

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

Daniel Esteban Rodríguez Torres, Jhon Anderson Urrea Velandia

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil

Director

José Miguel Benjumea Royero

PhD. en Ingeniería Civil y Ambiental

Codirector

Cesar Mauricio Santos Durán

M. Sc. en Ingeniería Estructural

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2020

Agradecimientos

ANDERSON

Le agradezco a Dios, el cimiento de mi vida, quien me ha dado la sabiduría y la fortaleza para cumplir esta meta, y me ha demostrado su amor cada día.

Le agradezco a mi padre Rubén Jairo Urrea Millán, por ser el mejor ejemplo que he tenido en mi vida y por demostrar su amor por mí.

Le agradezco a mi madre Mary Luz Velandia Niño, por todo el cariño que me ha dado, y por esforzarse siempre para sacarnos adelante.

Le agradezco a mi hermano Erith, por cada consejo brindado y por darme ejemplo de perseverancia y demostrarme que el esfuerzo lleva consigo frutos.

Le agradezco a mi hermano Yeferson por el apoyo brindado en este tiempo.

Le agradezco a cada amigo que me acompañó en este camino, en especial quienes me animaron en los momentos difíciles.

Le agradezco al profesor José Benjumea y al ingeniero Cesar Santos por brindarnos el apoyo, el conocimiento y la orientación necesaria para llevar a cabo este proyecto de grado.

También le agradezco a cada profesor que me impartió conocimiento y me ayudó en mi formación integral como Ingeniero Civil.

DANIEL

En primer lugar, le doy gracias a Dios por su guía y presencia en cada momento en el desarrollo del pregrado en Ingeniería Civil. En segundo lugar, agradezco especialmente a mis padres porque han sido mi guía en todos estos años de preparación académica. A su vez, le doy gracias a mi hermana por su amor en medio de la distancia.

Le agradezco al profesor José Miguel Benjumea y al ingeniero Cesar Santos Durán por su guía en el desarrollo de este trabajo de grado. A si también le doy gracias a todos aquellos que fueron mis profesores y también a la Escuela de Ingeniería Civil por sus enseñanzas que han permitido la orientación en mi vida como profesional.

Agradezco también a mis amigos del ministerio King's Kids Bucaramanga por sus palabras de ánimo en tiempos difíciles.

Contenido

Introducción	12
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo General	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Alcance	17
2.1 Alcance para cada tipología	17
2.2 Alcance en el análisis estructural	17
3. Marco Teórico.....	19
3.1 Concreto Presforzado.....	19
3.2 Juntas.....	19
3.3 Apoyos	20
3.4 Sistemas de losas de conexión flexibles	20
3.5 Puentes Integrales	21
3.6 Conexión Integral en elementos prefabricados.....	21
3.7 Modelo estructural	22
3.8 Carga Viva vehicular de diseño en puentes según el CCP – 14	22
4. Constructibilidad de cada tipología	23
4.1 Constructibilidad de puentes TIP-1	23
4.2 Constructibilidad de puentes TIP-2.....	24
4.2.1 Proyecto nuevo de puentes TIP-2	24
4.2.2 Cambio de esquema de TIP-1 a TIP-2	27

4.3 Constructibilidad de puentes TIP-3.....	28
4.3.1 Proyecto nuevo de puentes TIP-3	28
4.3.2 Cambio de esquema de TIP-1 a TIP-3	30
4.4 Constructibilidad de puentes TIP-4	33
5. Descripción del caso de estudio.....	35
5.1 Geometría del puente en estudio.....	35
5.2 Propiedades mecánicas de los materiales	37
5.3 Evaluación de cargas y análisis estructural.....	37
5.3.1 Cargas y combinaciones de cargas	37
5.3.2 Modelado Estructural.....	40
6. Comparación de la respuesta estructural.....	45
6.1 Reacciones verticales	46
6.2 Análisis de la superestructura	47
6.2.1 Fuerzas internas en las vigas.....	47
6.2.2 Deflexión instantánea en vigas	52
6.2.3 Respuesta Modal.....	54
6.2.4 Respuesta sísmica en columnas	57
7. Conclusiones	60
8. Recomendaciones	62
Referencias Bibliográficas	63
Apéndices.....	67

Lista de Tablas

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los materiales.	37
Tabla 2. Cargas gravitacionales.	38
Tabla 3. Etapas constructivas de la TIP-1.	42
Tabla 4. Reacciones verticales de los apoyos de la estructura bajo cargas muertas, vivas y combinación de resistencia.	46
Tabla 5. Fuerza cortante longitudinal máxima en las vigas exteriores bajo cargas muertas, vivas y Resistencia I.	47
Tabla 6. Momentos máximos en las vigas exteriores bajo cargas muertas, vivas y Resistencia I.	49
Tabla 7. Deflexiones instantáneas de las vigas exteriores, bajo cargas muertas, vivas y Servicio I.	53
Tabla 8. Respuesta modal de cada tipología.	55
Tabla 9. Respuesta estructural de las columnas bajo la combinación de Evento Extremo 1.	58

Lista de Figuras

Figura 1. Esquemas estructurales típicos en función de la conexión entre la superestructura y el apoyo intermedio en puentes viga-losa.....	13
Figura 2. Junta de elastómero armado.	24
Figura 3. Losa de conexión flexible.....	26
Figura 4. Detalle de reparación.....	28
Figura 5. Detalle de diafragma intermedio.	29
Figura 6. Etapas de reparación de un puente simplemente apoyado.	31
Figura 7. Detalle de conexión integral.....	34
Figura 8. Sección transversal del puente (dimensiones en metros).	36
Figura 9. Sección longitudinal del puente (dimensiones en metros)	36
Figura 10. Espectro de diseño para Bucaramanga con un suelo tipo D.....	39
Figura 11. Modelo computacional extruido del puente TIP-1 desarrollado en MIDAS Civil.	40
Figura 12 . Detalle de conexión entre la superestructura y las vigas.....	41
Figura 13. Etapa 4 de construcción en la TIP-3 (tablero no mostrado).....	43
Figura 14. Detalle de los elementos que simularon la conexión integral en el modelo de la TIP-4.	44
Figura 15. Etapa 4 de construcción en la TIP-4 (tablero no mostrado).....	45
Figura 16. Diagrama de la fuerza cortante envolvente de las vigas exteriores bajo la combinación de Resistencia I.	49
Figura 17. Diagrama de momento envolvente de las vigas exteriores bajo la combinación DC+DW	51

Figura 18. Diagrama de momento envolvente de las vigas exteriores bajo la combinación Resistencia I.....	52
Figura 19. Deflexión instantánea en las vigas exteriores bajo la combinación Servicio I.....	54
Figura 20. Modos de vibración (M) Tran X, Tran Y & Rotn Z.....	56

Lista de Apéndices

Apéndice A. Primera tipología. 67

Resumen

Título: 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*

Autor: Daniel Esteban Rodríguez Torres, Jhon Anderson Urrea Velandia**

Palabras Clave: Puentes viga-losa, simplemente apoyado, tablero continuo, vigas continuas, puente semi-integral, junta de dilatación, diafragma, conexión integral

Descripción:

El presente estudio tiene como objetivo determinar la incidencia debida a las variaciones de continuidad y conexión entre la superestructura y el apoyo intermedio, en la constructibilidad y el comportamiento estructural de un puente viga-losa en concreto presforzado de dos vanos iguales, para esto se compararon cuatro tipologías de puentes; (1) con superestructura simplemente apoyada con su tablero interrumpido por juntas de dilatación, (2) con tablero continuo sobre vigas simplemente apoyadas, (3) con superestructura continua y, (4) con conexión integral entre la superestructura y los apoyos intermedios. Se exponen los procesos constructivos para generar la continuidad y conexión propia de cada tipología, ya sea para un proyecto nuevo o una reparación. Además, se desarrollaron modelos computacionales mediante el programa Midas Civil, comparando la respuesta estructural de las cuatro tipologías bajo cargas muertas, cargas vivas y fuerza sísmica, tomando como referencia la primera tipología.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: José Miguel Benjumea Royero. Doctor en Ingeniería Civil y Ambiental. Codirector: Cesar Mauricio Santos Durán. Magíster en Ingeniería Estructural.

Abstract

Title: Comparison of the structural behavior and the constructability of a beam-slab bridge with two spans depending on the type of continuity and connection between the superstructure and the intermediate support *

Author: Daniel Esteban Rodríguez Torres, Jhon Anderson Urrea Velandia **

Key Words: Beam-slab bridges, simply supported, continuous deck, continuous beams, semi-integral bridge, expansion joint, diaphragm, integral connection.

Description:

The present study aims to determine the incidence due to variations in continuity and connection between the superstructure and the intermediate bearing, in the constructability and structural behavior of a beam-slab bridge in prestressed concrete with two equal spans, for this they were compared four types of bridges; (1) with a superstructure simply supported with its deck interrupted by expansion joints, (2) with a continuous deck on simply supported beams, (3) with a continuous superstructure, and (4) with an integral connection between the superstructure and the intermediate supports. The construction processes are exposed to generate the continuity and proper connection of each typology, whether for a new project or a repair. In addition, computational models were developed using the Midas Civil program, comparing the structural response of the four typologies under dead loads, live loads and seismic force, taking the first typology as a reference.

* Thesis

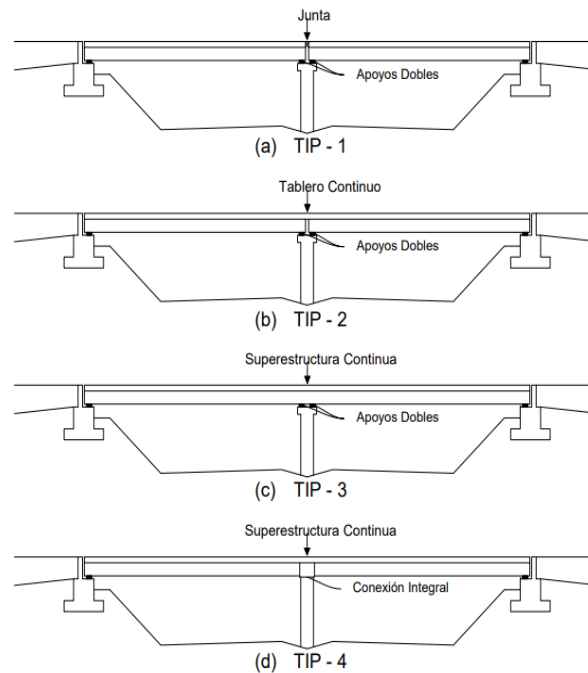
** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: José Miguel Benjumea Royero. Doctor en Ingeniería Civil y Ambiental. Codirector: Cesar Mauricio Santos Durán. Magíster en Ingeniería Estructural.

Introducción

Los puentes viga-losa de concreto reforzado o presforzado, son una alternativa frecuentemente empleada para la construcción de infraestructura vial en Colombia. Por ejemplo, el 91% de los puentes de concreto de la red nacional presentaban este tipo de sección hasta el 2001 (Yamin & Ruiz, 2001), mientras que, en el 2004, el 63% y el 24% de los puentes habían sido construidos en concreto reforzado y presforzado, respectivamente (Muñoz & Valbuena, 2007). La mayoría de este tipo de puentes son simplemente apoyados y presentan juntas de dilatación en cada apoyo como se visualiza en la Figura 1a (referidos como TIP-1 en este documento). Por otra parte, los resultados de las inspecciones realizadas a la red nacional en el 2005 mostraron que el 41% de estos dispositivos presentaban daños y por consiguiente infiltración de residuos (Muñoz et al., 2005), afectando a los elementos adyacentes tales como apoyos, estribos y pilas, y generando sobrecostos por mantenimiento.

Figura 1.

Esquemas estructurales típicos en función de la conexión entre la superestructura y el apoyo intermedio en puentes viga-losa.



Los problemas presentados por las juntas se pueden solucionar cambiando el tipo de conexión entre la superestructura y la subestructura (soporte o pórtico intermedio) desde la tipología TIP-1 a las opciones mostradas en las Fig.1 (b) a (d). En la primera opción (TIP-2, Figura. 1b) se logra la continuidad del tablero en la zona de los apoyos intermedios manteniendo las vigas simplemente apoyadas (El-Safy & Okeil, 2008). La segunda (TIP-3, Figura. 1c) es usada cuando se requiera un comportamiento monolítico de toda la superestructura y consiste en obtener la continuidad de las vigas y del tablero mediante un diafragma intermedio entre las vigas o usando sistemas de postensado. La tercera opción (TIP-4, Figura. 1d) se basa en una conexión integral directa entre la superestructura y los apoyos intermedios eliminando así los apoyos y las juntas,

aumentando la durabilidad y redundancia del sistema (Villalobos, 2017). Este tipo de puentes es conocido como puentes semi-integrales.

A fin de conocer la incidencia que genera las variaciones de continuidad y conexión entre la superestructura y el pórtico intermedio en la constructibilidad y el comportamiento estructural de un puente viga-losa simplemente apoyado, el presente documento expone aspectos generales de construcción y diseño de los cuatro tipos de puentes mencionados, así como ejemplos de cambio de esquema estructural de un tipo a otro (ej., de TIP-1 a TIP-2 o TIP-3). Además, se presentan los cambios en la respuesta estructural de la superestructura y subestructura (pórtico) de las cuatro tipologías, tomando como referencia un puente viga-losa simplemente apoyado de dos vanos iguales. Este análisis se realizó mediante un modelo computacional, desarrollado en el programa Midas Civil (MIDAS Information Technology Co. Ltd, 2016) el cual fue modificado.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Determinar el efecto en el comportamiento estructural bajo cargas gravitacionales, sísmicas y en la constructibilidad de un puente viga-losa de dos vanos con vigas prefabricadas simplemente apoyadas (tipología 1), al cambiar el tipo de continuidad y conexión entre la superestructura y el apoyo intermedio a: (ii) superestructura con tablero continuo para momento negativo simplemente apoyada, (iii) superestructura continua sobre apoyos de neopreno y (iv) superestructura continua conectada monolíticamente al apoyo intermedio.

1.2 Objetivos Específicos

Determinar, mediante revisión literaria, los procedimientos constructivos requeridos para construir cada una de las cuatro tipologías o para modificar el tipo de continuidad y conexión entre la superestructura y el apoyo intermedio de un puente existente simplemente apoyado (tipología 1) a las otras tres tipologías.

Plantear enfoques de modelamiento para el puente en estudio que permitan simular la variación en la continuidad y la conexión entre la superestructura y el apoyo intermedio con base en un puente existente simplemente apoyado con juntas de dilatación (tipología 1).

Comparar la respuesta estructural de los elementos de la superestructura y la subestructura de las cuatro tipologías de puentes, para cargas permanentes, de tráfico, y sísmicas. (Representan

las pequeñas metas que deben ser alcanzadas para lograr el objetivo general, deben relacionar productos específicos de los resultados esperados, considerando recursos y tiempo horizonte. Deben ser alcanzables y medibles. Para su formulación se deben identificar problemas macro y específicos, así, no deben relacionar los efectos e impactos del proyecto, los cuales se encuentran fuera de control por parte del autor, la redacción debe comenzar usando un verbo en infinitivo)

2. Alcance

2.1 Alcance para cada tipología

- 1ª tipología: Superestructura no continua, apoyada sobre apoyos de neopreno en el apoyo intermedio y tablero interrumpido por una junta de dilatación.

La primera tipología para estudiar será un puente existente, las demás tipologías serán variantes de este puente y difieren a la primera tipología en:

- 2ª tipología: Superestructura con tablero continuo para momento negativo, apoyada sobre apoyos de neopreno en el apoyo intermedio, donde se sustituirá la junta de dilatación por una losa de conexión flexible.

- 3ª tipología: Superestructura continua (tablero continuo y vigas conectadas monolíticamente mediante un diafragma), soportada en apoyos de neopreno en el apoyo intermedio.

- 4ª tipología: Superestructura continua (tablero continuo y vigas conectadas monolíticamente mediante un diafragma). Conexión integral entre la superestructura y el pórtico intermedio.

El material para utilizar es concreto postensado prefabricado para las vigas de la superestructura, y concreto reforzado para el resto de la estructura.

2.2 Alcance en el análisis estructural

- Se estudiará el comportamiento de las estructuras en el rango lineal elástico.

- El modelado se realizará usando el software MIDAS –CIVIL idealizando la estructura mediante elementos tipo barra o cascarones según sea necesario para cada elemento estructural.
- Los estudios topográficos, hidráulicos, geotécnicos, de viento, y los demás estudios previos serán tomados de los planos y la información de un puente existente, que se seleccionará como se describe en la Sec 5.3 de la metodología. En caso tal de que no tener alguna información se asumirán datos ideales, sin tomar valores extremos.
- Se realizará el análisis sísmico según el espectro de aceleraciones de diseño descrito en el CCP-14, bajo los coeficientes de aceleración y zona de amenaza sísmica correspondiente a la ubicación del puente.

3. Marco Teórico

3.1 Concreto Presforzado

El concreto presforzado consiste en inducir esfuerzos permanentes en un elemento estructural para mejorar su comportamiento de servicio mediante un mejor control de agrietamiento y deflexión, como también aumentar su resistencia, de tal forma que se producen esfuerzos y deformaciones que contrarresten total o parcialmente a los producidos por las cargas gravitacionales (Cabañas, 2008). Se puede clasificar según el momento en el cual se induce el presfuerzo, en pretensado y postensado. En el pretensado los torones son tensados antes del vaciado de concreto, generalmente este proceso se realiza en un banco de prefabricación, luego del fraguado los torones se liberan lentamente transmitiendo su fuerza al concreto por adherencia. En el postensado una vez que esté fraguado el concreto se tensionan los cables, además, este método puede ser utilizado en estructuras vaciadas in situ o prefabricadas (Concreto, 2013).

3.2 Juntas

Las juntas son dispositivos deformables, capaces de asegurar el tránsito de los vehículos a través de las zonas de discontinuidad de los enlaces entre los distintos tramos estructurales de un puente o entre estos y los muretes de guarda de los estribos, bajo cualquier sollicitación contemplada y en condiciones de seguridad, comodidad, y durabilidad (Fomento, 2003). El objetivo primario de estos elementos es permitir el movimiento de expansión y contracción de la superestructura; debido, principalmente, al efecto de los cambios de temperatura. Como también resistir los movimientos debidos a la contracción por el secado del concreto, deformación elástica

y la fluencia debidos al presfuerzo, y movimientos de rotación inducidos por la flexión las vigas longitudinales (De la Cruz, 2005).

3.3 Apoyos

En términos generales los aparatos de apoyos son encargados de soportar y transmitir a la subestructura las cargas que solicitan la superestructura, asimismo según la tipología de la estructura los apoyos deben permitir determinados movimientos e impedir otros (Ministerio de Obras Públicas, 1995). Los apoyos pueden ser fijos o móviles, según lo requiera el diseño del puente, los fijos deben resistir todas las cargas apropiadas y las traslaciones restringidas no deseadas, en cambio los apoyos móviles pueden incluir guías para controlar la dirección de traslación, entre los más comunes se encuentran los apoyos; cilíndricos, esféricos, tipo POT, balancín o elastoméricos (sección 14.6 CCP-14).

3.4 Sistemas de losas de conexión flexibles

La losa de conexión es el segmento de la cubierta que conecta dos claros adyacentes o los claros extremos con los estribos del puente, en estructuras de puentes de vigas simplemente apoyadas y su espesor es igual que el de la losa de cubierta; la losa de conexión es usada para acomodar las rotaciones de las vigas y no proporciona continuidad estructural al puente (Carranza, 2018).

3.5 Puentes Integrales

En los puentes integrales se busca una conexión directa entre la superestructura y la subestructura prescindiendo del uso de juntas y aparatos de apoyo (Martinez, 2011). Son estructuras monolíticas e hiperestáticas que poseen una mayor estabilidad, rigidez y un mejor comportamiento estructural, y a su vez generan costes mínimos de mantenimiento y una mayor durabilidad (Carranza, 2018). Esta continuidad y redundancia genera un uso más eficiente de los materiales al proveer una distribución de las fuerzas más homogénea entre los elementos (Burke, 2009). Sin embargo, estos puentes poseen ciertas limitaciones frente al esviaje y la curvatura de la planta, como también una mayor afectación de las deformaciones inducidas por cambios de temperatura (Vargas & Villalobos, 2017).

3.6 Conexión Integral en elementos prefabricados

Los puentes integrales se construyen principalmente in situ, pero también esta tipología puede ser usada en puentes con elementos prefabricados, sin embargo, requiere una consideración especial en el detalle de la conexión entre subestructura y la superestructura. Entre las consideraciones a tener en cuenta se encuentran; la incrustación de vigas en los apoyos intermedios, o detalles de refuerzo para la conexión de momento entre los pilares y las vigas, asimismo una detallada planeación de las etapas de construcción de los elementos estructurales para la predicción de las rotaciones de los extremos de la viga debido a la fluencia y la contracción (Al-Ani et al., 2018).

3.7 Modelo estructural

El modelo estructural se define como el proceso, mediante el cual se genera una idealización matemática que pretende representar la conducta real de la estructura a ser construida. Con base en el modelo estructural, se verifica el comportamiento de: la geometría de la estructura, las propiedades de los materiales, la magnitud y ubicación de las cargas (Martinez, 2011).

3.8 Carga Viva vehicular de diseño en puentes según el CCP – 14

La carga viva vehicular en las calzadas del puente, o en estructuras incidentales, designada como CC-14, debe consistir en una combinación de: Camión o tándem de diseño, y Carga de carril de Diseño.

4. Constructibilidad de cada tipología

Los procesos constructivos de una estructura se encuentran estrechamente vinculados con los parámetros de diseño de esta misma, a tal punto que en ocasiones el método de construcción rige las reglas de diseño. La integración de estas dos etapas en un proyecto aviva el concepto de constructibilidad, además de la planificación de la construcción, la concepción integral del proyecto, así como la industrialización de los métodos constructivos (Ekström et al., 2015).

A fin de estudiar la constructibilidad en cada tipología mostrada en la Figura.1 se exponen aspectos generales de diseño y construcción para un proyecto nuevo, haciendo énfasis en los elementos y/o conexiones propias de cada tipo de puente, a saber, las juntas (TIP-1), el sistema de losa de conexión (TIP-2), el diafragma intermedio y el sistema de postensado (TIP-3), y la conexión integral entre la superestructura y la subestructura (TIP-4). Además, en el caso de reparación de un puente simplemente apoyado (TIP-1) se muestran los pasos de construcción claves para lograr la continuidad en el tablero o en las vigas.

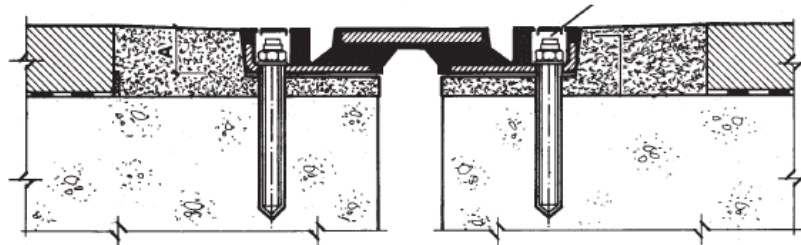
4.1 Constructibilidad de puentes TIP-1

El procedimiento constructivo de superestructuras TIP-1 de concreto reforzado o presforzado se puede llevar a cabo con el uso de cimbras para moldear el concreto fresco o empleando grúas para izar las vigas prefabricadas y apoyarlas sobre la subestructura ya construida. Si este sistema no es factible se opta por el lanzamiento de las vigas con soportes de andamios provisionales (Seminario, 2004).

Luego de que las vigas se colocan sobre los apoyos de la subestructura, se dispone a la construcción de los diafragmas para después fundir el tablero in situ o instalarlo mediante losas prefabricadas. Posterior a esto se colocan otros elementos de la superestructura como las barreras, barandas, carpeta asfáltica y juntas de dilatación (Aquino Vasquez & Hernandez Aldana, 2004). Estas últimas son dispositivos diseñados para permitir deformaciones del material de la superestructura (expansión, contracción, retracción y fraguado) debido a efectos ambientales (Ministerio de Fomento, 2000) y existen diferentes tipos como: juntas con placa dentada, juntas selladas, juntas de placa deslizante, siendo una de las más usadas las juntas de elastómero armado como la que se muestra en la Figura 2.

Figura 2.

Junta de elastómero armado.



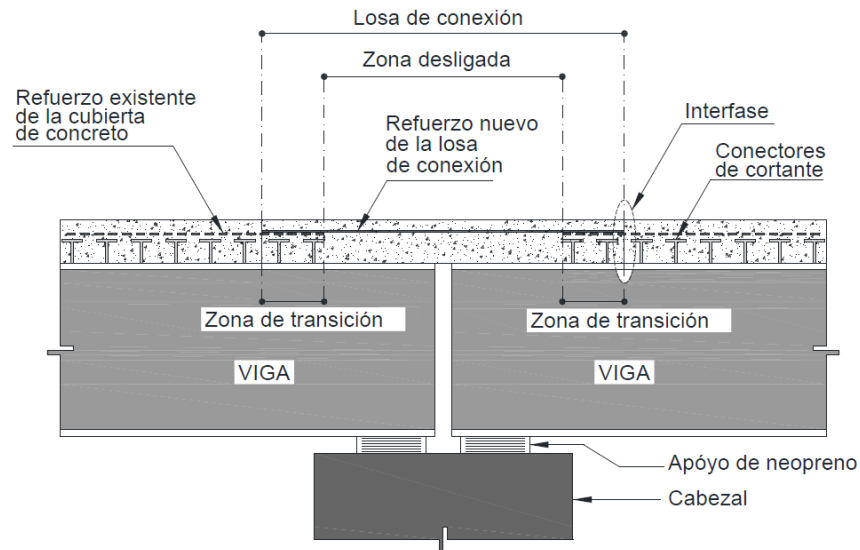
Nota: Tomado de (Fomento, 2003).

4.2 Constructibilidad de puentes TIP-2

4.2.1 Proyecto nuevo de puentes TIP-2 Un sistema de vigas simplemente apoyadas con tablero continuo presenta momento negativo sobre el soporte intermedio, cuyos efectos se

contrarrestan al proveer refuerzo en la parte superior de la losa y, en algunos casos, desligando el tablero de las vigas con el fin de disminuir el efecto la rotación de las vigas sobre la losa (Manuel Salvador Amaya Pico, 2017), esta última alternativa se conoce como “sistema de losa de conexión flexible” (Figura. 3), que fue propuesto por Canner y Zía en 1998 (Alp Caner & Zia, 1998). Los pasos básicos para su diseño son:

- i. Diseñar las vigas para cada tramo como simplemente apoyadas.
- ii. Permitir una zona desligada (Figura. 3) donde no se provee conectores de cortante entre la viga y el tablero, seguido de una zona de transición donde se continúa el refuerzo para momento negativo.
- iii. Determinar las rotaciones de las vigas generadas por la carga vehicular, con el fin de calcular el momento flector de la losa de conexión.
- iv. Diseñar el refuerzo en la parte superior de la losa que resistirá la tensión asociada al momento negativo.
- v. Para el caso de puentes ubicados en regiones sísmicas, chequear que el acero de refuerzo negativo de la losa de conexión diseñado bajo cargas gravitacionales no exceda el 60% del esfuerzo de fluencia (f_y) al ser solicitado por la fuerza sísmica que se origina en la zona de continuidad (A. Caner et al., 2002). Esto garantiza un comportamiento protegido por capacidad.

Figura 3.*Losa de conexión flexible.**Nota:* Tomado de (Carranza, 2018)

El momento negativo generado por la rotación de las vigas bajo cargas sobrepuestas actuando en la superestructura puede agrietar la fibra superior de la losa del concreto, permitiendo la infiltración de agua y corrosión del acero de refuerzo (Carranza, 2018). Por lo tanto, Carranza (Carranza, 2018) Ho y Lukashenko (Ho & Lukashenko, 2011) sugieren las siguientes consideraciones constructivas:

- Implementar apoyos fijos en las vigas debido a que los apoyos articulados desarrollan mayor rotación y tensión en la losa.
- Proveer refuerzo especial en la zona de momento negativo tal como: barras recubiertas con capa epóxica o barras de refuerzo de polímero reforzado con fibras de vidrio, o usar un concreto reforzado con fibras de acero en la losa de conexión.

- Utilizar concretos de alto desempeño en la zona de continuidad del tablero, en particular con resistencia alta a la tensión, (se recomienda usar concretos con fibras de polipropileno, los cuales presentan una deformación unitaria a tensión del concreto entre un 3% y 5%).
- Incluir membranas impermeables en la superficie encima del refuerzo con el fin de evitar la corrosión del acero.

4.2.2 Cambio de esquema de TIP-1 a TIP-2 El proceso de rehabilitación a la superestructura fue realizado mediante el siguiente procedimiento: (i) remoción de la parte del tablero que hace referencia a la zona desligada (Figura. 4), (ii) instalación de una lámina de polietileno en la parte superior de las vigas con el fin de desacoplar las vigas del tablero, (iii) sustitución de los apoyos antiguos por apoyos de neopreno reforzado para lo cual fue necesario levantar las vigas mediante gatos hidráulicos (iv) colocación de refuerzo transversal para momento negativo en la zona superior de la losa, (v) fundición de concreto de alta resistencia para la zona de continuidad, (vi) instalación de una membrana impermeable por encima del refuerzo, (vii) construcción de una capa adicional de pavimento. Este tipo de proceso de reparación permite la reducción de costos de mantenimiento al eliminarse las juntas de dilatación, además de evitar la infiltración de agua o residuos a los elementos adyacentes. Los proyectistas de esta reparación recomendaron realizar cortes en la superficie del concreto que serán posteriormente selladas, previendo futuras fisuras del concreto en la zona de continuidad.

El proceso de rehabilitación a la superestructura fue realizado mediante el siguiente procedimiento: (i) remoción de la parte del tablero que hace referencia a la zona desligada (Figura. 4), (ii) instalación de una lámina de polietileno en la parte superior de las vigas con el fin de

desacoplar las vigas del tablero, (iii) sustitución de los apoyos antiguos por apoyos de neopreno reforzado para lo cual fue necesario levantar las vigas mediante gatos hidráulicos (iv) colocación de refuerzo transversal para momento negativo en la zona superior de la losa, (v) fundición de concreto de alta resistencia para la zona de continuidad, (vi) instalación de una membrana impermeable por encima del refuerzo, (vii) construcción de una capa adicional de pavimento. Este tipo de proceso de reparación permite la reducción de costos de mantenimiento al eliminarse las juntas de dilatación, además de evitar la infiltración de agua o residuos a los elementos adyacentes. Los proyectistas de esta reparación recomendaron realizar cortes en la superficie del concreto que serán posteriormente selladas, previendo futuras fisuras del concreto en la zona de continuidad.

Figura 4.

Detalle de reparación.



Nota: Tomado de (Ho & Lukashenko, 2011).

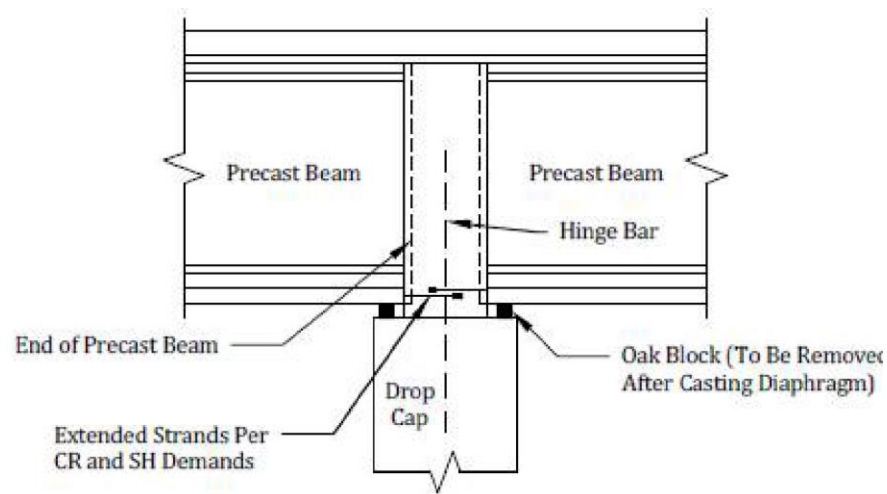
4.2 Constructibilidad de puentes TIP-3

4.3.1 Proyecto nuevo de puentes TIP-3 Los puentes continuos pueden ser construidos a partir de tramos simples, donde el diafragma de conexión se diseña para momento positivo y negativo y

es construido con concretos de resistencias relativamente altas (31-34 MPa) (Hastak et al., 2003). La distancia entre las vigas adyacentes al diafragma de conexión debe ser suficiente para que las barras de refuerzo o preesfuerzo que son extendidas desde el extremo de las vigas cuenten con la longitud de desarrollo requerida y sean traslapadas de manera adecuada (Figura. 5). Este refuerzo debe ser diseñado para contrarrestar los efectos dependientes del tiempo y la temperatura (Khaleghi & Yen, 2018). La tensión resultante de los momentos negativos generados en esta zona puede ser resistida por el refuerzo superior, colocado en la losa del tablero continuo (Wang et al., 2011), así como por un postensado continuo o parcial en las vigas, el cual puede ser parcial superior de las vigas (Moloy, n.d.).

Figura 5.

Detalle de diafragma intermedio.



Nota: Tomado de (Khaleghi & Yen, 2018)

En el caso de vigas prefabricadas postensadas, Taha y Jia (Taha & Jia, 2018) propusieron el siguiente procedimiento de construcción para lograr la continuidad de la superestructura:

- i. Izar las vigas prefabricadas postensadas soportadas sobre apoyos temporales de neopreno. Las barras de refuerzo longitudinales de estas vigas se extienden más allá de sus extremos en la zona de conexión intermedia.
- ii. Construir el diafragma intermedio de continuidad con la misma altura de las vigas sin sobrepasar el nivel del tablero.
- iii. Anclar y postensar los tendones de continuidad en la parte superior de las vigas para momento negativo.
- iv. Fundir el tablero sobre las vigas.
- v. Remover los apoyos temporales en cada viga e instalar apoyos intermedios debajo del nuevo diafragma.

Cabe aclarar que en puentes donde no se utiliza el postensado en la zona de conexión intermedia, la mayoría de los fabricantes utilizan doble apoyo, uno debajo de cada viga (Moloy, n.d.).

4.3.2 Cambio de esquema de TIP-1 a TIP-3 Una técnica de reforzamiento propuesta por Wang et al. (Wang et al., 2011) con la cual se genera continuidad TIP-3 En las vigas de puentes simplemente apoyados soportadas sobre apoyos de neopreno consiste en:

- i. Los diafragmas y los patines superiores de las vigas en la zona donde se instalarán los anclajes para el postensado se remueven.
- ii. El alma de las vigas adyacentes entre el diafragma interior y el diafragma recién removido es alargada para formar un bloque de sección rectangular, el cual proporciona una mayor resistencia a cortante en los extremos de las vigas cerca a los apoyos. El refuerzo transversal en la

sección de la viga actúa como un conector de cortante, mejorando la transferencia de fuerzas a través del cambio de concreto viejo a nuevo.

iii. El concreto se vierte en la zona de conexión donde el acero se ha instalado para la formación del diafragma final.

iv. Para el postensado, los cables de acero se instalan en ductos de metal y los anclajes son incrustados en el nuevo concreto colado in situ.

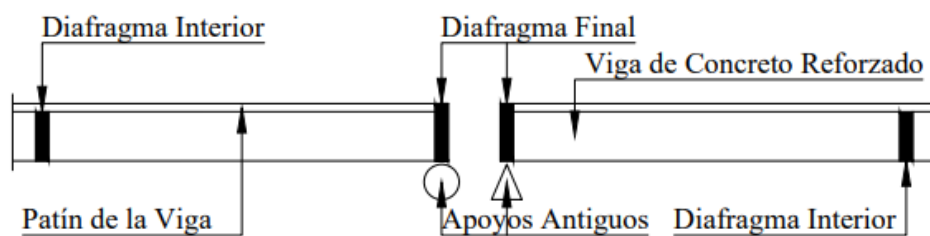
v. Se funde el tablero y la capa asfáltica.

vi. Los cables de acero se tensan cuando el concreto del nuevo diafragma y de los anclajes alcanzan el 75% de su resistencia máxima a compresión.

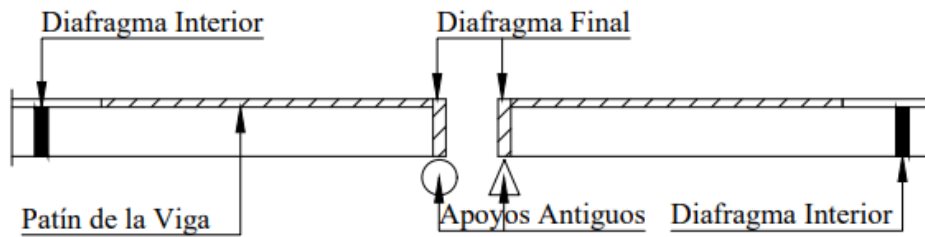
vii. Finalmente, se instala un soporte interior permanente debajo del nuevo diafragma y se retiran los dos soportes interiores antiguos (Figura. 6).

Figura 6.

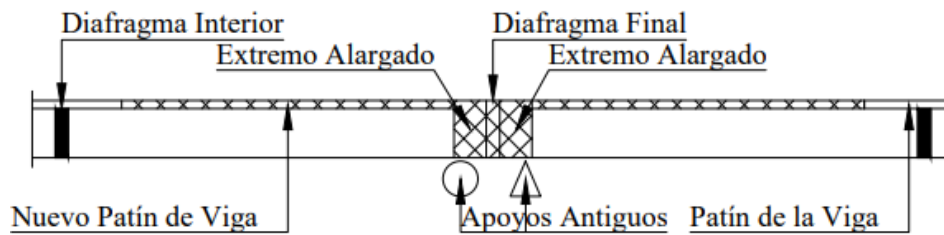
Etapas de reparación de un puente simplemente apoyado.



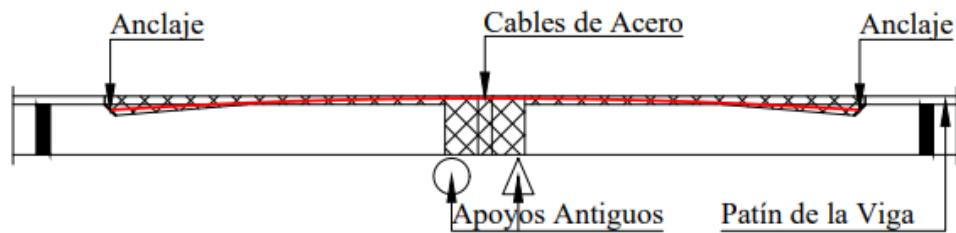
Etapa 1



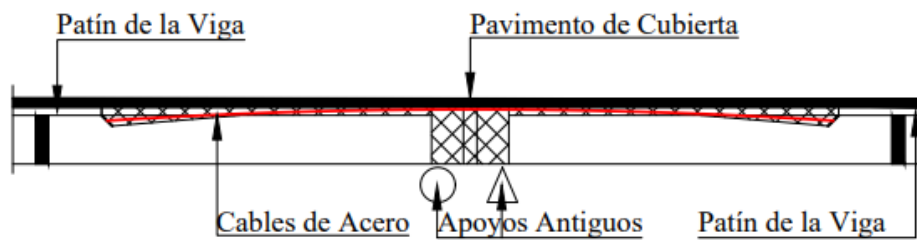
Etapa 2



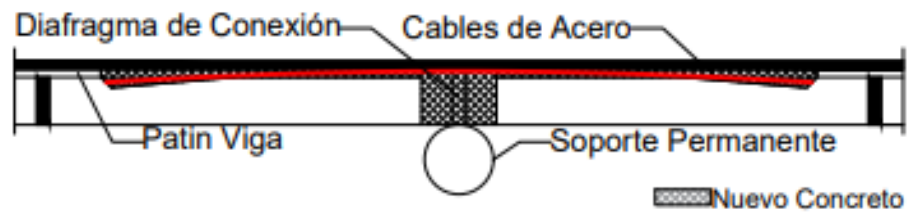
Etapa 3



Etapa 4



Etapa 5



Etapa 6

Nota: Tomado de (Wang et al., 2011).

4.4 Constructibilidad de puentes TIP-4

La construcción de esta tipología requiere que las vigas sean construidas con refuerzo extendido desde uno de sus extremos, el cual es colocado para resistir la tensión causada por el momento positivo en el nodo. Las vigas deben ser embebidas en el diafragma intermedio sobre la viga cabezal, de la cual se deben extender conectores de cortante a la superestructura (Al-Ani et al., 2018) como se ilustra en la Figura 7. Esto desarrolla una conexión resistente a momento, que permite redistribución de fuerzas longitudinales y transversales en el apoyo intermedio, y la acción conjunta de este con la superestructura (Villalobos, 2017).

Algunas recomendaciones de diseño expuesta por Burke (Burke, 2009) para este tipo de conexiones son:

- i. Las vigas adyacentes deben ser de igual longitud y altura.
- ii. Se debe proporcionar refuerzo de momento negativo al tablero, así como para la viga cabezal que resista las cargas vivas, y muertas que actúan en la superestructura que resista las cargas vivas y muertas que actúan en la superestructura.

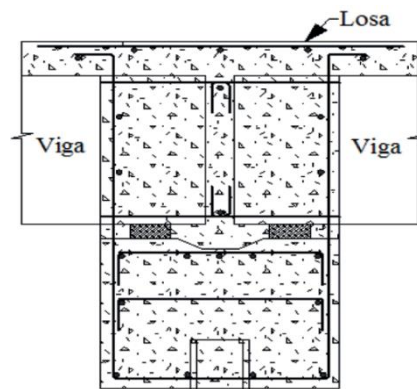
iii. Se debe proveer refuerzo extendido en la parte inferior de las vigas mediante barras o preesfuerzo para resistir el momento positivo debido a las fuerzas dependientes del tiempo. Como lo indica Benjumea et al. (Benjumea, 2020), en puentes ubicados en zonas de sismicidad moderada o alta, este refuerzo debe diseñarse para resistir las tensiones generadas por el momento positivo sísmico en el nudo que resulta de la plastificación de las columnas.

iv. El refuerzo del diafragma está diseñado para resistir las fuerzas sísmicas resultantes que actúan en el centroide del diafragma.

v. Los extremos de las vigas están diseñados para la transferencia de corte de la interfaz entre las vigas prefabricadas y los diafragmas.

Figura 7.

Detalle de conexión integral.



Nota: Tomado de (Villalobos, 2017)

5. Descripción del caso de estudio

A fin de comparar la respuesta estructural de las cuatro tipologías anteriormente descritas, se utilizó el programa Midas Civil (MIDAS Information Technology Co. Ltd, 2016) para modelar un puente simplemente apoyado de dos vanos en el cual se efectuaron las variaciones de continuidad y conexión entre la superestructura y el apoyo intermedio, generando así un modelo para tipo de puente. Estas nuevas tipologías no se rediseñaron, puesto que las dimensiones de los elementos estructurales de la TIP-1 se mantuvieron constantes mientras se modificaban los elementos necesarios para generar la continuidad y/o conexión de cada estructura. Esto indica que la comparación está centrada en la demanda estructural, mas no en la capacidad de los elementos. El análisis de la respuesta estructural se efectuó en el rango lineal elástico, bajo cargas muertas, vivas, fuerza sísmica y usando las combinaciones de carga de resistencia I, servicio I y evento extremo I; estas solicitaciones fueron evaluadas con base a la Norma Colombiana de Diseño de Puentes (CCP-14) (Burke, 2009). A continuación, se describe la geometría y las propiedades mecánicas del puente en estudio, como también la evaluación de cargas y el análisis estructural, y por último el proceso de modelamiento de cada tipología.

5.1 Geometría del puente en estudio

El puente viga-losa de estudio presenta una sección transversal compuesta por cuatro vigas prefabricadas de concreto presforzado en sección I y tablero con ancho de 9.91 m, espesor de 0.2 m, y carpeta asfáltica de 0.05 m (Figura. 8). La estructura tiene dos luces, cada una con 38 m de distancia entre apoyos, donde el apoyo intermedio consta de un pórtico de dos columnas de 1.2 m

de diámetro y 6 m de altura, conectadas por una viga cabezal de sección rectangular 1.7 m x 1.5 m, como se visualiza en la Figura. 9. Cada luz tiene 5 riostras, 3 de ellas distribuidas equidistantemente en la parte media de las vigas (riostras intermedias) y 2 en los extremos, cuya sección rectangular es 0.3 m x 1.55 m. Las vigas tipo I cuentan con un patín superior e inferior de 0.85 m y 0.65 m, respectivamente, un peralte de 1.75 m.

Figura 8.

Sección transversal del puente (dimensiones en metros).

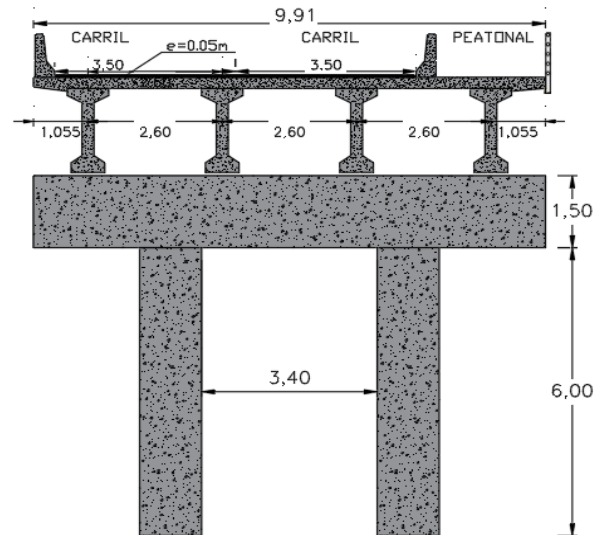
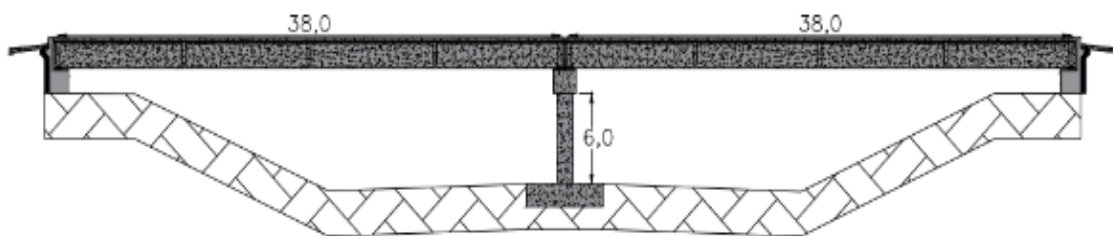


Figura 9.

Sección longitudinal del puente (dimensiones en metros).



5.2 Propiedades mecánicas de los materiales

Las propiedades mecánicas de los materiales de los elementos principales del puente, incluyendo los apoyos, se indican en la Tabla 1. En esta tabla, donde $f'c$ es la resistencia nominal máxima del concreto a compresión, Ec es el módulo de elasticidad del concreto, fy es el esfuerzo de fluencia del concreto, Es es el módulo de elasticidad del acero, G es el módulo de cortante del elastómero, ϵ es la deformación por flujo plástico dividida en la deformación instantánea y k es la constante dependiente de la dureza del elastómero.

Tabla 1.

Propiedades mecánicas de los materiales.

Concreto			
Peso ($\frac{KN}{m^3}$)	$f'c$ (MPa)	Ec (MPa)	
24	28	26750	
24	35 (Vigas I)	29910	
Acero			
Grado	fy (MPa)	Es (MPa)	
60	420	200000	
Elastómero			
Dureza	G (MPa)	ϵ	k
60	0.9	0.35	0.6

5.3 Evaluación de cargas y análisis estructural

5.3.1 Cargas y combinaciones de cargas Se incluyeron las cargas muertas (DC+DW), así como las cargas vivas (LL+IM), expuestas en la Tabla 2.

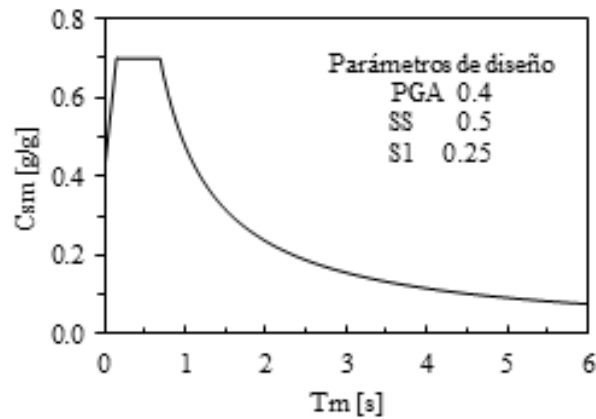
Tabla 2.*Cargas gravitacionales.*

Carga		Descripción
Muerta	DC1	Peso propio de los elementos estructurales.
	DC2	Peso de barreras de tráfico, baranda peatonal y guarda pie.
	DW	Carga de pavimento
Viva	LL+IM	Carga viva vehicular (camión de diseño + carga de carril) más la amplificación de carga dinámica

Para el análisis sísmico del puente se utilizó el espectro de diseño para la ciudad de Bucaramanga, asumiendo un tipo de suelo D (Figura. 10), desempeño sísmico en la zona 3 y clasificación de “Otros puentes” de acuerdo con CCP-14 (Burke, 2009). Para obtener las fuerzas sísmicas se usó el método multimodal espectral de acuerdo con el CCP-14 (Burke, 2009), donde se recomienda que el número de modos sean por lo menos tres veces el número de luces del modelo, que para el caso en estudio serían 6 modos de vibración. Sin embargo, se incluyeron 10 modos de vibración. Además, se combinaron los valores modales según la Combinación Cuadrática Completa (CQC), que toma en cuenta el acoplamiento entre modos de frecuencias cercanas. Asimismo, las cargas sísmicas fueron calculadas usando la sección fisurada en las columnas, al reducir en un 50% el momento de inercia de las secciones como lo recomienda el CCP14. Para determinar las fuerzas sísmicas de diseño se utilizaron los coeficientes de disipación de energía R, donde en la dirección longitudinal (paralelo al tránsito) se usó R=5 (pórtico con múltiples columnas) y en la dirección transversal (perpendicular al tránsito) se tomó el valor de R=3 (columnas solas).

Figura 10.

Espectro de diseño para Bucaramanga con un suelo tipo D.



Nota: Tomado de (Burke, 2009).

Se evaluó el comportamiento estructural de la superestructura analizando las fuerzas internas de las vigas debido a la carga muerta y carga viva tomando las combinaciones de Resistencia I (Ec. 1), y Servicio I (Ec. 2) para el cálculo de las deflexiones instantáneas.

$$\text{Resistencia I: } 1.25 DC + 1.5 DW + 1.75 (LL+IM) \quad (1)$$

$$\text{Servicio I: } 1DC + 1DW + 1(LL+IM) \quad (2)$$

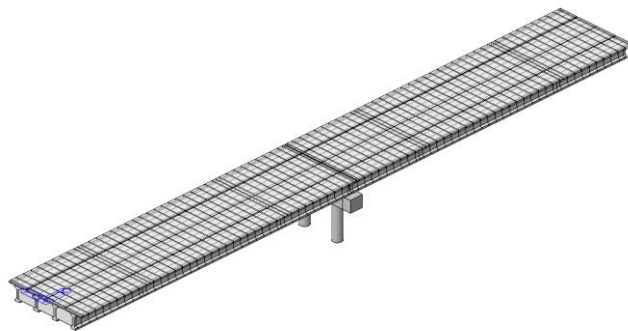
Las respuestas estructurales de las columnas del pórtico de cada tipología fueron comparadas bajo la combinación de carga de Evento Extremo I (Ec. 3), la cual considera el efecto sísmico (EQ) y permite el análisis de las demandas por desplazamiento, fuerzas (axiales, y cortantes) y momento flector. La combinación de los efectos de las fuerzas sísmicas horizontales se llevó a cabo tal y como se especifica en el CCP-14 (Burke, 2009), de tal manera que un 100% de aporte de la dirección longitudinal se suma con un 30% debido a la dirección transversal y viceversa.

$$E.Extremo I: 1.25 DC + 1.5 DW + EQ \quad (3)$$

5.3.2 Modelado Estructural La Figura 11 presenta el esquema del modelo computacional del puente TIP-1, el cual se desarrolló en el programa MIDAS Civil (MIDAS Information Technology Co. Ltd, 2016). Las columnas, viga cabezal, vigas longitudinales y diafragmas, se modelaron mediante elementos tipo barra (“frame”), mientras que el tablero se modeló mediante elementos tipo área (“plate”); este elemento consiste en una superficie bidimensional a la cual se le agina un grosor, presenta ocho grados de libertad por nodo, y puede transmitir fuerzas axiales y momentos flectores por unidad de ancho en la dirección local del elemento en sentido longitudinal y transversal (x & y), fuerzas cortantes en sentido vertical en el plano x-z & y-z, fuerza cortante y momento de torsión en el plano x-y.

Figura 11.

Modelo computacional extruido del puente TIP-1 desarrollado en MIDAS Civil.

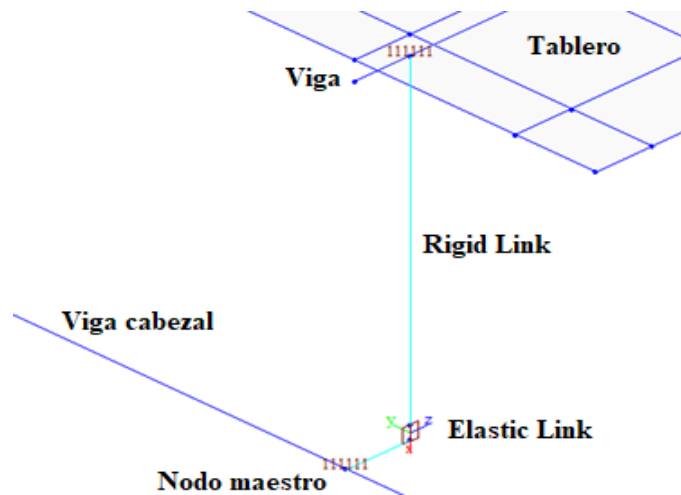


Nota: Tomado de (MIDAS Information Technology Co. Ltd, 2016).

Los apoyos de las vigas fueron simulados mediante elementos elásticos (“elastic links”) los cuales en la zona de los estribos del puente se conectaron a apoyos empotrados y en la zona del pórtico se conectaron con la viga cabezal a través de elementos rígidos (rigid link). En estos últimos, el nodo maestro se ubicó en la viga cabezal y el nodo esclavo en la parte inferior de la viga como se visualiza en la Figura 12. Estos apoyos fueron diseñados por los autores, resultando en rigideces axial y lateral de 89100 kN/m y 4304 kN/m, respectivamente, que fueron asignados en los elementos elásticos. Las columnas se asumieron empotradas en la base con el fin de simular una cimentación rígida.

Figura 12 .

Detalle de conexión entre la superestructura y las vigas.



Nota: Tomado de (MIDAS Information Technology Co. Ltd, 2016).

Los modelos computacionales de cada tipología estos se desarrollaron mediante la herramienta “Construction Stage” de Midas Civil (MIDAS Information Technology Co. Ltd, 2016); función que permite definir etapas constructivas de un puente. En la Tabla 3 se exponen los

grupos de apoyos, elementos, conexiones o de cargas que fueron activados en cada Etapa y para cada tipología. Como se observa en esta tabla en la Etapa 4 se realizaron los cambios más significativos para simular las variaciones de continuidad y conexión

Tabla 3.

Etapas constructivas de la TIP-1.

Elementos, apoyos y cargas activadas por etapa constructivas				
Etapa	TIP-1	TIP-2	TIP-3	TIP-4
1		Apoyos columnas y extremos Columnas V. Cabezal		V. Cabezal (1)
2		Apoyos (A) de las vigas Vigas interiores y exteriores Cinco riostras por vano		Apoyos provisionales Cuatro riostras por vano
3		Tablero		
4	Junta	Losa de conexión	Vigas de continuidad Diafragma intermedio	V. Cabezal (2) Conexión Integral
5	Cargas de barreras (DC2) y pavimentos (DW)			

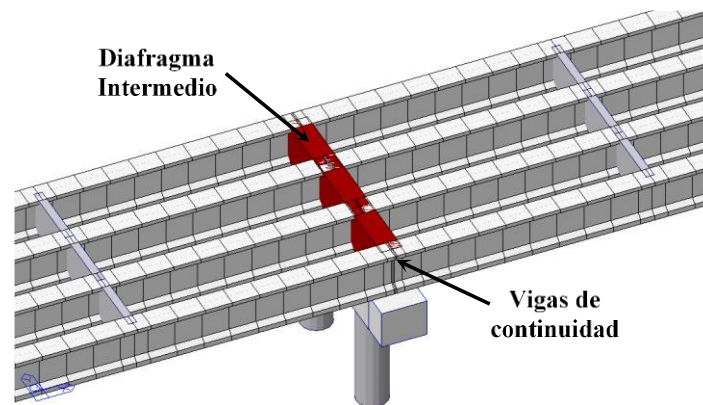
A continuación, y tomando como referencia la Tabla 3 y el modelo TIP-1, se describen los cambios que se realizaron en las etapas constructivas para generar los modelos de la TIP-2, TIP-3 y TIP-4.

Para el modelo de la TIP-2 se eliminó el elemento “Junta” que tenía un módulo de elasticidad de 1 MPa y conectada entre los extremos adyacentes del tablero, en su lugar fue activado el elemento “Losa de conexión”, al cual le fueron asignadas las mismas propiedades del tablero. Para los puentes TIP-3 y TIP-4, en la Etapa 2 no se activaron las dos riostras de los extremos de las vigas que recaen sobre el apoyo intermedio. Esto debido a los elementos de conexión que posteriormente se activaron en esa zona en la Etapa 4, que en el caso de la TIP-3

fueron los siguientes: (i) “Vigas de continuidad”, estos elementos unieron las vigas simples, (ii) “Diafragma Intermedio”, este elemento conectó las vigas transversalmente y tenía una sección transversal de 0.8 m x 1.5 m asumida con base en las recomendaciones de Taha y Jia (Taha & Jia, 2018). El esquema de la Etapa 4 del modelo de la TIP-3 se presenta en la Figura 13, donde el color rojo indica los elementos que se activaron.

Figura 13.

Etapa 4 de construcción en la TIP-3 (tablero no mostrado).



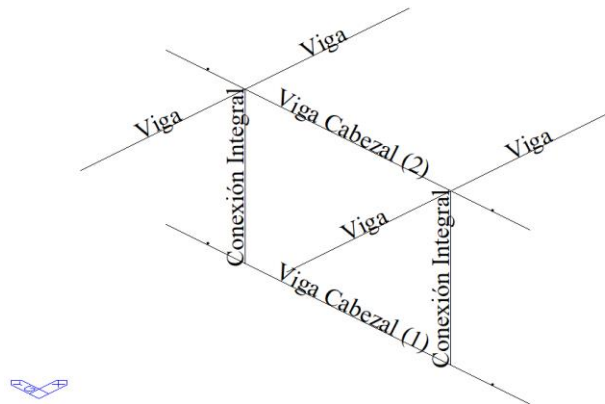
Nota: Tomado de (MIDAS Information Technology Co. Ltd, 2016).

Para el modelo de la TIP-4, en la Etapa 1 se activó el elemento “Viga Cabezal (1)”, el cual tiene una sección transversal de 1.7 m x 0.8 m. Esta viga cabezal sirve de soporte a las vigas longitudinales y al tablero durante construcción. Por lo tanto, el pre-dimensionamiento de la sección se basó en la premisa de que el refuerzo permaneciera en el rango elástico y que el concreto no presentara fisuras bajo las cargas muertas durante construcción (antes de presentarse la conexión integral). En la Etapa 2 se activaron los “Apoyos provisionales”, los cuales se diseñaron para soportar las cargas muertas de las vigas, obteniendo así una rigidez axial de 79200 kN/m y

lateral de 3825 kN/m. En la Etapa 4 se activaron los siguientes elementos (Figura. 14): (i) “Vigas de continuidad”, los cuales unieron las vigas adyacentes entre sí; (ii) “Viga Cabezal (2)”, que une las vigas transversalmente y se le asignó una sección de 1.7 m x 1.75 m; (iii) “Conexión Integral”, elemento usado para generar una conexión rígida entre los elementos “Viga Cabezal (1)” y “Viga Cabezal (2)” y lograr así la conexión del pórtico con la superestructura. A fin de ocasionar que esta conexión fuera rígida se aumentó el módulo de elasticidad de este elemento un 2000% con respecto a las propiedades mecánicas del concreto de 28 MPa. El esquema de la Etapa 4 del modelo sin el tablero se presenta en la Figura 15.

Figura 14.

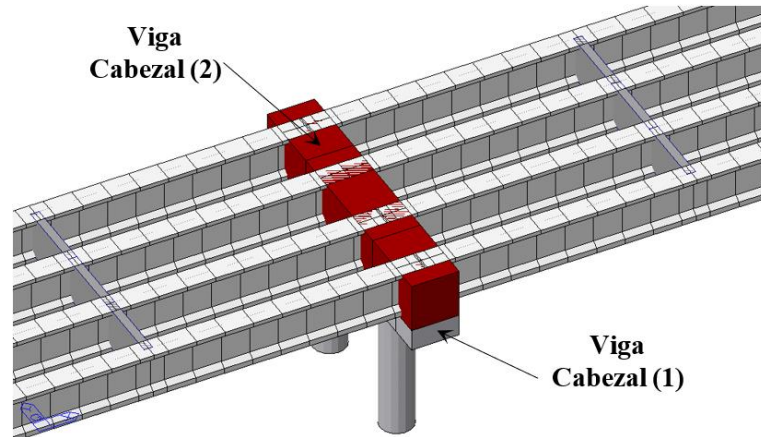
Detalle de los elementos que simularon la conexión integral en el modelo de la TIP-4.



Nota: Tomado de (MIDAS Information Technology Co. Ltd, 2016).

Figura 15.

Etapa 4 de construcción en la TIP-4 (tablero no mostrado).



Nota: Tomado de (MIDAS Information Technology Co. Ltd, 2016).

6. Comparación de la respuesta estructural

La respuesta estructural de los puentes TIP-2, TIP-3 y TIP-4 se comparó con la del puente TIP-1, a excepción de los momentos negativos de las vigas (no existentes en TIP-1) donde se toma como referencia el valor de la TIP-2. En primer lugar, se comparan las reacciones verticales en todos los apoyos de la estructura, seguido de los valores máximos de las fuerzas cortantes, momentos, y las deflexiones instantáneas en las vigas exteriores. Posteriormente, se presenta la respuesta modal de los cuatro puentes, así como las fuerzas sísmicas y las deformaciones laterales máximas en las columnas del pórtico. Estas respuestas se analizan bajo cargas muertas (DC+DW), vivas (LL+IM) y para las combinaciones de carga de Resistencia I (Ec. 1), Servicio I (Ec. 2) y Evento Extremo I (Ec. 3).

6.1 Reacciones verticales

La Tabla 4 presenta las reacciones en los apoyos de las vigas en los estribos (A. Est) y en el pórtico intermedio (A. Int), junto con las diferencias porcentuales (Δ) con respecto a las respuestas del puente con TIP-1. En la TIP-2 se presenta un cambio promedio absoluto del 1% en las reacciones, siendo irrelevante el efecto de la continuidad del tablero. Sin embargo, el valor de las reacciones del apoyo intermedio bajo cargas vivas en la TIP-3 y TIP-4 aumentan un 10% y un 14%, respectivamente, debido a que los elementos y/o conexiones que originan los cambios de esquema transmiten un mayor porcentaje de carga al pórtico, reduciendo a su vez las reacciones de los apoyos en los estribos. Esta variación afectaría el diseño de algunos elementos de la subestructura, tales como los apoyos de las vigas y la cimentación de las columnas.

Tabla 4.

Reacciones verticales de los apoyos de la estructura bajo cargas muertas, vivas y combinación de resistencia.

Reacciones verticales [kN]								
Caso de carga	Zona	TIP-1	TIP-2	Δ [%]	TIP-3	Δ [%]	TIP-4	Δ [%]
Muerta (DC+DW)	A. Est	671.7	667.9	-1%	648.8	-3%	634.5	-5%
	A. Int	3150.2	3168.0	+1%	3279.4	+3%	3371.9	+7%
Viva (LL+IM)	A. Est	371.9	369.7	-1%	347.4	-7%	338.4	-9%
	A. Int	999.4	990.1	-1%	1103.5	+10%	1143.4	+14%
Resistencia I	A. Est	1501.1	1492.0	-1%	1426.6	-5%	1404.0	-6%
	A. Int	5736.4	5744.3	-	6091.8	+6%	6277.8	+9%

6.2 Análisis de la superestructura

6.2.1 Fuerzas internas en las vigas Como se expone en la Tabla 5, las variaciones de continuidad y/o conexión de TIP-2, TIP-3 y TIP-4 respecto de la TIP-1 generan las siguientes variaciones en la fuerza cortante máxima de las vigas: en la zona de los estribos (A. Est) disminuya entre un 1% y un 6% bajo cargas vivas y muertas y en la zona del apoyo intermedio (A. Int) aumenta entre un 1% y un 12% bajo cargas muertas y en entre un 2% y un 16% bajo cargas vivas. Con base a esto, se identifica que el cambio porcentual es mayor en la zona de los apoyos intermedios en comparación a la zona de los estribos, así como también bajo cargas vivas en comparación con las cargas muertas. Este incremento de la fuerza cortante en la zona del apoyo intermedio se debe tener en cuenta al cambiar estructuralmente de la TIP-1 a la TIP-3, siendo necesario un aumento de la sección transversal en la zona cercana al diafragma intermedio con el fin de incrementar la resistencia al corte.

Tabla 5.

Fuerza cortante longitudinal máxima en las vigas exteriores bajo cargas muertas, vivas y Resistencia I.

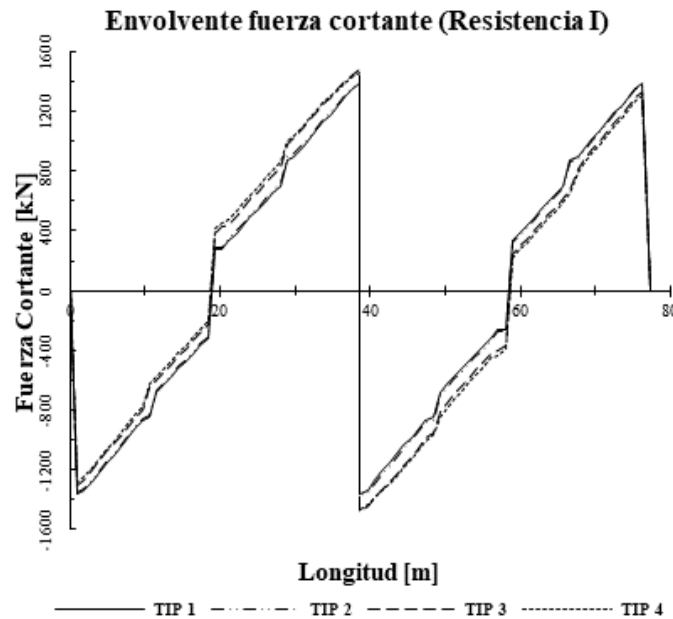
Caso de carga	Zona	Fuerza cortante longitudinal [kN]						
		TIP-1	TIP-2	Δ [%]	TIP-3	Δ [%]	TIP-4	Δ [%]
Muerta (DC + DW)	A. Est	617.2	613.4	-1%	594.6	-4%	592.9	-4%
	A. Int	619.3	624.0	+1%	673.8	+9%	695.0	+12%
Viva (LL + IM)	A. Est	368.9	365.4	-1%	349.3	-5%	346.1	-6%
	A. Int	369.9	376.4	+2%	412.9	+12%	430.6	+16%
Resistencia I	A. Est	1427.9	1417.2	-1%	1363.0	-5%	1355.0	-5%
	A. Int	1433.3	1451.1	+1%	1579.9	+10%	1629.3	+14%

En el caso de la combinación de Resistencia I, el cambio de la fuerza cortante en la TIP-2 no supera el 2% con respecto a la TIP-1, indicando que es posible que no se requieran cambios en las vigas simplemente apoyadas. Por otra parte, la demanda a cortante en la región del apoyo intermedio de las vigas de la TIP-3 y TIP-4 incrementa el 10% y el 14%, respectivamente.

En adición, como se observa en el diagrama de cortante en la Figura 16, la variación de la fuerza cortante se presenta a lo largo de toda la luz de la viga y no únicamente en la zona de los apoyos, tal que al comparar los diagramas de cortante de la TIP-1 con la TIP-3 y TIP-4 se diferencian dos zonas para cada vano: la primera, desde el centro de luz hacia los estribos, donde la fuerza cortante de la TIP-1 es mayor; y la segunda, del centro de luz al eje del apoyo intermedio, donde la fuerza disminuye. De esto se deduce que el diseño a cortante para la primera zona de una viga simplemente apoyada resistiría la demanda de una viga continua, no obstante, sería necesario revisar la resistencia a corte en la segunda zona dado el caso que sea necesario proveer mayor refuerzo transversal o un rediseño de la sección.

Figura 16.

Diagrama de la fuerza cortante envolvente de las vigas exteriores bajo la combinación de Resistencia I.



Con respecto a los valores de los momentos máximos positivos (MM+) de las vigas, expuestos en la Tabla 6, se observa una disminución con base en la TIP-1 a medida que se varían las tipologías. Por otra parte, los momentos máximos negativos (MM-) de las vigas con base en la TIP-2 aumentan para la TIP-3 y TIP-4.

Tabla 6.

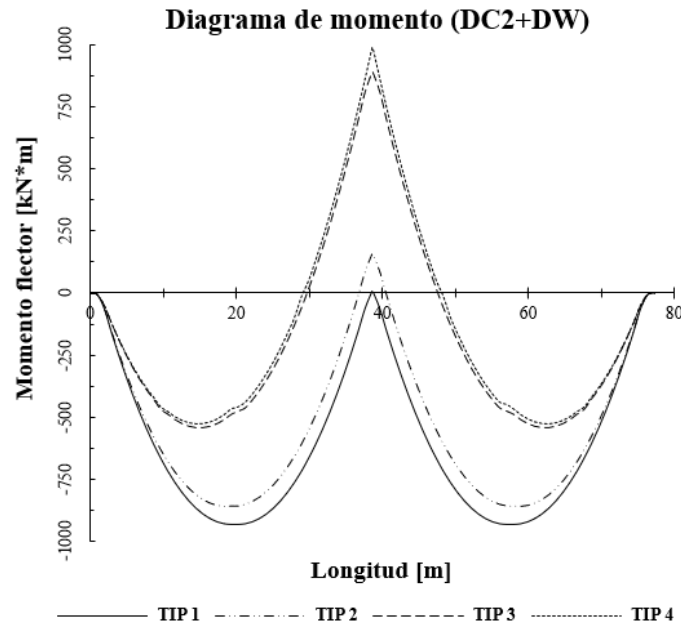
Momentos máximos en las vigas exteriores bajo cargas muertas, vivas y Resistencia I.

Caso de carga	MM+/MM-	Momento longitudinal [kN*m]						
		TIP 1	TIP 2	Δ [%]	TIP 3	Δ [%]	TIP 4	Δ [%]
Muerta (DC+DW)	MM+	6187.4	6079.4	-2%	5748.9	-7%	5724.1	-7%
	MM-	0	150.8	-	920.0	510%	993.9	559%
Viva (LL + IM)	MM+	2941.6	2891.6	-2%	2402.2	-18%	2233.9	-24%
	MM-	0	304.9	-	2826.2	827%	3045.4	899%
Resistencia I	MM+	12880	12651	-2%	11280	-12%	10928	-15%
	MM-	0	719.5	-	5697.7	692%	6230.8	766%

Cabe destacar que, debido al procedimiento constructivo de cada tipología, el peso propio de los elementos de la superestructura (DC1) es soportado por un sistema simplemente apoyado, asimismo, las cargas muertas sobreimpuestas (DC2+DW) recaen sobre un sistema donde el cambio de continuidad y/o conexión ya fue realizado, siendo las cargas muertas sobreimpuestas la que generan en su mayoría los momentos negativos por cargas muertas. Esto se observa en los diagramas de momento de la Figura 17, en los cuales los valores de los MM- concuerdan en un alto porcentaje con los expuestos en la Tabla 6. Estos diagramas a su vez, exponen el comportamiento de las vigas de cada tipología bajo una carga lineal, en el que se aprecia que para la TIP-2, el momento negativo se obtiene en la zona de continuidad del tablero, y el momento positivo se reduce en comparación con una viga simplemente apoyada, además que para la TIP-3 y TIP-4 se presentan diagramas de momento muy similares, los cuales difieren en que el momento positivo es menor y el negativo mayor en la TIP-4.

Figura 17.

Diagrama de momento envolvente de las vigas exteriores bajo la combinación DC+DW.



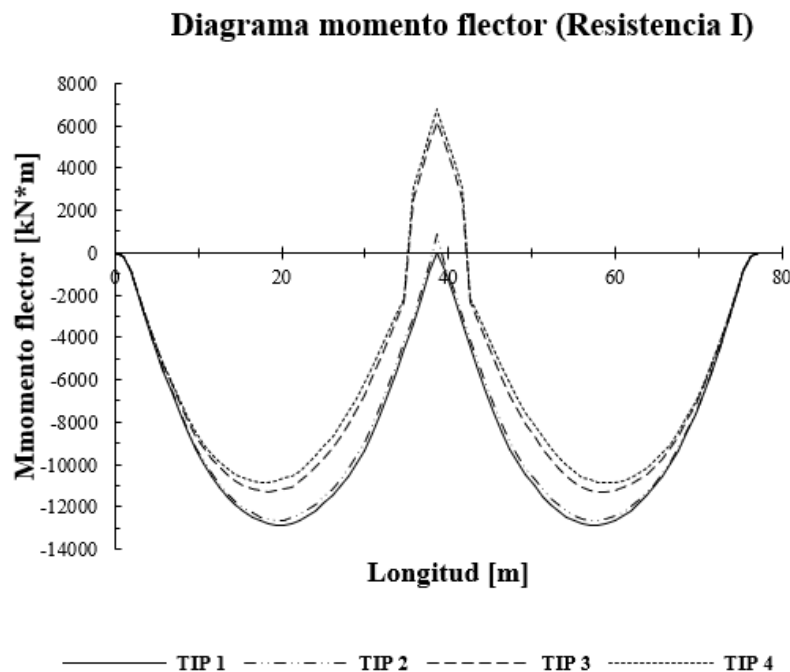
Los momentos máximos positivos bajo cargas vivas en los puentes TIP-2, TIP-3 y TIP-4 son 2%, 18% y 24% menores que los del TIP-1, respectivamente, de lo cual se deduce que al proyectar las vigas continuas se presenta menos demanda estructural frente a las cargas sobreimpuestas, siendo recomendable un cambio de esquema estructural de TIP-1 a TIP-3 ante el caso particular de un aumento de carga vehicular.

En el caso de la combinación de Resistencia I, los momentos máximos positivos disminuyen entre un 2% y un 15%, decremento que podría afectar el diseño de los elementos de la superestructura (en especial para la TIP-3 y TIP-4) al presentarse la posibilidad de que se reduzcan las secciones transversales. En el caso de los momentos máximos negativos, se debe contemplar en cada tipología procedimientos de diseño para ser contrarrestados tal y como se

describe a continuación: para la TIP-2 se provee refuerzo en la zona de continuidad del tablero, así como es recomendable un sistema de losa de conexión para disminuir el efecto de las rotaciones de las vigas; para el caso de la TIP-3 se debe garantizar continuidad del refuerzo de las vigas en el diafragma de conexión y/o el uso de postensionamiento externo entre vigas; en el caso de la TIP-4, igual que para la TIP-3, se debe asegurar continuidad del refuerzo y un diseño detallado de la conexión integral entre la viga cabezal y las vigas. La tendencia de los momentos positivos a aumentar y de los negativos a disminuir se observa en los diagramas de momento de la Figura 18, siendo los primeros mayores que los segundos en la zona alrededor del apoyo intermedio.

Figura 18.

Diagrama de momento envolvente de las vigas exteriores bajo la combinación Resistencia I.



6.2.2 Deflexión instantánea en vigas Las deflexiones máximas instantáneas de las vigas para cada tipología se listan en la Tabla 7 para cargas muertas, vivas y de Servicio I. En primer lugar,

se debe tener en cuenta que las deflexiones instantáneas por carga muerta se presentan en dos etapas: la primera debido al peso propio de la superestructura (DC1) en la que las vigas se deflecan como elementos simplemente apoyados y las deflexiones máximas son similares para las cuatro tipologías; y la segunda, debido a las cargas sobrepuestas (DC2+DW) donde a excepción de la TIP-1, aumenta la rigidez debido a las variaciones en la continuidad y/o conexión, ocasionando la disminución en las deflexiones instantáneas máximas.

Por otra parte, las deflexiones instantáneas por carga viva en las vigas de las tipologías dos, tres y cuatro disminuyen frente a los valores obtenidos en la TIP-1, siendo así que la continuidad en el tablero (TIP-2) proporciona una disminución del 4%. Por otra parte, el uso de vigas continuas (TIP-3) reduce la deflexión en un 23% y, por último, la conexión integral (TIP-4) genera reducciones del orden de 36% en las deflexiones instantáneas.

Tabla 7.

Deflexiones instantáneas de las vigas exteriores, bajo cargas muertas, vivas y Servicio I.

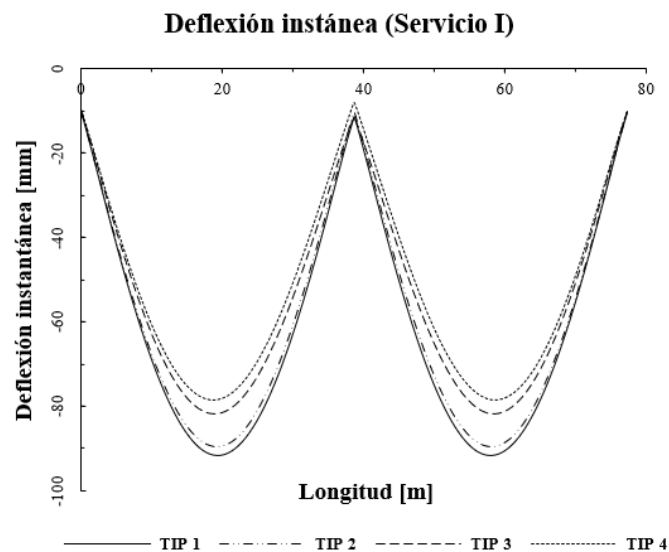
Caso	Deflexión instantánea [mm]						
	TIP 1	TIP 2	Δ	TIP 3	Δ	TIP 4	Δ
DC+	64	63	-1%	61	-5%	60	-6%
DW							
LL + IM	31	30	-4%	24	-23%	20	-36%
S1	95	93	-2%	84	-11%	80	-16%

Las deflexiones instantáneas bajo la combinación de carga de Servicio I (Ec. 2) se muestran en la Figura 19, donde se puede visualizar que para la TIP-1 y la TIP-2 la deflexión máxima se presenta en el centro de luz; sin embargo, para la TIP-3 y TIP-4 se observa que el punto de inflexión tiende levemente a la zona de los estribos, esto debido a que en la zona de apoyo intermedio se

presenta una mayor rigidez. La disminución en las deflexiones de las superestructuras continuas (TIP-3 y TIP-4) podrían ocasionar una reducción de la tensión del concreto en la parte inferior de las vigas con respecto a un sistema simplemente apoyado, disminuyendo de esta forma el agrietamiento en esta zona.

Figura 19.

Deflexión instantánea en las vigas exteriores bajo la combinación Servicio I



6.2.3 Respuesta Modal En la respuesta modal se estudiaron en detalle 6 de los 10 modos de vibración incluidos en el análisis. Estos modos corresponden a movimientos traslacionales (Tran) o rotacionales (Rotn) a lo largo de los ejes longitudinal (eje x), transversal (eje y) o vertical (eje z). Por cada modo de vibración (M) se extrajo el porcentaje de participación de masa (%P) con su respectivo período de vibración (T), valores que son listados en la Tabla 8 y ordenados de acuerdo

con la dirección de movimiento. En dicha tabla se encuentran resaltados los períodos que difieren en más de un 5% de los períodos de la TIP-1.

Tabla 8.

Respuesta modal de cada tipología.

Dirección del modo	TIP 1			TIP 2			TIP 3			TIP 4		
	% P	M	T [s]	% P	M	T [s]	% P	M	T [s]	% P	M	T [s]
Tran X	96.6	1	0.81	96.5	1	0.81	96.5	1	0.81	61.4	2	0.49
Tran Y	93.9	2	0.78	94.1	2	0.78	94.1	2	0.78	98.0	3	0.42
Tran Z	76.8	7	0.42	76.9	5	0.40	78.9	6	0.30	69.6	5	0.28
Rotn X	76.6	9	0.35	74.9	6	0.34	78.5	7	0.28	69.5	7	0.25
Rotn Y	61.3	8	0.42	62.6	4	0.41	62.5	4	0.42	42.1	4	0.33
Rotn Z	72.9	3	0.75	99.8	3	0.63	99.8	3	0.63	99.9	1	0.62

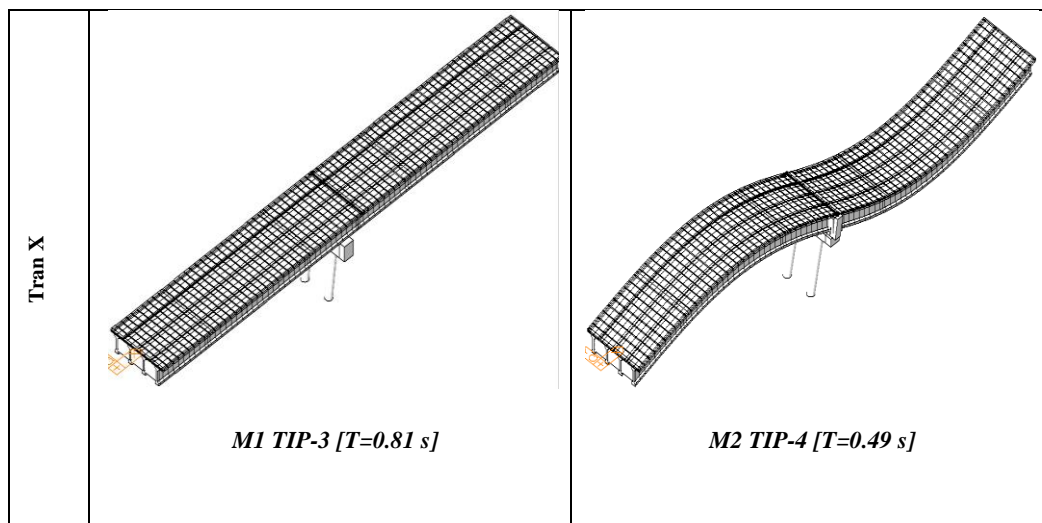
La respuesta modal del puente TIP-2 se diferencia de la TIP-1 en el modo Rotn Z, en el que disminuye su período de vibración debido a la restricción que genera el elemento de continuidad en el tablero. Esto también ocurre para la TIP-3, donde además del modo Rotn Z hay cambios, en el modo Tran Z y Rotn X, modos que hacen referencia a movimientos en dirección vertical. Por último, la respuesta modal de la TIP-4 cambia totalmente respecto de la TIP-1, puesto que ocurren disminuciones entre 17% y 46%.

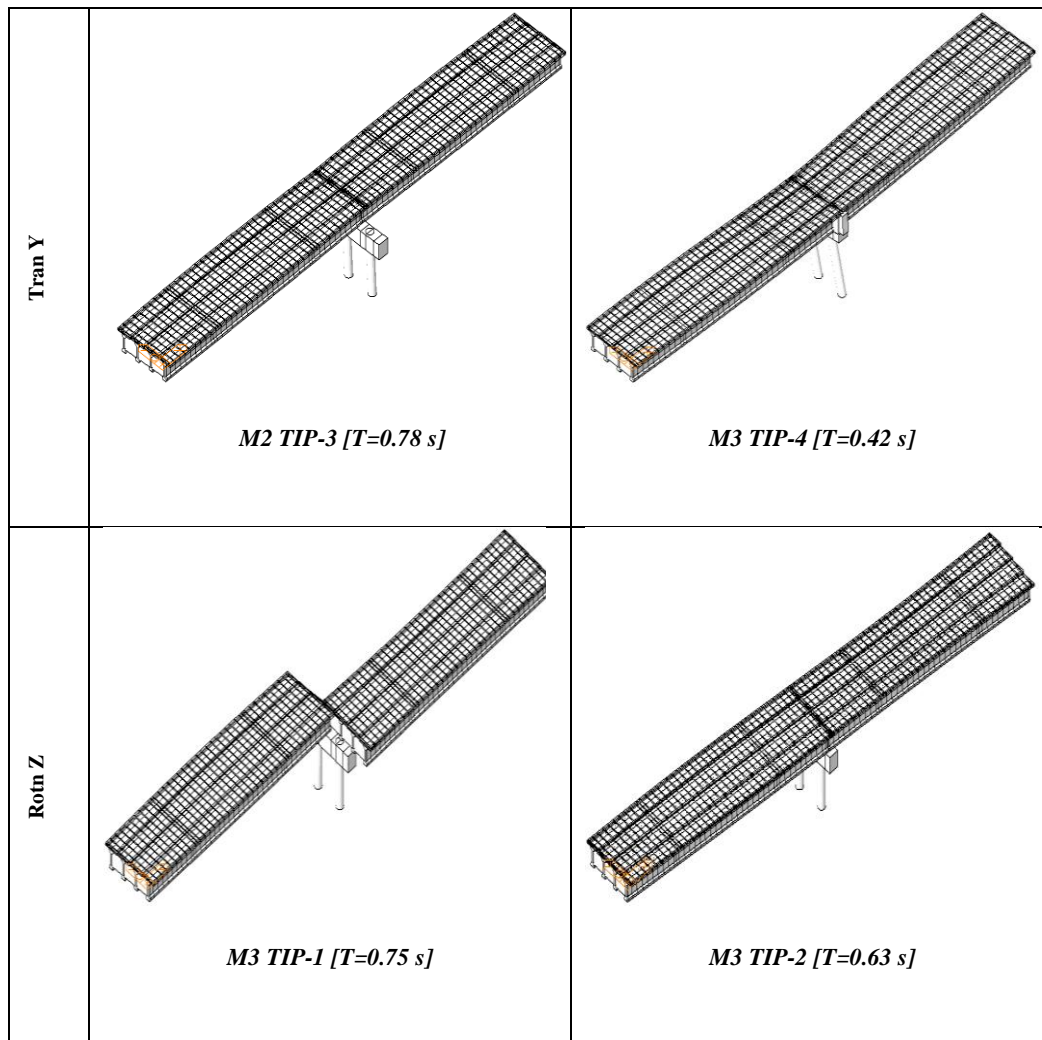
Los modos Tran X y Tran Y son los primeros dos modos de vibración para las tres primeras tipologías, los cuales presentan un comportamiento similar en los periodos de vibración y en los porcentajes de participación de masas; sin embargo, estas similitudes difieren del comportamiento en la TIP-4 para estos mismos modos, donde el período se acorta a causa de la rigidez debido a la conexión integral y el porcentaje de participación de masas cambia (Tabla 8). En adición, al observar la Figura 20 y comparar la TIP-3 con la TIP-4 en el modo Tran Y, podemos concluir que

la superestructura trabaja de forma independiente con la subestructura en la TIP-3, a diferencia del comportamiento monolítico de la TIP-4, debido a la conexión íntegra. Por otro lado, al comparar el modo Rotn Z de la TIP-1 con las otras tipologías, la TIP-1 trabaja de manera independiente para restringir el movimiento en esta forma modal; sin embargo, cuando se genera una continuidad ya sea parcial (TIP-2) o total (TIP-3 y TIP-4) permite que la superestructura trabaje de manera conjunta aumentando su rigidez y acortando el período de vibración de la estructura, como se visualiza en el Figura 20.

Figura 20.

Modos de vibración (M) Tran X, Tran Y & Rotn Z.





6.2.4 Respuesta sísmica en columnas Las fuerzas máximas internas en las columnas, tales como la fuerza axial, cortante y momento, así como las deformaciones en la parte superior de estos elementos se analizaron bajo la combinación de carga Evento Extremos I (Ec. 3). La fuerza sísmica se estudió en la dirección longitudinal del puente con la combinación de sus componentes horizontales $1X + 0.3Y$, así como en dirección transversal $1Y + 0.3X$. Estos valores junto con su respectivo cambio porcentual se listan en la Tabla 9.

Tabla 9.

Respuesta estructural de las columnas bajo la combinación de Evento Extremo 1.

Respuesta estructural de las columnas (Evento Extremo)								
Dirección	Respuesta Estructural	TIP-1	TIP-2	Δ [%]	TIP-3	Δ [%]	TIP-4	Δ [%]
Long 1X + 0.3	Axial [kN]	3676.2	3738.4	+2%	3892.1	+6%	3681.2	N.A.
	Cortante [kN]	193.4	204.4	+6%	205.0	+6%	464.8	140%
	Momento [kN*m]	1192.5	1135.4	-5%	1138.5	-5%	1525.2	28%
	Desplazamiento [mm]	53.4	48.6	-9%	48.7	-9%	40.7	-24%
Trans 1Y + 0.3	Axial [kN]	2949.8	3100.8	+5%	3265.4	+11%	2335.8	-21%
	Cortante [kN]	540.9	483.7	-11%	483.1	-11%	1042	93%
	Momento [kN*m]	1636.3	1459.9	-11%	1461.7	-11%	3211.6	96%
	Deformación [mm]	23.1	20.3	-13%	20.2	-13%	40.6	76%

En primera instancia, al analizar la respuesta estructural de las columnas debido a la fuerza sísmica en sentido longitudinal y tomando como referencia los resultados de la TIP-1, se obtuvieron los siguientes cambios: la fuerza axial aumentó un 2% y un 6% para la TIP-2 y TIP-3, respectivamente, en cambio para la TIP-4 no se presentó variación en esta respuesta. En la TIP-2 y TIP-3, la fuerza cortante aumentó un 6%, el momento disminuyó un 5%, y la deformación lateral de las columnas se redujo en un 9%. Por otra parte, en la TIP-4 la fuerza cortante y el momento flector de las columnas aumentaron 140% y 28%, respectivamente, con respecto a la TIP-1. Este incremento es más acentuado en esta tipología que en las otras debido a la conexión integral entre la subestructura y la superestructura, la cual produce que toda la estructura trabaje como un sistema tipo pórtico en dirección longitudinal permitiendo la transmisión de momento entre la superestructura y al apoyo intermedio; comportamiento que a su vez disminuye un 24% las

deformaciones de las columnas al deflectarse éstas en conjunto con la superestructura como se visualiza en el modo Tran-X de la TIP-4 en la Figura 20.

En segundo lugar, al analizar la respuesta estructural de las columnas debido a la fuerza sísmica en dirección transversal (1Y+0.3X) y compararlas con aquellas de la TIP-1 se tienen los siguientes resultados: la fuerza axial de las TIP-2 y TIP-3 aumenta un 5% y 11%, respectivamente, y disminuye en un 21% en la TIP-4; la fuerza cortante y el momento flector en la TIP-2 y TIP-3 disminuye con respecto a la TIP-1 en un 11%, caso contrario a la TIP-4 en donde las fuerzas cortantes y el momento aumentan hasta en un 93% y 96%, respectivamente. En el caso de las deformaciones en dirección transversal, la TIP-2 y TIP-3 aportan mayor rigidez en comparación a su componente perpendicular. Caso contrario sucede en la TIP-4 en la cual como se observa en el modo Tran-Y de la Figura 20 la superestructura no aporta la misma restricción que en el caso de la forma longitudinal generando en un aumento del 76%.

La comparación de los resultados anteriormente expuestos demuestra que generar continuidad parcial (TIP-2) o total (TIP-3) en la superestructura ocasiona que las fuerzas internas en las columnas y sus deformaciones se disminuyan, aportando una mejora estructural y una mayor rigidez al apoyo intermedio, especialmente en la dirección transversal. En cambio, el crear una conexión integral entre la superestructura y el apoyo intermedio se aumentan considerablemente las fuerzas internas y los desplazamientos de las columnas, siendo necesario un diseño más resistente para estos elementos.

7. Conclusiones

Las principales conclusiones obtenidas de la revisión literaria y del estudio analítico de la incidencia de la variación del tipo de continuidad y conexión entre la superestructura y el apoyo intermedio en la constructibilidad y el comportamiento estructural son:

Cambiar el tipo de continuidad y conexión entre la superestructura y la subestructura (soportes intermedios) con base en un sistema simplemente apoyado, ya sea para construir un proyecto nuevo o para llevar a cabo una reparación es posible al tener en cuenta que: para generar continuidad en el tablero, se recomienda el uso de losas de conexión flexible, así como el reforzamiento longitudinal de la parte superior del tablero; para generar continuidad en las vigas, se debe fundir un diafragma intermedio que conecte las vigas, asimismo, colocar refuerzo longitudinal y/o sistemas de postensionamiento externo en la zona de continuidad; para construir una conexión integral entre la superestructura y la subestructura en un puente nuevo se debe proveer continuidad del refuerzo de las vigas longitudinales, como de la viga cabezal en sentido vertical (conectores de cortante) y fundir un diafragma intermedio sobre la viga cabezal conectando así la superestructura con la subestructura.

Analizar la variación de continuidad y conexión entre la superestructura y el apoyo intermedio de un puente viga-losa simplemente apoyado mediante modelos numéricos requiere un análisis por etapas constructivas. Este análisis se realizó en el puente de estudio mediante la herramienta “Construction Stage” de Midas Civil, permitiendo en cada modelo de los puentes una superestructura simplemente apoyada en las etapas iniciales de construcción, y posteriormente en una determinada etapa realizar los cambios de continuidad y conexión mediante la inclusión de elementos tipo viga (“frame”) o elementos rígidos con propiedades específicas para generar el tipo de conexión.

Generar continuidad en el tablero de puentes simplemente apoyados reduce hasta un 2% las fuerzas cortantes y los momentos positivos máximos en las vigas bajo cargas gravitacionales. Sin embargo, se presenta un cambio apreciable al generarse momento negativo en la zona de continuidad, siendo necesario proveer refuerzo en la parte superior del tablero. Por otra parte, la rigidez que aporta esta continuidad a la superestructura bajo cargas muertas y vivas es despreciable, opuesta a la rigidez que proporciona ante la respuesta sísmica donde el tablero continuo restringe parcialmente la separación de los tramos simples. Adicionalmente este tipo de continuidad disminuye las fuerzas internas y los desplazamientos horizontales de las columnas del apoyo intermedio bajo fuerzas sísmicas.

Optar por una superestructura continua en comparación a un sistema simplemente apoyado ocasiona una mejora estructural en un puente viga-losa, siendo así que para el caso de estudio los momentos máximos positivos en las vigas disminuyeron hasta un 18% bajo cargas gravitacionales; sin embargo, debido a la generación del momento negativo en la zona de continuidad sobre el apoyo intermedio y el incremento de la fuerza cortante en esa zona se debe proveer refuerzo adicional o, en casos particulares, usar postensado externo. Además, las deflexiones en las vigas bajo carga viva disminuyeron un 23%, mostrando una mayor rigidez que un puente de vanos simples. Las fuerzas internas y los desplazamientos horizontales de las columnas debido a las fuerzas sísmicas se redujeron alrededor de un 10%.

Conectar integralmente la superestructura y el apoyo intermedio produce una respuesta estructural bajo cargas gravitacionales que es similar (pero no igual) a la de un puente continuo. En comparación con un puente simplemente apoyado, en el puente de conexión integral se logran reducciones de los momentos flectores positivos y de la fuerza cortante, aunque aparecen momentos negativos en la zona de conexión. En adición, la conexión integral incrementa la

rigidez y la redundancia del sistema, generando acortamientos de los períodos de vibración traslacionales y rotacionales del orden del 46 % y 29%, respectivamente. Este comportamiento trae consigo un aumento significativo de las fuerzas internas en las columnas bajo la carga sísmica. Por ejemplo, la fuerza cortante y el momento flector máximo en las columnas incrementó hasta un 140% y un 96%, respectivamente, lo cual podría requerir de un rediseño del pórtico. Se presenta en forma exacta el aporte del desarrollo del trabajo en concordancia a la justificación presentada. Se describe en forma lógica, los resultados del trabajo, dando respuesta a los objetivos o propósitos planteados. Basado en los resultados recolectados, incluido el tratamiento estadístico o cualitativo. Se muestra en forma concisa los productos y/o resultados y se resaltan las contribuciones del trabajo al contexto local, regional, nacional e internacional, cuando aplique.

8. Recomendaciones

Investigar la incidencia de los cambios de continuidad y conexión bajo cargas de temperatura, además del flujo plástico, retracción y fraguado del concreto.

Rediseñar cada tipología que se expuso en el presente artículo a fin de realizar no solo la comparación de la demanda estructural (como lo fue el caso de esta investigación), sino también conocer las diferencias en la capacidad estructural que producen las variaciones de continuidad y conexión entre la superestructura y el apoyo intermedio mencionadas en este documento en un puente viga-losa.

Referencias Bibliográficas

- Al-Ani, M., Murashev, A., Palermo, A., Andisheh, K., Wood, J., Goodall, D., & Lloyd, N. (2018). Criteria and guidance for the design of integral bridges. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Bridge Engineering*, 171(3), 143–154. <https://doi.org/10.1680/jbren.17.00014>
- Aquino Vasquez, D., & Hernandez Aldana, R. (2004). *Manual de construcción de puentes de concreto* [Universidad de el Salvador]. http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/2076/1/Manual_de_construcción_de_puentes_de_concreto.pdf
- Benjumea, J. (2020). Seismic performance analysis and assessment of a precast bridge computational model. *DYNA (Colombia)*, 87(212), 80–89. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n212.80143>
- Burke, M. (2009). *Integral and Semi-integral Bridges*.
- Cabañas, A. (2008). *Concreto presforzado*.
- Caner, A., Dogan, E., & Zia, P. (2002). Seismic performance of multisimple-span bridges retrofitted with link slabs. *Journal of Bridge Engineering*, 7(2), 85–93. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2002\)7:2\(85\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2002)7:2(85))
- Caner, Alp, & Zia, P. (1998). Behavior and design of link slabs for jointless bridge decks. *PCI Journal*, 43(3), 68–78. <https://doi.org/10.15554/pcij.05011998.68.80>
- Carranza, A. (2018). *Puentes Semi-Integrales Aplicación a Puentes Existentes*.
- Concreto, 360° en. (2013). El ABC del concreto preesforzado. *Argos*, 1–9.

- De la Cruz, C. (2005). *CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LAS JUNTAS DE EXPANSIÓN USADAS EN PUENTES, EN LA REPÚBLICA DE GUATEMALA*.
- Ekström, D., Rempling, R., & Plos, M. (2015). Industrial bridge construction: Need for a more effective bridge construction process. *ISEC 2015 - 8th International Structural Engineering and Construction Conference: Implementing Innovative Ideas in Structural Engineering and Project Management*, 1115–1120. <https://doi.org/10.14455/isec.res.2015.6>
- El-Safty, A., & Okeil, A. M. (2008). Extending the service life of bridges using continuous decks. *PCI Journal*, 53(6), 96–111. <https://doi.org/10.15554/pcij.11012008.96.111>
- Fomento, M. de. (2003). *Juntas para puentes de carretera*.
- Hastak, M., Mirmiran, A., Miller, R., Shah, R., & Castrodale, R. (2003). State of Practice for Positive Moment Connections in Prestressed Concrete Girders Made Continuous. *Journal of Bridge Engineering*, 8(5), 267–272. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0702\(2003\)8:5\(267\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0702(2003)8:5(267))
- Ho, E., & Lukashenko, J. (2011). Link slab deck joints. *2011 Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada - Transportation Successes: Let's Build on Them, TAC/ATC 2011, September*.
- Khaleghi, B., & Yen, W. P. (2018). Design and construction challenges of jointless bridges in seismic regions. *Maintenance, Safety, Risk, Management and Life-Cycle Performance of Bridges - Proceedings of the 9th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2018*, 2197–2204.
- Manuel Salvador Amaya Pico. (2017). Alternativa de Continuidad en Puentes con Vigas de Concreto Prefabricado. *Universidad Industrial de Santander*.

Martinez, F. (2011). *ESTUDIO SOBRE LA REDUNDANCIA ESTRUCTURAL DE PUENTES INTEGRALES DE HORMIGÓN*. 6–43.

MIDAS Information Technology Co. Ltd. (2016). *MIDAS User Manual*.

Ministerio de Fomento. (2000). *Guía para la concepción de puentes integrales en carreteras* (Centro de Publicaciones (ed.); Vol. 1).
http://www.carreteros.org/normativa/estructuras/otras/pdfs/p_integrales.pdf

Ministerio de Obras Públicas, T. y M. A. (1995). Nota técnica para aparatos de apoyo para puentes de carretera. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 1–45.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Moloy, D. (n.d.). A New Post-Tensioned Continuity Detail for Super Tees. *Conferencia de Puentes Pequeños En Australia*.

Muñoz, E., Hernández, R., Valbuena, E., Trujillo, L., & Santacruz, L. (2005). Rehabilitación de los puentes de la Red de carreteras de Colombia, basados en inspecciones visuales, estudios especializados y estrategias de reparación. *Revista Ingenieria de Construccion*, 20(1), 159–182.

Muñoz, E., & Valbuena, E. (2007). Evaluation of the Condition of Steel Bridges of the. *Bogotá, Colombia*, 4(40), 125–140.

Seminario, E. (2004). *Guía para el diseño de puentes con vigas y losas*. 169.

Taha, M. M. M., & Jia, Y. (2018). Post-Tensioning the Connection Region of Precast Post-Tensioned Bridge Girders for Continuity. *Stavební Obzor - Civil Engineering Journal*, 27(1), 34–47. <https://doi.org/10.14311/cej.2018.01.0004>

- Vargas, S. V., & Villalobos, E. (2017). *Xiv Seminario De Ingeniería Estructural Y Sísmica San José , Costa Rica 10 Al 11 , Agosto 2017 El Caso De La Durabilidad Y Los Puentes Integrales*. 1–18.
- Villalobos, E. (2017). *Eliminando las juntas de expansión: Los puentes integrales y semi-integrales*. 2(2215–4566), 1–12.
- Wang, W. W., Dai, J. G., Huang, C. K., & Bao, Q. H. (2011). Strengthening multiple span simply-supported girder bridges using post-tensioned negative moment connection technique. *Engineering Structures*, 33(2), 663–673. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.11.025>
- Yamin, L. E., & Ruiz, D. (2001). Vulnerabilidad Sísmica De Puentes En Colombia Y Estrategias Para Rehabilitación. *Revista de Ingeniería*, 0(13), 74-80–80. <https://doi.org/10.16924/riua.v0i13.550>

Apéndice

Apéndice A. Primera tipología.

Figura B1. Primera tipología

