







# Diseño y construcción de puentes en voladizos sucesivos en Colombia

Design and Construction of Balanced Cantilever Bridges in Colombia

Francisco Javier Jordán García a, Nelson Betancour Suárez b, Rafael de Oliveira Cabral c y Alicia Serrano Lastre d

> <sup>a</sup> ICCP – PE – PEng. Pedelta. Director Técnico. <u>jjordan@pedelta.com</u> <sup>b</sup> Ingeniero Civil. Pedelta Colombia. Gerente Técnico. nbetancour@pedelta.com.co <sup>c</sup> Ingeniero Civil. Pedelta. Responsable de Proyectos. <u>rcabral@pedelta.com</u> d Ingeniera Civil. Pedelta Colombia. Responsable de Proyectos. aserrano@pedelta.com.co

#### RESUMEN

A partir del año 2012 el gobierno colombiano puso en marcha un plan para duplicar el número de vías y aumentar el número de carriles existentes. Pedelta se ha visto involucrada en el diseño y asistencia a construcción de puentes en voladizos sucesivos. El puente Flandes, ubicado sobre el río Magdalena, de 300m de longitud con vanos de 75+150+75m. El puente Pipiral, ubicado en la cordillera oriental, una zona de amenaza sísmica alta, consta de 5 vanos, con vanos laterales de 75 m de longitud y centrales de 140 m, apoyado sobre pilas que varían entre 64 m y 8 m de altura. El puente Puerto Salgar, cuya luz principal es de 180 m, se encuentra ubicado en zona de amenaza sísmica intermedia al igual que Flandes.

#### **ABSTRACT**

Since 2012 the Colombian government deployed a project in order to double the number of highways and number of lanes of the pre-existing ones. Pedelta has been involved in the design and build process of several balanced cantilever bridges. The Flandes Bridge, located over the Magdalena River, is a 3 span bridge with an span configuration of 75+150+75m. The Pipiral Bridge is located on a high seismic hazard zone over the Eastern Andes mountain range. It has a typical span of 140m with a span configuration of 75+140x3+75m. Its piers height varies from 8 to 64m. Lastly, the Puerto Salgar Bridge is located on an intermediate seismic hazard zone, as the Flandes Bridge. It is a 3 span brige with a 180 m main span.

PALABRAS CLAVE: Voladizos sucesivos, puentes, ingeniería de diseño y construcción, diseño sísmico. KEYWORDS: Balanced cantilever, bridges, design and build engineering, seismic design.

# 1. Introducción

En el año 2012 se puso en marcha un proyecto actualización ampliación infraestructura vial de Colombia, con la cual el gobierno buscaba por medio de concesiones de Asociación Publico Privadas (APP) conectar el

país de norte a sur y de oriente a occidente, duplicando el número de vías en doble calzada

Pedelta ha participado en el diseño y asistencia a la construcción en obra de diversas estructuras que hacen parte de los corredores viales en desarrollo, entre ellos 3 puentes en voladizos sucesivos, presentados en la Figura 1, los cuales se encuentran en servicio en el caso de Flandes (1-a) y Puerto Salgar (1-b).





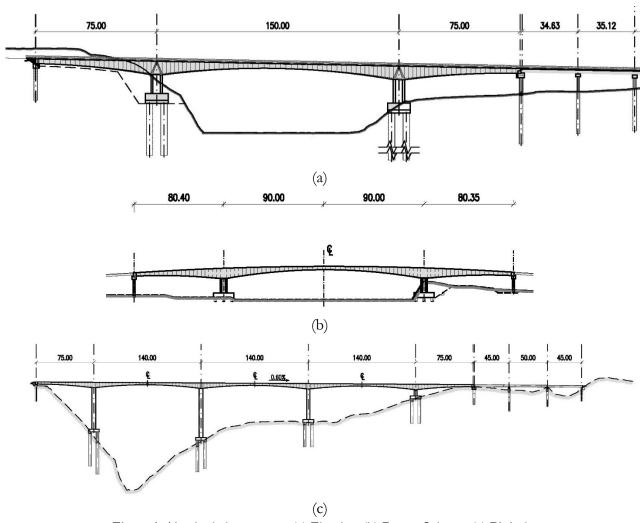


Figura 1. Alzado de los puentes (a) Flandes, (b) Puerto Salgar y (c) Pipiral

El puente de Flandes (Figura 1-a) se encuentra conformado por 6 vanos con una longitud total de 406.7 m. El puente de acceso tiene tres vanos de 34.63 m – 35.12 m – 34.71 m, y fue resuelto por medio de una losa de hormigón armado apoyada sobre vigas I postensadas y ejecutadas en el lugar. Los 3 vanos restantes corresponden al puente en voladizos sucesivos, con vanos de 75 m – 150 m – 75 m.

La infraestructura del puente se encuentra formada por dos pilas centrales de 11.5 m y 14.4 m de altura, las cuales se diseñaron con pantallas desdobladas para flexibilizar la estructura en sentido longitudinal (Ver Figura 4), éstas se encuentran empotradas en el tablero, el espesor es de 1.2 m en el apoyo 1 y 1.45 m en el apoyo 2, esto con el fin de compensar la diferencia de rigidez de las pilas debida a la diferencia de altura y así mejorar el comportamiento del puente frente a sismo y

deformaciones impuestas. Durante la etapa de construcción del tablero estas se comportan como una ménsula en voladizo.

Las pantallas se encuentran apoyadas sobre cimentaciones profundas. Los encepados tienen dimensiones de 5.75 m de longitud y 17 m de ancho en el caso de la pila 1 y 17 m por 30.5 m en la pila 2. Para la pila 1 se emplearon 6 pilotes excavados manualmente de 20 m de longitud. En cuanto a la pila 2, fue necesario emplear 9 pilotes pre-excavados adicionales de 30 m de longitud, esto, debido a que durante la excavación de los pilotes, el nivel freático impidió alcanzar la profundidad de diseño en algunos de ellos, llegando hasta 15 m solamente.

El puente de Puerto Salgar (Figura 1-b) se encuentra ubicado en el mismo corredor vial que el puente de Flandes. Éste, se encuentra conformado por dos accesos. En el acceso derecho 6 vanos, 5 de 40 m y 1 de 30 m de longitud y en el izquierdo 4 vanos de 40 m de longitud.

El puente en voladizos sucesivos tiene 3 vanos de 80 m - 180 m - 80 m. El tablero de la estructura tiene un ancho de 11.7 m donde se alojan 2 carriles de 3.65 m, 2 bermas de 1.8 m y 2 barreras tipo New Jersey de 0.4 m de ancho en su base.

Los accesos fueron resueltos por medio de losas de hormigón armado sobre 3 vigas postensadas, apoyadas sobre estribos y cargaderos convencionales con pilas – pilote de 2 fustes.

El puente principal, se apoya sobre dos pilas intermedias compuestas por pantallas desdobladas de 13 m de alto, 1.4 m de espesor y 6.1 m de ancho conectadas monolíticamente al tablero, como se ve en la Figura 2. Éstas, se cimentan sobre encepados de 4.5 m de espesor y 18.2 m de lado, con 8 pilotes de 2.5 m de diámetro, 60 m de profundidad en la pila 1 y 35 m en la pila 2.



Figura 2. Pilas del puente Puerto Salgar

Por último, el puente Pipiral (Figura 1-c), está compuesto por un acceso de 4 vanos de 45 m – 45 m – 50 m – 45 m de longitud, cuya sección transversal es de viga cajón de canto constante. El puente principal tiene 5 vanos de 75 m – 140 m x 3 – 75 m de longitud. El tablero es de sección cajón monocelular de canto variable, con 4 pilas intermedias de sección rectangular hueca y altura variable entre 64 m y 8 m (Ver Figura 3).



Figura 3. Vista del puente Pipiral durante la construcción

Tabla 1. Características geométricas de los puentes

Puente	Longitud vanos		Altura dovela		$Hd_{sp}$	Ancho inferior dovela		Longitud	Espesor Dsp***	
	Ext.	Int.	$SP^*$	$CL^{**}$	$Hd_{cl}$	$SP^*$	CL**	voladizo	alma	LS-
Flandes	75	150	8.4	3	2.8	9.3	11.9	3.76	0.60	0.40
Pto. Salgar	80	180	9.2	3	3.1	6.1	6.1	2.80	0.45	0.50
Pipiral	75	140	7	2.8	2.5	6	6.0	1.75	0.40	0.50

Todas las unidades se encuentran en metros [m]

El trazado del puente es curvo en planta, encontrándose el eje del tablero 1.25 m desplazado con respecto al eje del trazado. Éste tiene 11.5 m de ancho y se divide en dos carriles de 3.65 m, una berma de 0.5 m y otra de 1.8 m, 2 barreras de 0.35 m y un andén de 1.2 m.

Las pilas se apoyan en encepados de 16.4 m por 14 m con 4 pilotes huecos de 3.2 m de diámetro. En la pila 1, dos pilotes alcanzan 45 m de profundidad y los otros 55 m. En la pila 2, dos alcanzan 41 m y los otros 37 m. En las pilas 3 y 4 todos los pilotes tienen la misma longitud de 32 m.



Figura 4. Pila 1 del puente Flandes

En cuanto al acceso del puente, la viga se encuentra directamente apoyada en la viga de atado, la cual se cimenta sobre dos pilotes de 2 m de diámetro.

Las características ya mencionadas y otras dimensiones de interés de las estructuras se presentan en la Tabla 1.

## 1.1. Ubicación y amenaza sísmica

Colombia se encuentra ubicada en una zona caracterizada por una alta amenaza sísmica. Cerca del 80% de la población habita en la región Andina donde el riesgo sísmico se clasifica como intermedio o alto [2]. Asimismo, las vías que conectan los principales centros industriales, políticos y financieros se encuentran ubicadas en su mayoría en esta región.

El puente Flandes se encuentra ubicado en el departamento del Tolima en la región andina del país (región central). En este sector la amenaza sísmica se caracteriza como intermedia. El puente Puerto Salgar, ubicado sobre el mismo corredor vial que el puente Flandes, también se encuentra en una zona de amenaza intermedia. Por otra parte, el puente Pipiral se encuentra en el departamento del Meta, sobre la cordillera oriental de la cordillera de los Andes, donde la amenaza sísmica es alta.

Tomando como base la metodología del *Código Colombiano de diseño sísmico de puentes* (CCP-14) [3], el cual es compatible con el *AASHTO LRFD Bridge Design Specification* [4], se construyó el espectro de diseño de los puentes con 5% de amortiguamiento, que se presenta en la Figura 5.

<sup>\*</sup>SP: sobre pila – \*\*CL: centro de luz – \*\*\*Dsp: dovela sobre pila – \*LS: Losa superior

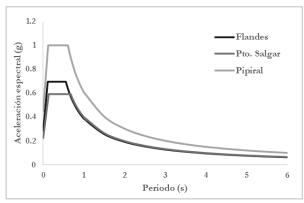


Figura 5. Espectro de diseño de los puentes

# 1.2. Normas empleadas en el diseño

El diseño de las estructuras se realizó considerando las normas presentadas a continuación [3 - 7].

- Código Colombiano de diseño sísmico de Puentes 2014 [3].
- AASHTO LRFD Bridge Design Specifications [4].
- AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications [5].
- Bridge Design Practice Manual State of California – Department of Transportation CALTRANS [6].
- ANSI American Standard Institute
- ASCE American Society of Civil Engineers
- ASTM American Society of Testing Materials
- AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design (únicamente aplica al caso del Puente Flandes) [7].

## 2. Diseño de las estructuras

El diseño de los puentes se realizó tomando como base el *Código Colombiano de diseño sísmico de Puentes 2014* CCP-14 [3], sin embargo, el diseño del puente de Flandes se realizó empleando el procedimiento basado en desplazamientos, empleando el *AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design* [7]. Tanto los puentes de Puerto Salgar como Pipiral se diseñaron de forma tradicional, utilizando el diseño por

fuerzas recogido en el Código Colombiano de diseño sísmico de Puentes 2014 CCP-14 [3].

En cada uno de los casos se diseñó cada puente de acuerdo a los requerimientos específicos de cada proyecto. Para el diseño del puente de Flandes, inicialmente se planteó diseñar dos estructuras paralelas que albergaran 2 carriles cada una teniendo en cuenta la disponibilidad en el mercado de los carros de avance de menor capacidad. Sin embargo, los requerimientos de tiempo de ejecución del proyecto hicieron decantar al diseño hacia un puente con un único tablero que albergase todos los carriles de ambos sentidos (Ver Figura 6).

Para aplicar la metodología de diseño indicada en la AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design, se clasificó el puente de acuerdo a la aceleración espectral correspondiente al periodo de un segundo (T=1segundo).



Figura 6. Carro de avance para doble calzada empleado en el puente de Flandes

Como se puede observar en la Figura 5, en el espectro correspondiente al puente Flandes este valor corresponde a 0.39. Para este valor la estructura se clasifica como SDC C [7]. A partir de esta clasificación se siguieron los siguientes pasos en el diseño sísmico del puente:

- 1. Identificación del sistema de resistencia sísmica (ERS).
- 2. Análisis de demanda capacidad de desplazamientos.

- Verificación implícita de desplazamientos, efectos P-delta (P-Δ) y longitud mínima de apoyos.
- 4. Diseño de elementos protegidos por capacidad (cimentaciones, diseño a cortante y torsión, etc.).
- 5. Nivel detallado de acuerdo a la categoría de comportamiento sísmico
- 6. Evaluación de los efectos de licuefacción del suelo, cuando se requiera.

Los tres puentes fueron modelados empleando el software RM PROFESSIONAL V8i y ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS PROFESSIONAL 2014. Esto ha permitido considerar los efectos reológicos en el hormigón y la relajación del acero así como el proceso constructivo completo paso a paso.

Se realizaron los siguientes análisis a partir de los modelos de análisis estructural:

- Análisis estático de la estructura teniendo en cuenta el esquema constructivo previamente definido. Donde se contempla la suma de esfuerzos de cada etapa del proceso constructivo, el postensado de construcción, la activación del pretensado longitudinal y los efectos reológicos del hormigón y del acero de pretensado.
- Análisis dinámico espectral multimodal empleando el espectro sísmico correspondiente.
- Análisis sísmico del puente completo a tiempo infinito.
- Análisis sísmico de la estructura en construcción.

En cuanto al diseño especifico de cada estructura, en los proyectos Flandes y Puerto Salgar, dada la altura de las pilas, inferior a 15 m, el diseño de las pilas se realizó empleando pantallas desdobladas con el fin de disminuir la rigidez de la estructura y, por tanto, la demanda sísmica. Para el puente Pipiral en las pilas cortas se colocaron dispositivos sísmicos (aisladores) elastoméricos con núcleo de plomo que buscaban compatibilizar los desplazamientos del

tablero en sentido longitudinal y transversal con los obtenidos para las pilas de mayor altura.

Para el diseño de los puentes Pipiral y Puerto Salgar, se diseñaron las pilas como parte del Sistema de Resistencia Sísmica (SRS). En el primero caso, se empleó un factor de modificación de la respuesta R para las pilas de 2 excepto en las pilas aisladas donde se utilizó un R igual 1.0. El puente Puerto Salgar, se clasificó como "puente esencial" de acuerdo con el CCP-14 [3], por esta razón, se empleó un factor R de 3.5 para las pilas en el sentido longitudinal de la estructura con el fin de garantizar un comportamiento dúctil adecuado y un factor R de 2 en el sentido transversal dada la relación entre ancho de fuste (6.1 m) y altura de las pilas (13 m).



Figura 7. Dado aéreo pila 2 del puente Pipiral

La topografía y el trazado del puente Pipiral fueron factores determinantes en el diseño de la estructura. La pendiente elevada del terreno, especialmente en el margen derecho del puente, obligó a construir encepados aéreos (Ver Figura 7), dejando exentos entre 17 m y 8.25 m los pilotes al borde de la ladera en las pilas 1 y 2 respectivamente (Ver Figura 8). Adicionalmente, la diferencia de altura de las pilas, producto de la pendiente del terreno, obligó a aislar la pila 4, cuya altura es de 8 m. Para reducir los esfuerzos sísmicos en esta pila se emplearon dos aisladores elastoméricos reforzados con núcleo de plomo (LRB) de 1.22 m de diámetro y núcleo de 0.45 m de diámetro.



Figura 8. Construcción de los pilotes de la pila 1 del puente Pipiral

## 3. Proceso constructivo

La construcción de las dovelas de los puentes se llevó a cabo en ciclos de construcción de 7 días en promedio. En la Figura 9 se muestra el puente en construcción. Cada ciclo incluía las siguientes operaciones:

- 1. Colocación del carro de avance en posición de acuerdo con la contraflecha evaluada.
- 2. Colocación de la armadura activa y pasiva.
- 3. Hormigonado.
- 4. Tesado de los monotorones longitudinales y transversales (en el caso del puente Flandes) una vez se ha alcanzado la resistencia de diseño para postesar.
- 5. Desplazamiento del carro hasta la nueva posición para iniciar el ciclo con la dovela siguiente.



Figura 9. Construcción del puente Pipiral

Una vez se ha cerrado la estructura se realiza el postensado de continuidad y se procede a la construcción de barandillas, barreras, andenes, pavimento e instalaciones. Por último, se realiza la prueba de carga.



Figura 10. Construcción del encepado de la pila 1 del puente de Flandes. Fuente: Pavimentos Colombia

El puente de Flandes se encuentra ubicado en un sector donde la temperatura ambiente asciende a más de 35°C. Los encepados diseñados tienen dimensiones de 17 m de lado y 5.5 m de espesor. Estas dimensiones obligaron a tratar el elemento como masivo, por lo tanto, se controló la temperatura de la mezcla empleando hielo como parte del agua de amasado. También se realizó el hormigonado en tres etapas de 1.4 m, 2.35 m y 2 m de espesor, respectivamente, aspecto que se consideró en el diseño a rasante del encepado en estas juntas (Ver Figura 10).

En el caso de Puerto Salgar, presentado en la Figura 11, fue necesario prever modificaciones en el proceso de construcción dado que la luz lateral es 10 m inferior a la semi luz, y por lo tanto máximo voladizo, del vano central, produciéndose en construcción situaciones de voladizos descompensados.

Para compensar la diferencia de peso durante la construcción de las dovelas de cierre, se llevaron a cabo de forma simultánea la construcción de las dovelas hasta alcanzar la dovela sobre estribo. En esta fase, una vez tesados los cables de continuidad en el vano lateral, se instalaron los apoyos en los estribos y las barras de anclaje vertical a estribo. Posteriormente se procedió al cierre en el vano central de la estructura. Las barras se diseñaron para evitar el levantamiento de la estructura en servicio, construcción y evento extremo (sismo).



Figura 11. Puente Puerto Salgar

#### 4. Cantidades

El volumen total de hormigón en el puente Flandes, fue de 11 083 m³ para el tramo construido en voladizos sucesivos, según se presente en la Figura 12, de los cuales el 58.1% corresponde al tablero, para la cual se requirieron 243 893 kg de acero de pretensado longitudinal y 28 744 kg para pretensado transversal. Adicionalmente la cuantía de hormigón por metro cuadrado de tablero fue 0.94 m³/m².

En el caso del puente Puerto Salgar el volumen total de hormigón fue de 10 671 m³, de los cuales el 39.3% corresponde al tablero. En

este caso, donde solo fue necesario emplear pretensado longitudinal pero no transversal, se emplearon 163 578 kg de pretensado y 538 610 kg de acero pasivo en el tablero, lo que representa una cuantía de la cuantía de hormigón por metro cuadrado de tablero de 1.05 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.

Finalmente, en el caso del puente Pipiral se emplearon 6710 m³ de hormigón en la construcción del tablero, lo que representa el 46.3% del hormigón total empleado. En este caso el hormigón utilizado en las pilas, dado su número y longitud, alcanzan el 28.2% del total, mientras que en los otros dos puentes únicamente el 8.5% y 1.5% del hormigón total empleado para los puentes de Flandes y Puerto Salgar, corresponde a hormigón en pilas.

Para la construcción de la superestructura del puente Pipiral se emplearon 2 133 813 kg de acero en total, de los cuales 797 698 kg, corresponden a armadura y 273 125 kg a pretensado de tablero. En la Tabla 2, se presenta un resumen de las cantidades correspondientes a cada estructura.



Figura 12. Puente Flandes

Tabla 2. Cantidades asociadas a los tramos de puente en voladizos sucesivos

F1		FLAN	NDES	PUERTO SALGAR			PIPIRAL		
Elemento	$Vc^*$	$Ws^{**}$	Cuantía	$Vc^*$	$Ws^{**}$	Cuantía	$Vc^*$	$Ws^{**}$	Cuantía
Tablero	644 3	757266	$0.94 \text{ m}^3/\text{m}^2$	4189	538610	$1.05 \text{ m}^3/\text{m}^2$	6710	797698	$1.05 \text{ m}^3/\text{m}^2$
Pretensado longitudinal	-	243893	$35.66 \text{ kg/m}^2$	-	1622.8 3578	$41.00~\mathrm{kg/m^2}$	-	273125	42.42 kg/m <sup>2</sup>
Pretensado transversal	-	28744	$4.21~\mathrm{kg/m^2}$	-	-	-	-	-	-
Pilas/Pantallas (incluye encepados)	939	344371	366.91 kg/m³	1639	229242	139.85 kg/m³	4090	572752	140.03 kg/m³
Estribol	260	21500	82.60 kg/m <sup>3</sup>	308	39238	127.6 kg/m³	250	25920	103.68 kg/m³
Pilotes excavados a mano (pilas)	198 6	411722	$207.30 \text{ kg/m}^3$	-	-	-	3110	419874	$135 \text{ kg/m}^3$
Pilotes (pilas)	117 8	211060	$179.15 \text{ kg/m}^3$	3927	687223	$175 \text{ kg/m}^3$	-	-	-
Pilotes excavados a mano/Pilotes (Estribol)	277	40218	145.14 kg/m <sup>3</sup>	608	76027	125 kg/m³	322	44444	138.03 kg/m³

<sup>\*</sup>Vc: volumen de hormigón [m³]

### 5. Conclusiones

A partir de los proyectos realizados, ha sido posible optimizar cada vez más los diseños de puentes en voladizos sucesivos en Colombia, disminuyendo las dimensiones de las secciones transversales de las vigas. Esto también ha sido influenciado por el aumento en la comercialización de hormigones de mayor resistencia en el país.

La optimización de las dimensiones y peso del tablero, ha permitido al mismo tiempo optimizar las dimensiones de la subestructura. El uso de hormigones de mayor resistencia ha permitido una disminución de hasta el 10% en el peso del tablero, con un efecto de reducción de las dimensiones necesarias de la subestructura.

Adicionalmente, se han implementado de nuevas estrategias y esquemas resistentes para el diseño sísmico con el fin de sortear las imposiciones sísmicas de la región. Un ejemplo es el diseño de puentes aislados sísmicamente

<sup>\*\*</sup>Ws: peso del acero de armar [kg]

mediante dispositivos antisísmicos como son los apoyos con núcleo de plomo.

Asimismo, se ha realizado el diseño combinando el diseño en base a factores de reducción de fuerzas con comprobaciones según diseño basado en demanda de desplazamientos en el puente Flandes.

## Agradecimientos

Se presenta especial agradecimiento a las concesiones viales a las cuales pertenece cada uno de los puentes expuestos en este artículo, en el caso de los puentes Flandes y Puerto Salgar a la Concesión Alto del Magdalena, en el caso del puente Pipiral a la Concesionaria Vial Andina.

También a las empresas constructoras, Pavimentos Colombia, encargada de la construcción del puente Flandes, a MHC y MECO, en el caso del puente Puerto Salgar y por último, a CIVILIA quien construyó el puente Pipiral.

## Referencias

- [1] Semana. (2018 de abril de 2018). Vías: cambio extremo para Colombia. Obtenido de Semana:
  - https://www.semana.com/nacion/articulo/programa-cuarta-generacion-4g-cumple-seis-anos/578207
- [2] Oviendo, J. A., & M, D. (14 de septiembre de 2009). SITUACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE CONTROL DE RESPUESTA SÍSMICA EN COLOMBIA. EIA, 113-124. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script =sci\_arttext&pid=S1794-2372009000200009&lng=en&tlng=es
- [3] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2014). Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP 14. Bogotá D.C.
- [4] AASTHO. (2010). AASTHO LRFD Bridge Design Specifications. Washington DC.

- [5] AASHTO. (2004). ASSHTO LRFD Bridge Construction Specifications 2nd edition. Washington DC.
- [6] Caltrans. (2015). Bridge Design Practice 4th edition.
- [7] AASHTO. (2009). AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design. Washington DC.