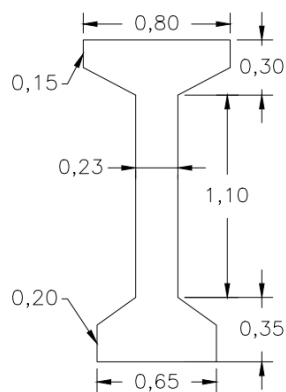
*Sección transversal del puente*



### Figura 7.

*Sección longitudinal del puente*



**Figura 8.***Sección viga I***4.3 Propiedades de los materiales**

Las propiedades de los materiales de los elementos de la superestructura del puente viga-losa y de los apoyos de neopreno se muestran en la Tabla 1, donde  $f'_c$  es la resistencia a la compresión del concreto,  $E_c$  es el módulo de elasticidad del concreto,  $f_y$  es el esfuerzo de fluencia del acero,  $E_s$  es el módulo de elasticidad del acero,  $G$  es el módulo de cortante del elastómero,  $\epsilon$  es la deformación unitaria y  $k$  es la constante de la dureza del elastómero. Los valores de las propiedades de los materiales de infraestructura son los mismos a la superestructura (Rodríguez & Urrea, 2020).

**Tabla 1.***Propiedades mecánicas de los materiales*

<b>Concreto</b>			
<b>Peso [Kn/m<sup>2</sup>]</b>	<b>f'c [Mpa]</b>	<b>Ec [Mpa]</b>	
24	28	26750	
24	35	29910	
<b>Acero</b>			
<b>Grado</b>	<b>fy [Mpa]</b>	<b>Es [Mpa]</b>	
60	420	200000	
<b>Elastómero</b>			
<b>Dureza</b>	<b>fy [Mpa]</b>	<b>ξ</b>	<b>k</b>
60	0,9	0,35	0,6

#### 4.4 Selección de los registros y cálculo del factor de escalamiento

Los registros con los cuales se trabajó la investigación se obtuvieron del servicio geológico colombiano (SGC) (Servicio Geológico colombiano, 2022), éste cuenta con una base de datos que está conformada por 2 catálogos sísmicos: el primero contiene los eventos registrados desde junio de 1993 hasta diciembre del 2017 y el segundo los eventos de enero del 2018 hasta la fecha. La investigación se desarrolló con eventos sísmicos que tengan una magnitud mayor o igual a 4 en la escala de momento, y la distancia entre la estación y el epicentro no debe superar los 50 km, con el fin de favorecer la componente vertical del registro en cuanto a sus aceleraciones máximas (Fernández & Ardila, 2020).

Una vez seleccionados los eventos que cumplan con las dos condiciones, se descargan de la base de datos del SGC los archivos .ANC (archivo no corregido), de cada registro. Para el tratamiento y procesamiento de las señales sísmicas se utilizó el código en Matlab desarrollado en el proyecto de grado llamado, “Caracterización de la componente vertical de los sismos moderados y fuertes de Colombia” de María Fernández y Javier Ardila (Fernández & Ardila, 2020), este

código facilita seleccionar e importar los datos de aceleración (tres componentes) de cada archivo .ANC descargado. El código genera tres vectores de aceleración para cada registro, correspondientes a las componentes Norte-Sur (NS), Este-Oeste (EW), Vertical (V), y el vector de tiempo (Fernández & Ardila, 2020).

Para calcular el factor de escalamiento de los registros sísmicos se utilizó el espectro de diseño para la ciudad de Bucaramanga y se asumió un perfil de suelo tipo C; posteriormente en el software Excel se calcula y se grafica el espectro de diseño para la ciudad de Bucaramanga como se indica en la “Figura 3.10.4.1-1 – Espectro de aceleraciones de diseño para 5% de amortiguamiento” de la norma colombiana de diseño de puentes CCP-14 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2014); se exporta a esta hoja de cálculo los valores de pseudo-aceleración de las componentes EW, NS y V; se calcula la media geométrica (HGM) y la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS) para las componentes horizontales EW y NS, con el fin de tener dos puntos de partida para el cálculo del factor de escalamiento; multiplicamos los valores de la HGM por un factor de escalamiento supuesto, se calcula la raíz del error cuadrático medio (RMSE) entre la HGM escalada y los valores del coeficiente sísmico elástico del espectro de diseño ( $C_{sm}$ ), para un rango de tiempo definido por el periodo fundamental del puente (TFS) el cual va desde  $0.2TFS$  a  $1.5TFS$  (el valor de TFS es reportado por el modelo del puente realizado en el software MIDAS Civil, el cual tiene un valor de 0.915 segundos), por último se itera el factor de escalamiento supuesto hasta encontrar el mínimo RMSE y de esta manera se obtiene el factor de escala para la HGM, se realiza el mismo método para calcular el factor de escalamiento de la SRSS. El valor del factor de escalamiento definitivo para el registro es aquel que se encuentre en el rango de 0.5 a 2 y presente un RMSE menor (Servicio Geológico colombiano, 2022).

## 4.5 Análisis y evaluación de cargas

### 4.5.1 Cargas gravitacionales

Las cargas gravitacionales consideradas en el análisis estructural se ilustran en la Tabla 2.

**Tabla 2.**

*Cargas gravitacionales*

	<b>Carga</b>	<b>Descripción</b>
Muerta	DC1	Peso propio elementos estructurales
	DC2	Peso de barreras [4,59 kN/m]
	DC3	Carga de pavimento [22,5 kN/m <sup>3</sup> ]

### 4.5.2 Cargas sísmicas

El terremoto es un fenómeno de sacudida brusca y pasajera de la corteza terrestre producida por la liberación de energía acumulada en forma de ondas sísmicas. El sismo está compuesto por tres componentes:

- La componente sísmica vertical es la acción vertical que es producida por el suelo.
- Las componentes sísmicas horizontales que son la acción que se describe mediante dos componentes en dirección longitudinal y transversal al puente.

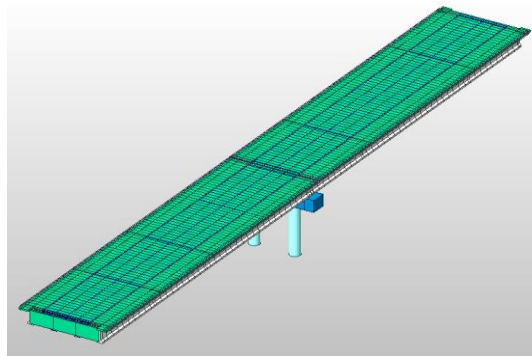
#### 4.6 Descripción del modelo Midas civil

El modelo del puente en estudio fue desarrollado por el software MIDAS Civil como se visualiza en la Figura 9, donde los elementos estructurales se modelaron mediante tipo barra (frame) a excepción del tablero que se modeló mediante elementos tipo área (plate).

Los apoyos de neopreno de las vigas se simuló mediante elementos general link donde se usó elementos tipo elásticos (elastic links), en los extremos de la superestructura se conectaron los apoyos empotrados y en la zona del apoyo intermedio se conectó con la viga cabezal mediante elementos rígidos (rigid link).

#### Figura 9.

*Modelo Midas civil puente viga-losa*



#### 4.7 Comportamiento de los apoyos elastoméricos

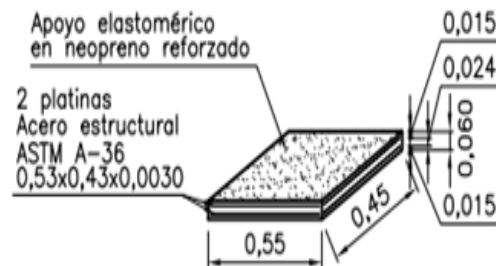
Son muchos los factores que tienen influencia en el comportamiento de los apoyos elastoméricos. Algunas de las propiedades mecánicas importantes son la rigidez vertical y

horizontal del apoyo; pero también tienen gran importancia el efecto de fluencia (creep), de relajación y la pérdida de energía del caucho (Ramírez, 2016).

Estos apoyos se diseñaron presentando una rigidez axial de 89100 kN/m y cortante de 4304 kN/m estas rigideces fueron asignadas en elementos elásticos. Mientras que las columnas también se utilizaron apoyos empotrados con el fin de simular una cimentación rígida (Rodríguez & Urrea, 2020).

### Figura 10.

*Neopreno para apoyo de vigas*



### 4.8 Índice de impacto del movimiento vertical

Las respuestas estructurales se compararon con 3 registros sísmicos teniendo en cuenta o no la componente vertical. Se tomaron los valores de los elementos estructurales de la viga externa, la viga interna, la viga cabezal y el pilar para el análisis de las fuerzas internas y desplazamientos, también se tomaron valores de las reacciones en los apoyos (Neoprenos).

El índice para estimar el impacto del movimiento vertical con respecto a no considerar dicha componente vertical se hace mediante la siguiente fórmula.

**Ecuación 1.**

*Diferencia porcentual de impacto del movimiento vertical*

$$\Delta(\%) = \frac{3CS - 2CS}{2CS} * 100$$

Donde:

**D(%):** Diferencia porcentual para estimar el impacto del movimiento vertical.

**3CS:** Respuesta considerando las tres componentes sísmicas (Longitudinal, Transversal y vertical) + Carga muerta.

**2CS:** Respuesta considerando las dos componentes sísmicas horizontales (Longitudinal y Transversal) + Carga muerta.

**Ecuación 2.**

*Diferencia de fuerzas*

$$\Delta(kN) = 3CS - 2CS$$

Donde:

**D(kN):** Diferencia de fuerzas con y sin la componente vertical.

**3CS:** Respuesta considerando las tres componentes sísmicas (Longitudinal, Transversal y vertical) + Carga muerta.

**2CS:** Respuesta considerando las componentes sísmicas horizontales (Longitudinal y Transversal) + Carga muerta.

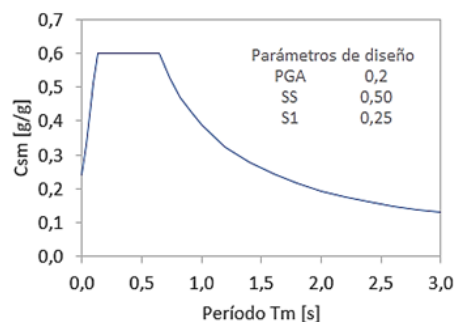
## 5. Resultados y Análisis

### 5.1 Selección de los registros y cálculo del factor de escalamiento

Al principio se analizó 112 registros sísmicos del departamento de Santander, con el fin de trabajar con registros cercanos a la ciudad de Bucaramanga puesto que, se va a trabajar con el espectro de diseño para esta ciudad. No se pudo trabajar con los eventos sísmicos de Santander pese a que cumplían con la condición de tener una distancia epicentral menor a 50 km y una magnitud en la escala de momento mayor a 4, estos registros necesitan factores de escalamiento muy alejados al rango (0.5 a 2) con el que se quiere trabajar, esto sucede porque los valores de pseudo-aceleración de los registros sísmicos son muy pequeños comparados con los valores del  $C_{sm}$  del espectro de diseño para la ciudad de Bucaramanga el cual se muestra en la Figura 11.

#### Figura 11.

*Espectro de diseño para Bucaramanga con suelo tipo C*



Se optó por trabajar con los 101 registros que se utilizaron para desarrollar el proyecto de grado de M. Fernández y J. Ardila (Fernández & Ardila, 2020), estos registros cumplen con la

condición de distancia epicentral y la condición de magnitud en la escala de momento establecidos para el proyecto. Como resultado se decidió trabajar con los siguientes registros sísmicos: sismo de Córdoba Quindío ocurrido el 25 de enero de 1999 a las 18:19:17, reportado por la estación FILANDIA (R-1 registro de Córdoba); sismo de Calima Valle ocurrido 8 de febrero de 1995 a las 18:40:25, reportado por la estación TRUJILLO (R-2 registro de Calima) y el sismo de Mesetas Meta ocurrido el 24 de diciembre de 2019 a las 19:03:52, reportado por la estación CLEJA (R-3 registro de Mesetas), la magnitud del factor de escalamiento (F.E) de estos registros no se aleja considerablemente del rango establecido de 0.5 a 2, se tuvo en cuenta la relación vertical/horizontal (V/H) de manera que los registros quedaran con una relación baja, una media y una alta, y el delta de tiempo para los picos de aceleración máxima de las componente horizontal versus la componente vertical ( $\Delta$ Tiempo), como se observa en la Tabla 3.

**Tabla 3.**

*Resultados del factor de escalamiento de los registros seleccionados*

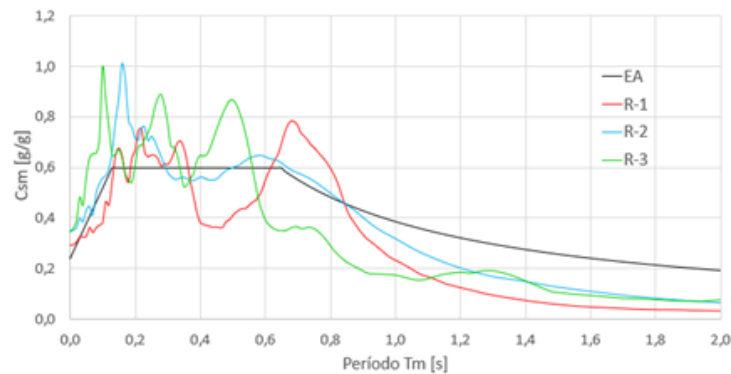
Sismos	ML	Distancia epicentral [km]	V/H	$\Delta$ tiempo	HGM		SRSS	
					RMSE	F.E	RMSE	F.E
R-1	6,3	28,85	0,314	0,005	0,1561	0,49	<b>0,1572</b>	<b>0,34</b>
R-2	6,6	47,44	0,640	7,770	0,0801	3,18	<b>0,0792</b>	<b>2,21</b>
R-3	6,0	19,00	1,192	0,985	0,1801	1,91	<b>0,1768</b>	<b>1,29</b>

Se decidió trabajar con los factores de escalamientos calculados con SRSS, estos factores son los que mejor se acomodan al rango establecido y presentan menores valores de RMSE, dando como resultado un factor de escalamiento (F.E) de 0.34 para R-1, 2.21 para R-2 y 1.29 para R-3. A continuación, se muestran la gráfica del espectro de diseño para Bucaramanga vs SRSS de las componentes horizontales multiplicadas por el factor de escalamiento (Figura 12), la gráfica del

espectro de diseño vs la componente vertical multiplicada por el factor de escalamiento (Figura 13) y las trazas de aceleración de las tres componentes multiplicadas por el factor de escalamiento de cada registros seleccionado (Figura 14, 15 y 16).

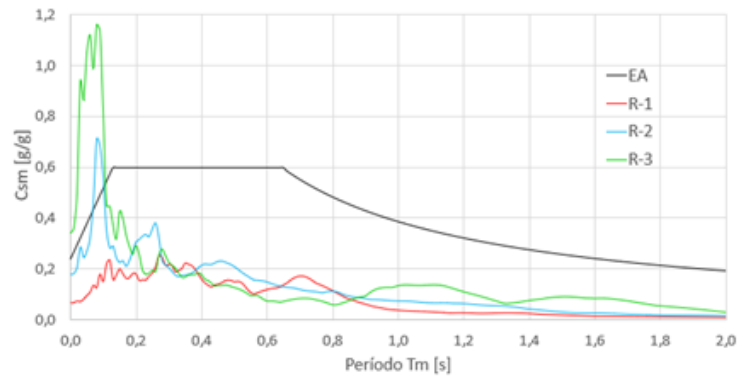
### Figura 12.

*Espectro de diseño vs la SRSS escalada de las componentes horizontales de los tres registros*



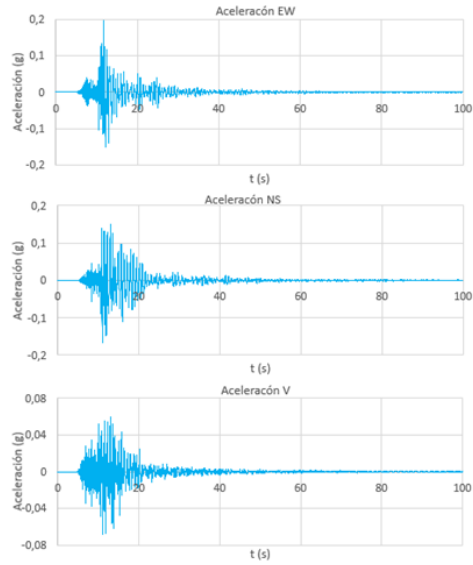
### Figura 13.

*Espectro de diseño vs la componente vertical escalada de los tres registros*

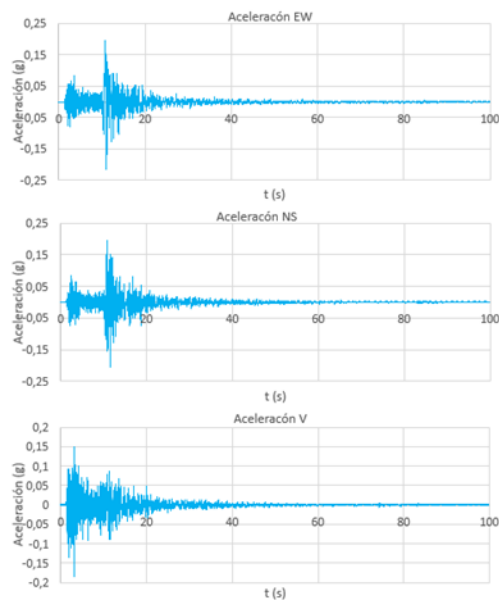


**Figura 14.**

*Traza de aceleración de las tres componentes para R-1 (Córdoba) multiplicadas por el factor de escalamiento (0.34)*

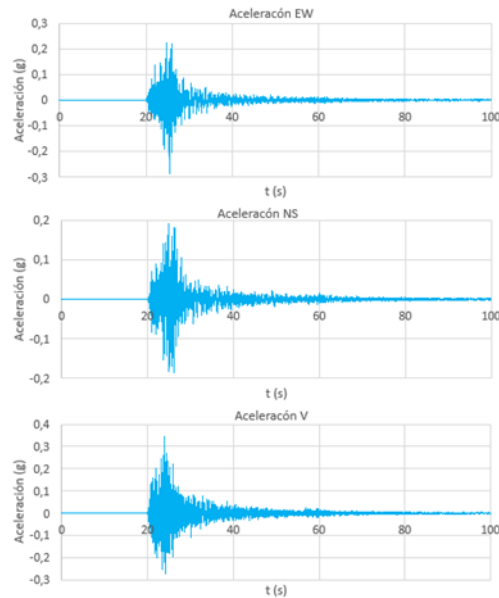
**Figura 15.**

*Traza de aceleración de las tres componentes para R-2 (Calima) multiplicadas por el factor de escalamiento (2.21)*



**Figura 16.**

*Traza de aceleración de las tres componentes para R-3 (Mesetas) multiplicadas por el factor de escalamiento (1.29)*

**5.2 Variación de las fuerzas internas debido a la componente vertical del sismo****5.2.1 Viga externa**

En la viga externa al considerarse la componente vertical del sismo, hay un incremento negativo de la fuerza axial en la zona de la viga cabezal hasta de 35.83 kN, con un incremento porcentual de 17.47 % debido al registro de Mesetas, como se observa en la Tabla 4.

**Tabla 4.**

*Variación de la fuerza axiales en la viga externa debido a la componente vertical del sismo*

Nombre	Fuerza axial		
	Zona	D(%)	D(kN)
Córdoba	Estribo	0,84%	-1,67
	Medio	-0,11%	1,18
	V.Cabecal	0,52%	-2,79
Calima	Estribo	0,33%	-0,96
	Medio	0,59%	-5,05
	V.Cabecal	2,31%	-6,66
Mesetas	Estribo	0,12%	-0,2
	Medio	0,85%	-3,74
	V.Cabecal	17,47%	-35,83

En la viga externa al considerarse la componente vertical del sismo, hay incrementos negativos y positivos en la fuerza cortante z en la zona de los extremos hasta de 80.29 kN, con un incremento porcentual de 11.75 % debido al registro de Mesetas, como se observa en la Tabla 5.

**Tabla 5.**

*Variación de la fuerza cortante Vz en la viga externa debido a la componente vertical del sismo*

Nombre	Fuerza cortante Vz		
	Zona	D(%)	D(kN)
Córdoba	Estribo	5,48%	-40,52
	Medio	-4,83%	-0,93
	V.Cabecal	6,55%	47,92
Calima	Estribo	9,90%	-68,25
	Medio	-0,67%	-0,24
	V.Cabecal	3,00%	22,19
Mesetas	Estribo	11,75%	-80,29
	Medio	6,46%	1,06
	V.Cabecal	11,40%	78,99

En la viga externa al considerarse la componente vertical del sismo, hay un incremento positivo de momento flector  $M_y$  en la zona media del vano hasta de 966.51k N-m, con un incremento porcentual de 15.51 % debido al registro de Calima, como se observa en la Tabla 6.

**Tabla 6.**

*Variación del momento flector  $M_y$  en la viga externa debido a la componente vertical del sismo*

Nombre	Zona	Momento flector $M_y$	
		D(%)	D (kN-m)
Córdoba	Estribo	0,42%	-1,25
	Medio	13,71%	840,12
	V.Cabecal	1,66%	-5,3
Calima	Estribo	0,08%	-0,25
	Medio	15,51%	966,51
	V.Cabecal	-1,61%	7,86
Mesetas	Estribo	0,23%	-0,56
	Medio	10,48%	645,96
	V.Cabecal	1,47%	-3,5

Al presentarse un incremento en las fuerzas internas axial (14.47 %), cortante z (11.75 %) y momento y (15.51 %) del elemento estructural es necesario aumentar el refuerzo de acero en las vigas externas del puente.

### 5.2.2 Viga interna

En la viga interna al considerarse la componente vertical del sismo, hay un incremento negativo de la fuerza axial de hasta 25.79 kN, con un incremento porcentual de 14.53 % debido al registro de Mesetas, como se observa en la Tabla 7.

**Tabla 7.**

*Variación de la fuerza axial en la viga interna debido a la componente vertical del sismo*

Nombre	Fuerza axial		
	Zona	D(%)	D(kN)
<b>Córdoba</b>	Estribo	1,13%	-2,23
	Medio	4,59%	-14,5
	V.Cabecal	3,86%	-12,67
<b>Calima</b>	Estribo	0,51%	-1,41
	Medio	4,35%	-14,55
	V.Cabecal	6,10%	-8,52
<b>Mesetas</b>	Estribo	0,12%	-0,21
	Medio	14,53%	-25,79
	V.Cabecal	11,41%	-18,65

En la viga interna al considerarse la componente vertical del sismo, hay una variación positiva y negativa de la fuerza cortante z de hasta 100.22 kN, con un incremento porcentual de 15.95 % debido al registro de Calima, como se observa en la Tabla 8.

**Tabla 8.**

*Variación de la fuerza cortante Vz en la viga interna debido a la componente vertical del sismo*

Nombre	Fuerza cortante Vz		
	Zona	D(%)	D(kN)
<b>Córdoba</b>	Estribo	10,01%	-65,81
	Medio	8,23%	-2,52
	V.Cabecal	10,77%	70,41
<b>Calima</b>	Estribo	15,95%	-102,22
	Medio	6,51%	-2,42
	V.Cabecal	10,27%	69,27
<b>Mesetas</b>	Estribo	13,17%	-84,6
	Medio	17,34%	-4,92
	V.Cabecal	13,25%	86

En la viga interna al considerarse la componente vertical del sismo, hay un incremento positivo de momento flector  $M_y$  en la zona media del vano de hasta de 1176.72 kN-m, con un valor porcentual de 19.13 % debido al registro de Calima, como se observa en la Tabla 9.

**Tabla 9.**

*Variación del momento flector  $M_y$  en la viga interna debido a la componente vertical del sismo*

Nombre	Zona	Momento flector $M_y$	
		D(%)	D (kN-m)
Córdoba	Estribo	0,36%	-1,04
	Medio	14,63%	890,64
	V.Cabecal	0,34%	-0,54
Calima	Estribo	-0,07%	0,27
	Medio	<b>19,13%</b>	<b>1176,72</b>
	V.Cabecal	-0,86%	3,14
Mesetas	Estribo	0,25%	-0,61
	Medio	12,83%	782,57
	V.Cabecal	4,83%	-7,84

En resumen, podemos concluir que se presentan incrementos leves en las fuerzas internas axial (14.53 %), cortante z (15.95 %) y momento y (19.13 %) del elemento estructural.

### 5.2.3 Viga cabecal

En la viga cabecal al considerarse la componente vertical del sismo, hay una variación positiva y negativa de la fuerza cortante z de hasta 169.43 kN, equivalente a un incremento porcentual de 10.43 % debido al registro de Mesetas, como se observa en la Tabla 10.

**Tabla 10.**

*Variación de la fuerza cortante Vz en la viga cabezal debido a la componente vertical del sismo*

<b>Fuerza cortante Vz</b>			
<b>Nombre</b>	<b>Zona</b>	<b>D(%)</b>	<b>D(kN)</b>
Córdoba	Izq. Pilar1	4,40%	-80,25
	Der. Pilar1	1,70%	52,36
	Izq. Pilar2	2,55%	-78,46
	Der. Pilar2	4,17%	75,98
Calima	Izq. Pilar1	1,57%	-27,45
	Der. Pilar1	-2,76%	-76,88
	Izq. Pilar2	-2,13%	57,91
	Der. Pilar2	3,08%	53,07
Mesetas	Izq. Pilar1	<b>10,43%</b>	<b>-169,43</b>
	Der. Pilar1	-2,82%	-61,6
	Izq. Pilar2	2,47%	-52,4
	Der. Pilar2	9,32%	150,38

En la viga cabezal al considerarse la componente vertical del sismo, hay una variación positiva y negativa de momento flector My en toda la zona izquierda sobre el pilar 1 de hasta 208.90 kN-m, con un incremento porcentual de 7.83 % debido al registro de Mesetas, como se observa en la Tabla 11.

**Tabla 11.**

*Variación del momento flector My en la viga cabezal debido a la componente vertical del sismo*

<b>Momento flector My</b>			
<b>Nombre</b>	<b>Zona</b>	<b>D(%)</b>	<b>D (kN-m)</b>
Córdoba	Izq. Pilar1	3,84%	-121,2
	Der. Pilar1	1,23%	-63,63
	Izq. Pilar2	2,04%	-105,23
	Der. Pilar2	3,80%	-119,77
Calima	Izq. Pilar1	0,75%	-22,15
	Der. Pilar1	-2,78%	127,75
	Izq. Pilar2	-3,18%	142,63

<b>Momento flector My</b>			
<b>Nombre</b>	<b>Zona</b>	<b>D(%)</b>	<b>D (kN-m)</b>
	Der. Pilar2	3,00%	-87,12
<b>Mesetas</b>	Izq. Pilar1	<b>7,83%</b>	<b>-208,9</b>
	Der. Pilar1	-2,72%	92,09
	Izq. Pilar2	2,20%	-71,52
	Der. Pilar2	7,31%	-193,32

Al presentarse un incremento en las fuerzas internas cortante z (10.43 %) y momento y (7.83 %) del elemento estructural es necesario aumentar el refuerzo de acero en la viga cabezal del puente.

#### 5.2.4 Pilar

En los pilares de la pila intermedia, al considerarse la componente vertical del sismo, hay variaciones positivas y negativas en la fuerza axial de hasta 129.22 kN, equivalente a un aumento porcentual de 2.63 % debido al registro de Córdoba, como se observa en la Tabla 12.

**Tabla 12.**

*Variación de la fuerza axial en el pilar izquierdo de la pila intermedia, debido a la componente vertical del sismo*

<b>Fuerza axial</b>			
<b>Nombre</b>	<b>Zona</b>	<b>D(%)</b>	<b>D(kN)</b>
Córdoba	Parte superior	<b>2,63%</b>	<b>-129,22</b>
	Parte inferior	2,53%	-129,22
Calima	Parte superior	-1,64%	74,3
	Parte inferior	-1,57%	74,31
Mesetas	Parte superior	0,16%	-6,26
	Parte inferior	0,16%	-6,26

Al presentarse un incremento en las fuerzas internas de axiales en los elementos estructurales es necesario aumentar el refuerzo de acero en los pilares del puente.

### 5.3 Variación en los desplazamientos debido a la componente vertical del sismo

#### 5.3.1 Viga externa y viga interna

El registro que presenta mayor incidencia en los desplazamientos de la viga externa es el registro R-2 (Calima), seguido del registro R-1 (Córdoba) y el registro R-3 (Mesetas), esta secuencia se repite tanto en los mínimos como en los máximos para cada uno de los desplazamientos en los ejes X, Y y Z. Los desplazamientos en los ejes X y Y no son relevantemente afectados cuando se incluye la componente vertical del registro sísmico, sin embargo, si es notorio el incremento en los desplazamientos del eje Z al incluir la componente vertical del registro sísmico, como se observa en la Tabla 13.

**Tabla 13.**

*Variación del desplazamiento en la dirección del eje Z en la viga externa al incluir la componente vertical sismo*

Eje Z			
Sismo	Zona	$\Delta(\%)$	$\Delta(\text{mm})$
<b>Córdoba</b>	Ext. Izq	4,09%	-0,410
	Medio	6,68%	-9,160
	Ext. Der	3,17%	-0,415
<b>Calima</b>	Ext. Izq	1,76%	-0,161
	Medio	8,39%	-11,415
	Ext. Der	6,27%	-0,638
<b>Mesetas</b>	Ext. Izq	10,08%	-0,863

Eje Z			
Sismo	Zona	$\Delta(\%)$	$\Delta(\text{mm})$
	Medio	5,30%	-7,179
	Ext. Der	9,31%	-0,984

Debido a la simetría del puente, el comportamiento de las vigas externas e internas es similar, en la viga interna tampoco se ven afectados los desplazamientos en los ejes X y Y cuando se incluye la componente vertical del registro sísmico en el análisis, mientras que si es notorio el incremento en los desplazamientos en la dirección del eje Z al incluir la componente vertical del registro sísmico, como se observa en la Tabla 14.

**Tabla 14.**

*Variación del desplazamiento en la dirección del eje Z en la viga interna al incluir la componente vertical del sismo*

Eje Z			
Sismo	Zona	$\Delta(\%)$	$\Delta(\text{mm})$
Córdoba	Ext. Izq	6,78%	-0,566
	Medio	7,61%	-10,209
	Ext. Der	5,98%	-0,632
Calima	Ext. Izq	13,40%	-1,048
	Medio	10,85%	-14,460
	Ext. Der	6,11%	-0,618
Mesetas	Ext. Izq	15,74%	-1,231
	Medio	6,86%	-9,143
	Ext. Der	8,95%	-0,897

### 5.3.2 Viga cabezal

Al igual que en las vigas internas y externas, los desplazamientos en la viga cabezal tampoco tienen una variación importante en la dirección de los ejes X y Y cuando se incluye la componente vertical del sismo, sin embargo, el desplazamiento en la dirección del eje Z si presenta

un notorio incremento al considerar en el análisis la componente vertical del sismo. Los desplazamientos máximos son generados por R-2 (Calima) seguido de R-1 (Córdoba) y R-3 (Mesetas), como se observa en la Tabla 15.

**Tabla 15.**

*Variación del desplazamiento en la dirección del eje Z en la viga cabezal al incluir la componente vertical del sismo*

Sismo	Eje Z		
	Zona	$\Delta(\%)$	$\Delta(\text{mm})$
Córdoba	Ext. Izq	1,51%	-0,060
	Medio. Izq	2,58%	-0,034
	Medio. Der	3,05%	-0,040
	Ext. Der	2,34%	-0,093
Calima	Ext. Izq	-2,63%	0,094
	Medio. Izq	-1,60%	0,019
	Medio. Der	1,17%	-0,014
	Ext. Der	-1,23%	0,042
Mesetas	Ext. Izq	-2,52%	0,070
	Medio. Izq	0,16%	-0,002
	Medio. Der	3,69%	-0,037
	Ext. Der	2,34%	-0,063

### 5.3.2 Pilar de la pila

Los desplazamientos en los tres ejes no sufren un aumento considerable cuando se incluye la componente vertical sísmica en el análisis, con ninguno de los 3 registros sísmicos. En la dirección del eje Z se presentó el mayor incremento, como se puede ver en la Tabla 16.

**Tabla 16.**

*Variación del desplazamiento en la dirección del eje Z en el pilar de la pila al incluir la componente vertical del sismo*

Sismo	Eje Z		
	Zona	$\Delta(\%)$	$\Delta(\text{mm})$
Córdoba	Parte superior	2,58%	-0,034
	Parte inferior	3,05%	-0,040
Calima	Parte superior	-1,60%	0,019
	Parte inferior	1,17%	-0,014
Mesetas	Parte superior	0,16%	-0,002
	Parte inferior	3,69%	-0,037

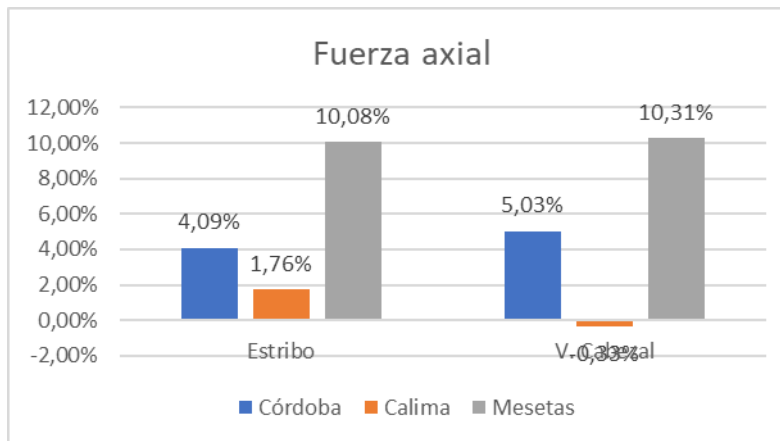
## 5.4 Reacciones de los apoyos de neopreno

### 5.4.1 Apoyo de Neopreno en la viga externa

En el apoyo de neopreno de la viga externa al considerarse la componente vertical del sismo, hay un incremento de la fuerza axial a compresión hasta de 76.89 kN, con un incremento porcentual de 10.31 % debido al registro de Mesetas, como se observa en la Figura 17.

**Figura 17.**

*Variación porcentual de la fuerza axial en el apoyo de neopreno de la viga externa*

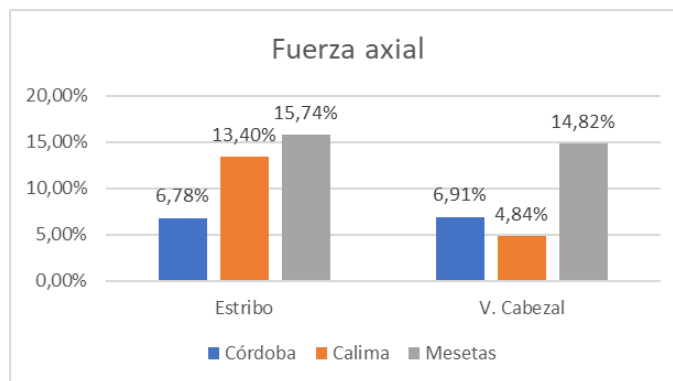


#### **5.4.2 Apoyo de Neopreno en la viga interna.**

En el apoyo de neopreno de la viga interna al considerarse la componente vertical del sismo, hay un incremento de la fuerza axial a compresión de hasta 109.72 kN con un incremento porcentual de 15.74 % debido al registro de Mesetas, como se observa en la Figura 18.

**Figura 18.**

*Variación porcentual de la fuerza axial en el apoyo de neopreno en la viga interna*



## 6. Conclusiones

❖ A partir de los análisis del puente se observa que las secciones que se ven mayormente afectadas por las aceleraciones verticales del sismo son: I) la demanda de fuerza axial en los pilares; II) el momento positivo en el centro de las vigas; y III) el cortante en los extremos de la viga cabezal. En particular, la fuerza axial se incrementó notablemente cuando se consideró la componente vertical del sismo, con incrementos de hasta 129.22 kN aumento porcentual de hasta 2.63 %. Debe señalarse que los sismos que ocasionaron las variaciones más altas en los resultados de los pilares, es el sismo de Córdoba, cuyo intervalo de tiempo entre picos de aceleración es el más corto.

❖ La tendencia que se observa en los incrementos, en magnitud o en porcentaje de las fuerzas internas debido a los tres registros sísmicos usados, con la relación V/H en la cual prevalece el registro de Mesetas, luego el de Calima y por último el de Córdoba.

❖ Se empleo el rango de 0.5 a 2 para el factor de escalamiento, con el fin de tener valores no muy alejados de la realidad, este parámetro fue el que más afectó a la hora de seleccionar los registros sísmicos, ya que la mayoría de ellos necesitaban factores de escalamiento muy altos, debido a sus bajos valores de pseudo-aceleración de las componentes sísmicas.

❖ Se observó un incremento porcentual de momento flector  $M_y$  considerable en la viga interna del puente de hasta 19.13 % en caso de diseño se tendría que incrementar las cantidades de acero en el elemento estructural del puente.

**Referencias bibliográficas**

- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS). (2014). *Norma Colombiana de Diseño de Puentes*. Bogotá D.C: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS).
- Button, M. R., Cronin, C. J., & Mayes, R. L. (2002). Effect of Vertical Motions on Seismic Response of Highway Bridges. *Journal of Structural Engineering*, 128(12), 1551- 1564.
- Dehghanpoor, A., Thambiratnam, D., Taciroglu, E., & Chan, T. (2019). Soil-pile- superstructure interaction effects in seismically isolated bridges under combined vertical and horizontal strong ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 126, 105753.
- Falsone, G., Recuperero, A., & Spinella, N. (2020). Effects of near-fault earthquakes on existing bridge performances. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 10(1), 165- 176.
- Fernández, M., & Ardila, J. (2020). *Caracterización de la componente vertical de los sismos moderados y fuertes en Colombia*. Bucaramanga: [Tesis] Universidad Industrial de Santander.
- Jara, M., Hernández, H., & Álvarez, O. (2022). *Efecto del componente sísmico vertical en puentes*.
- Kim, S. J., Holub, C. J., & Elnashai, A. S. (2011). Analytical Assessment of the Effect of Vertical Earthquake Motion on RC Bridge Piers. *Journal of Structural Engineering*, 137(2), 252- 260.
- Li, R., & Yao, C. (2020). Effects of Vertical Earthquake Ground Motions on Seismic Response of Steel-Concrete Plate Composite Beam Bridges. *International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS)*, Vientiane, Laos, 114-117.

- Li, X., Dou, H., & Zhu, X. (2007). Engineering characteristics of near-fault vertical ground motions and their effect on the seismic response of bridges. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 6(4), 345-350.
- Lin, H., & Song, Y. (2015). Seismic Performance of Reinforced Concrete Bridge Including Effect of Vertical Motion. *Applied Mechanics and Materials*, 744-746, 898-904.
- MathWorks, Matlab. (2022). *Matemáticas. Gráficas. Programación*. Obtenido de <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>
- Papazoglou, A. J., & Elnashai, A. S. (1996). Analytical and field evidence of the damaging effect of vertical earthquake ground motion. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 25(10), 1109-1137.
- Paraskeva, T. S., Dimitrakopoulos, E. G., & Zeng, Q. (2017). Dynamic vehicle–bridge interaction under simultaneous vertical earthquake excitation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(1), 71-95.
- Ramírez, F. (2016). *Evaluación experimental de la capacidad de aislamiento sísmico de los apoyos convencionales de neopreno de un puente vehicular*.
- Rodríguez, D., & Urrea, J. (2020). *Comparación del comportamiento estructural y de la constructibilidad de un puente viga-losa de dos vanos en función del tipo de continuidad y conexión entre la superestructura y el apoyo intermedio*. Bucaramanga: [Tesis] Universidad Industrial de Santander.
- Servicio Geológico colombiano. (2022). *Catálogo de aceleraciones, SGC*.
- Yang, H., Yin, X., Hao, H., & Bi, K. (2015). Theoretical Investigation of Bridge Seismic Responses with Pounding under Near-Fault Vertical Ground Motions. *Advances in Structural Engineering*, 18(4), 453-468.