

Pasantía de Investigación Análisis de la Influencia del Número de Riostras Intermedias en la
Distribución de Carga Variable Vehicular y la Respuesta Estructural de un Puente de Vigas
Prefabricadas

José Miguel Parra Benítez

Proyecto de grado para optar al título de ingeniero Civil

Director

José Miguel Benjumea Royero

Ph.D En ingeniería civil y ambiental

Codirector

Vladimir Guilherme Haach

Ph.D En ingeniería civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2020

Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Objetivos	16
1.1 Objetivo General.....	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2. Metodología	17
2.1 Aspectos generales del puente estudiado	17
2.2 Modelado estructural	19
2.3. Factores de distribución (FD)	22
2.3.1 Factores de Distribución obtenidos a partir del Método de elementos finitos (MEF)	23
2.3.2 Métodos analíticos	25
2.3.4. Casos de estudio de las líneas de influencia.....	27
2.4 Respuesta estructural del puente	28
3. Análisis y Resultados	31
3.1 Factores de Distribución	31
3.1.1. Efectividad de los métodos analíticos de Engesser-Courbon y Fauchart con relación a los resultados calculados con el MEF.....	31
3.1.2 Influencia del número de riostras intermedias en los factores de distribución de carga de las vigas externas e internas calculadas con el MEF.	37
3.2 Envoltentes de fuerzas internas.....	39

3.3 Deflexiones máximas.....	44
4. Conclusiones	45
5. Recomendaciones.....	47
Referencias Bibliográficas	48

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Detalle de riostras de concreto reforzado fundido i-situ conectadas a vigas prefabricadas.	10
Figura 2. Alternativas constructivas de diafragmas intermedios: diafragmas metálicos con conexiones pernadas.	11
Figura 3 Alternativas constructivas de diafragmas intermedios: diafragmas temporales de madera.	12
Figura 4. Dimensiones del puente de estudio.	17
Figura 5. Vista en planta de los modelos de Puente.....	19
Figura 6. Localización de elementos longitudinales de la grilla de elementos frame y anchos tributarios.	21
Figura 7. Conexión Diafragma-Viga.	22
Figura 8. Posición transversal de casos de carga aplicados y definición de los sectores de Section Cut,.....	24
Figura 9. Secciones de estudio empleadas.	24
Figura 10. Carga viva vehicular de diseño descrita en el CCP14.	29
Figura 11. Carga viva vehicular de diseño descrita en la NBR 7188.	29
Figura 12. Evaluación de los FD de los métodos analíticos respecto a los calculados con el MEF, (viga interna).	34

Figura 13. Evaluación de los FD de los métodos analíticos respecto a los calculados con el MEF, (viga interna)..... 35

Figura 14. Líneas de influencia transversal de la viga externa, (a) puente N3, sección S4, (n) puente N2 sección S2. 36

Figura 15. Líneas de influencia transversal de la viga interna, (a) puente N3, sección S4, (n) puente N2 sección S2. 37

Figura 16. Líneas de influencia transversal de carga para cada configuración de riostras en la sección S4, (a) viga exterior, (b) viga interior. 39

Figura 17. Envolventes de fuerzas y momentos internos calculados con base a la aplicación de la carga vehicular del CCP14, (a) cortante, (b) momento flector, (c) torque. 40

Figura 18. Reducción de las fuerzas y momentos internos usando la carga vehicular del CCP14 41

Figura 19. Reducción de las fuerzas y momentos internos usando la carga vehicular de la NBR 7188..... 43

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Valores máximos de los factores de distribución determinados.....	33
Tabla 2. Valores máximos de los FD de carga en función del número de riostras y sección de estudio.....	38
Tabla 3. Variación de los FD de carga respecto al puente N0.....	38
Tabla 4. Valores máximos de las envolventes de fuerzas y momentos internos.	41
Tabla 5. Valores de deflexión máxima en función del número de riostras y el tipo de carga viva vehicular.....	44

Lista de Apêndices

Ver apêndices adjuntos al documento que pueden visualizarse en la base de datos de la biblioteca UIS.

Apêndices A. Comparación de la discretización del modelo de puente

Apêndices B. Metodología utilizada para la determinación de los factores de distribución de carga

Apêndices C. Método de Engesser-Courbon

Apêndices D. Método de Fauchart

Apêndices E. Líneas de influencia transversal

Apêndices F. Envolventes de fuerzas y momentos internos con base a la NBR7188

Resumen

Título: Análisis de la influencia del número de riostras intermedias en la distribución de carga variable vehicular y la respuesta estructural de un puente de vigas prefabricadas*

Autor: José Miguel Parra Benítez**

Palabras Clave: puente, vigas prefabricadas, riostras, diafragmas intermedios, factor de distribución, Engesser-Courbon, Fauchart, método de elementos finitos.

Descripción

Los diafragmas intermedios en puentes de vigas prefabricadas son elementos estructurales utilizados como soporte que conecta transversalmente las vigas. Se considera que estos elementos contribuyen en la distribución de cargas verticales o transversales aplicadas en el tablero y proporcionan estabilidad a las vigas durante su construcción. Debido al complejo trabajo constructivo que resulta unir un diafragma intermedio con una viga prefabricada, además de los tiempos y costos involucrados en esta operación, se ha cuestionado su verdadera utilidad en el puente. El presente proyecto consiste en determinar, mediante un análisis paramétrico, la influencia del número de diafragmas intermedios (riostras) en la distribución de cargas verticales y la respuesta de la superestructura de un puente simplemente apoyado con vigas prefabricadas. Se analizaron paraméricamente cuatro tipos de configuraciones de diafragma intermedio utilizando un modelo computacional para el puente. Los resultados de distribución de carga fueron contrastados con los calculados mediante los métodos analíticos de Engesser-Courbon y Fauchart con el fin de conocer la efectividad de estos métodos. La respuesta estructural se determinó en términos de deflexiones máximas y envolventes de cortante, momento y torque en las vigas. Los resultados mostraron que los diafragmas intermedios influyen en mayor medida la distribución de carga en las vigas internas siendo las secciones transversales que coinciden con la ubicación del diafragma las que presentan mejor distribución. En cuanto a la respuesta estructural, las vigas internas presentan mayor reducción en los valores máximos de las envolventes calculadas, mientras que en las vigas externas no hay variaciones del momento flector y deflexión máxima con el número de riostras. El aumento del número de riostras intermedias disminuye de manera proporcional los valores máximos de las envolventes de torque y cortante, el momento flector y las deflexiones se mantuvieron constantes al incrementar este número.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director

Abstract

Title: Analysis of the influence of the number of intermediate braces on the variable vehicular load distribution and the structural response of a precast girder bridge *

Author: José Miguel Parra Benítez **

Keywords: bridge, precast girders, intermediate diaphragms, distribution factor, Engesser-Courbon, Fauchart, finite element method.

Description

The intermediate diaphragms in bridges with precast girders are structural elements used as a support that transversely connects the girders. Their function is to contribute to the distribution of vertical or transverse loads applied to the deck and to provide stability to the beams during construction. Due to the complex construction activities that results from joining an intermediate diaphragm with a prefabricated girder, in addition to the time and costs involved in this operation, the usefulness of intermediate diaphragms has been questioned. This project was aimed to determine the influence of the number of intermediate diaphragms in the distribution of vertical loads and the response of the superstructure of a simply supported bridge with precast girders. Four types of intermediate diaphragm configurations were parametrically analyzed using a computational model of the bridge. The load distribution results from that model were contrasted with those calculated using the Engesser-Courbon and Fauchart methods in order to determine their effectiveness. The structural response was determined in terms of maximum girder deflections and envelopes of shear, moment and torsion. The results showed that the intermediate diaphragms have a greater influence on the load distribution of interior girders, with the cross sections that coincide with the location of the diaphragm having the best distribution. Regarding the structural responses, the interior girders had a larger reduction in the maximum values of the calculated envelopes, whereas the exterior girders showed no reductions in deflections and bending moments. Increasing the number of intermediate diaphragms proportionally decreases the maximum values of the shear and torque envelopes, the bending moment and the deflections remained constant when this number increased.

* Proyecto de grado

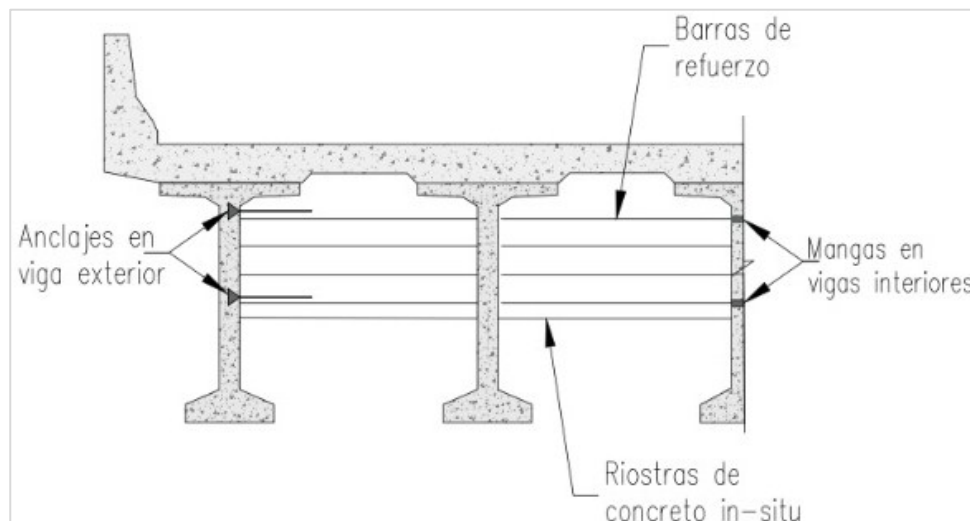
** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director

Introducción

Los puentes construidos con elementos prefabricados pueden reducir los tiempos y costos de construcción en sitio, mientras aumentan la calidad estructural (Vargas Sanabria, 2017). Sin embargo, estas estructuras presentan retos durante su construcción como las dificultades en el transporte y montaje de las piezas prefabricadas, y la conexión entre los elementos prefabricados o in-situ (Hué Garcia, 2007). Esta última ha puesto en debate el uso de elementos estructurales como los diafragmas intermedios de concreto reforzado, también conocidos como riostras (Figura 1) puesto que deben mantenerse conectados con las vigas para garantizar su función en el puente.

Figura 1.

Detalle de riostras de concreto reforzado fundido i-situ conectadas a vigas prefabricadas.

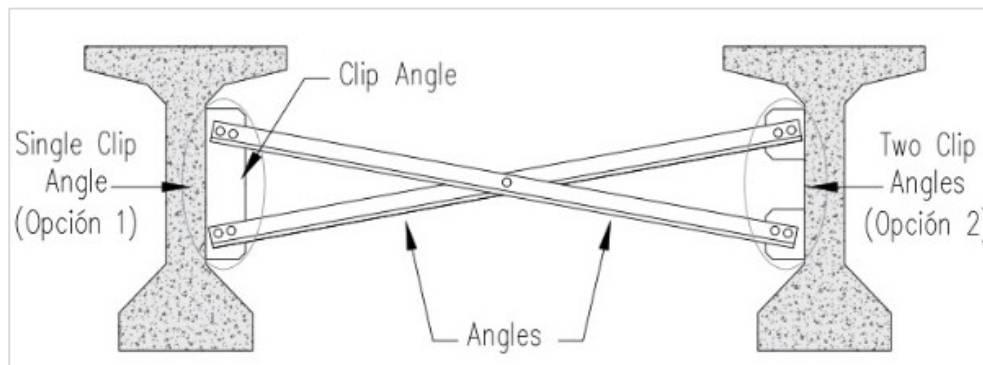


Nota. basado en PCI 2011 (The PCI Bridge Design Manual Steering Committee, 2011)

Según Dupaquier (Dupaquier, Marshall, & Stallings, 2015), los diafragmas intermedios en puentes con vigas prefabricadas pueden cumplir las siguientes funciones: (1) proporcionar estabilidad temporal a las vigas durante la construcción, hasta que el tablero se funda y tenga suficiente rigidez para controlar los problemas de pandeo lateral; (2) mejorar la distribución de cargas verticales entre las vigas que son aplicadas en el tablero y (3) transferir y extender una carga de impacto horizontal de un vehículo hacia las vigas adyacentes. Debido al complejo trabajo constructivo que resulta unir transversalmente un diafragma de concreto armado con una viga prefabricada, el tiempo y costo relativamente alto que esto conlleva y los requisitos de seguridad involucrados durante la construcción y desencofrado, en países como Estados Unidos se ha optado por reemplazar el diafragma convencional de concreto armado por diafragmas metálicos con conexiones pernadas a las vigas (Figura 2), o incluso, se han eliminado permanentemente los diafragmas intermedios en el puente, usando únicamente riostras temporales de madera usadas durante su construcción (Figura 3).

Figura 2.

Alternativas constructivas de diafragmas intermedios: diafragmas metálicos con conexiones pernadas.



Nota. basado en Dupaquier et al. (Dupaquier, Marshall, & Stallings, 2015)

Figura 3

Alternativas constructivas de diafragmas intermedios: diafragmas temporales de madera.



Nota. basado en AASHTO LRFD 2014 (American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2012)

Las especificaciones de AASHTO LRFD 2014 (American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2012), del cual está basada la Norma Colombiana de Diseño de Puentes (en adelante CCP14) (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2014), indica en el artículo 2.3.3.3 que los diafragmas intermedios ayudan a distribuir las cargas vivas vehiculares y a proporcionar estabilidad a las vigas hasta que se haya fundido el tablero; sin embargo, la metodología aproximada que recomienda para determinar los factores de distribución de momento y cortante que son usados en el diseño de las vigas (Artículo 4.4.2) no considera de forma explícita la presencia de riostras intermedias en las ecuaciones de dichos factores.

Desde el punto de vista analítico, se ha demostrado que los diafragmas intermedios contribuyen en la distribución transversal de las cargas de servicio verticales entre vigas adyacentes y reducen las deflexiones máximas de las vigas. En 1973, Wong y Gamble (Wong &

Gamble, 1973) completaron uno de los primeros estudios mediante un análisis paramétrico con varios tipos de geometrías de puentes rectos, simplemente apoyados y continuos, con el fin de determinar el efecto de los diafragmas intermedios y la continuidad de las vigas en las distribuciones de carga. Los autores encontraron que los cambios en los momentos máximos no eran sensibles a las rigideces intermedias del diafragma, siendo los efectos del diafragma intermedio más pronunciados en puentes simplemente apoyados que en puentes continuos. Abendroth et al. (Abendroth, Klaiber, & Shafer, 1995), observaron que la distribución de la carga vertical era casi independiente del tipo y ubicación de los diafragmas intermedios. La investigación se realizó con base a un análisis de elementos finitos de un puente de concreto reforzado, de una luz, con ocho configuraciones distintas de diafragmas intermedios que incluían diafragmas de concreto reforzado y acero estructural. Araujo et al. (Araujo, Cai, Chandolu, Avent, & Alaywan, 2007) demostraron que la forma en que se modela la conexión de los diafragmas intermedios con las vigas principales afecta significativamente las deflexiones y la distribución de cargas verticales. Los autores llegaron a esta conclusión a partir de resultados de simulación computacional mediante elementos finitos de dos puentes rectos simplemente apoyados con longitud de 33.54 m y 39.63 m. En el estudio se analizaron tres casos de conexión diafragma-viga: conexión de momento rígido, conexión considerando 30% de la rigidez total del diafragma y conexión libre de momentos; los autores concluyeron que para poder indicar cual es en realidad el verdadero aporte de los diafragmas intermedios se debe conocer el aporte de la rigidez total del diafragma, que está directamente relacionada con la forma que se construyó la conexión y la magnitud de la carga que se le imponga. Por otra parte, Dupaquier (Dupaquier, Marshall, & Stallings, 2015) realizó una encuesta detallada de las prácticas de diseño de puentes de concreto y acero en diferentes estados de Estados Unidos, concluyendo que existe un consenso sobre el uso primordial de diafragmas

intermedios durante la construcción del puente para prevenir rotaciones torsionales de las vigas, durante las operaciones de erección de las vigas y colocación del tablero. Sin embargo, hasta la fecha no se cuenta con suficientes investigaciones que evalúen el efecto de los diafragmas intermedios en puentes de luz mediana o corta con vigas prefabricadas que estén sometidos a cargas vehiculares como las descritas en la norma CCP14 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2014).

Debido a que la implementación de puentes con vigas prefabricadas (pretensadas o postensadas) en países latinoamericanos como Colombia o Brasil ha puesto en debate la práctica actual de emplear diafragmas intermedios permanentes, en lugar de temporales, y teniendo en cuenta que la normativa vigente para el diseño de puentes no considera dichas ventajas en las expresiones de los factores de distribución, surge la necesidad de determinar la incidencia de estos elementos en la respuesta de puentes con vigas prefabricadas bajo el efecto de la carga viva vehicular que se describe en la Norma Colombiana de Diseño de Puentes (CCP14) [7] y la Norma Brasileña de la Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT NBR) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

Para atender al vacío de conocimiento descrito previamente, se desarrolló el presente proyecto de grado que fue realizado mediante modelos computacionales de un puente de un vano con vigas prefabricadas y cuatro configuraciones de diafragmas intermedios (de uno a tres diafragmas y sin diafragma). Los resultados de distribución de carga obtenidos del modelo de elementos finitos (MEF) fueron contrastados con los calculados mediante los métodos aproximados de Engesser-Courbon y Fauchart, con el fin de conocer la efectividad de estos métodos para capturar el efecto del número de riostras en el puente. Además de los factores de distribución también se analizó el efecto que tiene el número de diafragmas intermedios en la

respuesta estructural del puente en términos de deflexiones y envolventes de fuerzas y momentos internos.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Determinar, mediante análisis paramétrico, la influencia del número de riostras intermedias en la distribución de carga viva vehicular y en la respuesta de la superestructura de un puente simplemente apoyado con vigas prefabricadas bajo los requisitos del CCP14.

1.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar modelos computacionales de puentes con vigas prefabricadas y diferentes configuraciones de riostras que capturen de manera adecuada la distribución de carga viva vehicular.
- Comparar la precisión de los métodos de Engesser-Courbon y Fauchart con relación a los resultados obtenidos de un modelo computacional para la determinación de la distribución de carga viva en vigas prefabricadas de un puente.
- Determinar el efecto del número de riostras intermedias en las deformaciones y fuerzas de vigas prefabricadas de un puente por la aplicación de cargas vivas vehiculares.

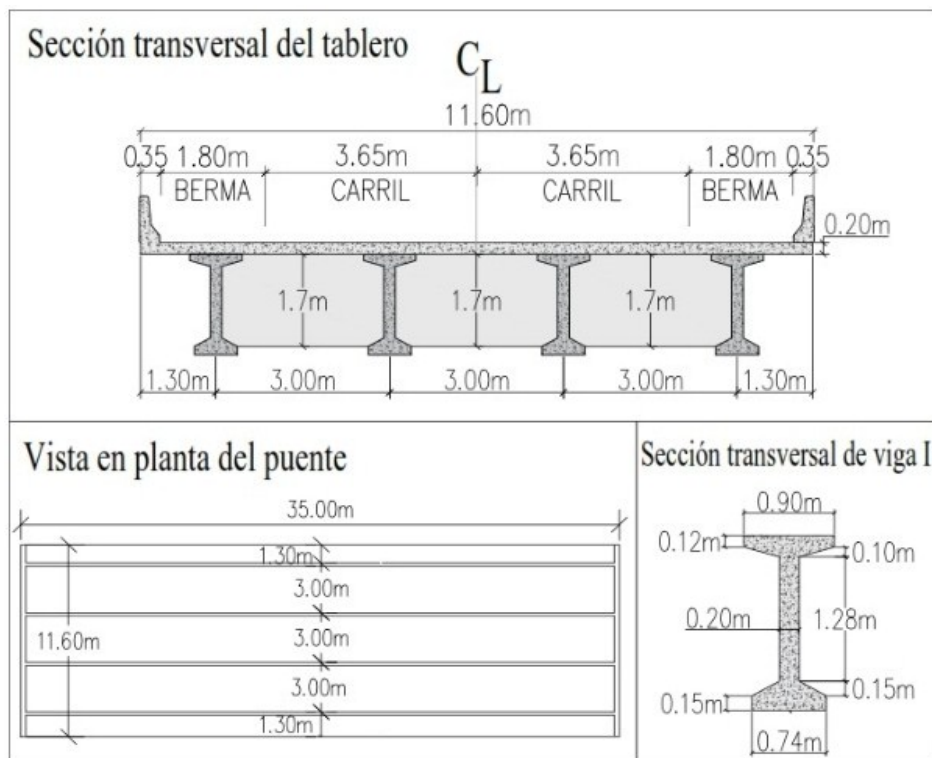
2. Metodología

2.1 Aspectos generales del puente estudiado

El estudio fue realizado con base a la superestructura de un puente viga losa de concreto reforzado, simplemente apoyado y con longitud y ancho de 35 m y 11.60 m, respectivamente (Figura 4).

Figura 4.

Dimensiones del puente de estudio.



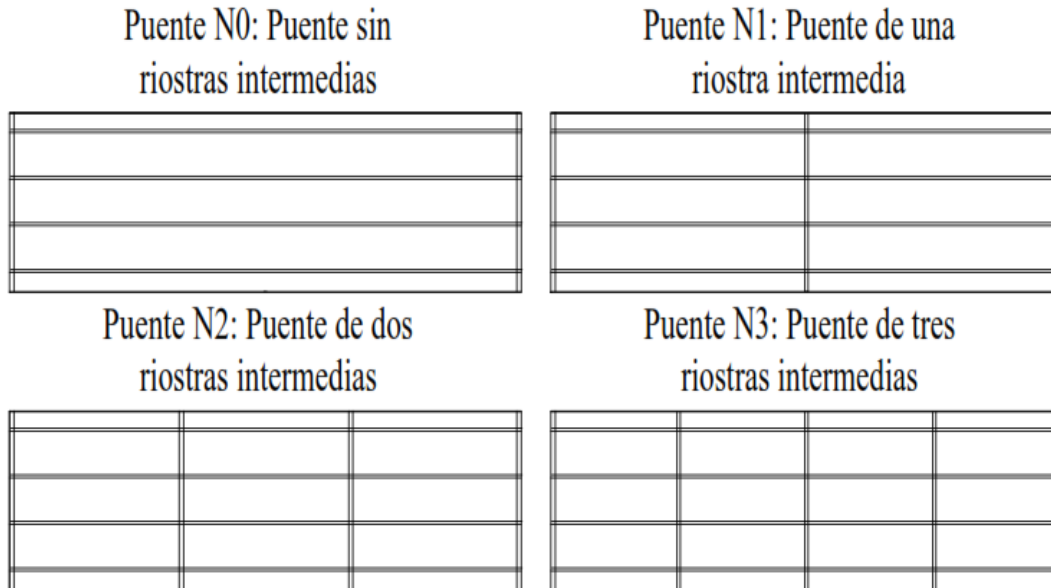
Las dimensiones de los elementos de la superestructura fueron seleccionadas de modo tal que represente las prácticas actuales de diseño y construcción en Colombia. La sección transversal se compone de cuatro vigas prefabricadas de sección constante tipo I ($h = 1.8$ m), separadas 3 m entre ejes, que son conectadas a una losa maciza de concreto reforzado de espesor 0.20 m. El puente posee dos carriles de 3.65 m de ancho, dos bermas de 1.8 m de ancho y barreras tipo New Jersey en los extremos del tablero con voladizos.

Las vigas y riostras se asumieron de concreto con resistencia máxima a la compresión (f'_c) igual a 35 MPa y módulo de elasticidad (E) de 28427 MPa, mientras que el tablero es de concreto con $f'_c = 28$ MPa y $E = 25426$ MPa. El coeficiente de Poisson (λ) de ambos materiales que fue usado en los análisis es de 0.2.

Para determinar el efecto del número de riostras en la distribución de cargas verticales y en la respuesta de la estructura se realizaron cuatro modelos distintos, cuya variación fue el número de riostras intermedias que incrementó de cero a tres. Las riostras intermedias tienen sección rectangular (0.3x1.7 m) y están ubicadas simétricamente respecto del centro de luz (Figura 5). Además, todos los modelos cuentan con dos riostras en la zona de estribos con sección rectangular de 0.3x1.6 m. Para efectos prácticos se asumieron las notaciones mostradas en la (Figura 5). No se incluyeron pendientes longitudinales y transversales en el análisis y no se tomaron en cuenta efectos inherentes a la aplicación de presfuerzo en las vigas.

Figura 5.

Vista en planta de los modelos de Puente.



2.2 Modelado estructural

Los modelos computacionales de la superestructura del puente fueron desarrollados en los programas SAP2000 (CSi, 2018) para la determinación de los factores de distribución de carga, momento y cortante; y CSi Bridge (CSi, 2019) para la determinación de la respuesta estructural del puente por la aplicación de carga vehicular.

El método de elementos finitos (MEF) del cual se basan los softwares de cálculo de estructuras, se usa ampliamente en el análisis de problemas de ingeniería compuestos por sistemas gobernados por ecuaciones diferenciales e integrales. Como estas ecuaciones no siempre son fáciles de resolver analíticamente, el MEF divide el problema en varios elementos más pequeños y fáciles de resolver (de Oliveira, Figueiredo, Dieter Franzke, Ribas Lugarini, & de Oliveira, 2018). Se usaron dos tipos de elementos finitos, a saber, elementos tipo *frame* (elementos

longitudinales conformados por dos nodos, cada uno de seis grados de libertad) y elementos tipo *Shell* (elementos de área conformados por tres o cuatro nodos, cada uno de seis grados de libertad).

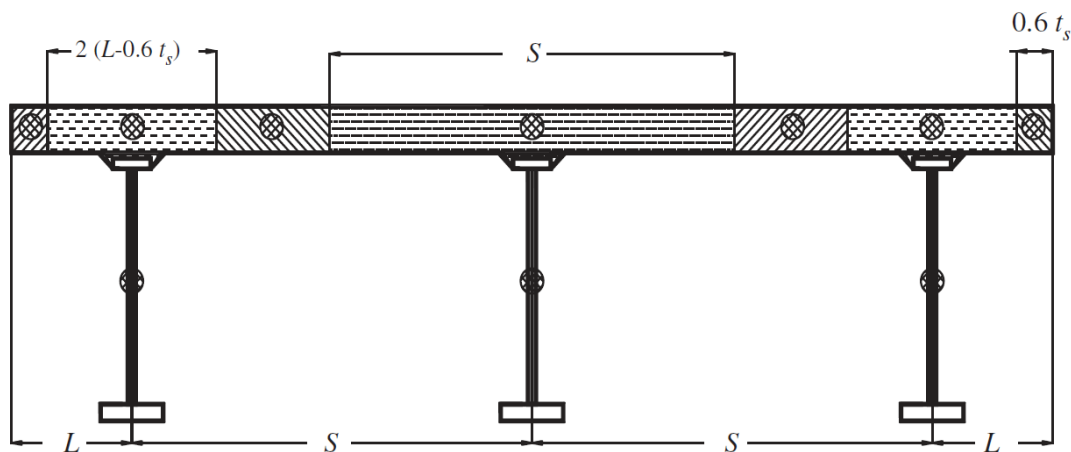
Para capturar de manera adecuada la influencia del número de riostras en la superestructura del puente se realizaron algunas calibraciones que permitieran elegir el tipo y discretización adecuada de los elementos que representarían las vigas, riostras y el tablero. En primer lugar, mediante la comparación de los valores máximos de momento flector y cortante debido a la aplicación de una carga estática, se evaluaron dos modelos del puente N0 conformados de distintos elementos finitos, uno compuesto únicamente de elementos tipo *frame* y el otro compuesto de elementos tipo *Shell* y *frame*. Los resultados mostraron una diferencia inferior al 5% entre los dos tipos de elementos (anexo A) por lo tanto se decidió usar únicamente elementos tipo *frame* debido al menor tiempo requerido por el software para el análisis de la estructura. Luego, para definir los niveles en altura en los que se iba a construir el modelo de la superestructura, se realizó la misma comparación de los valores máximos de momento flector y cortante determinando la diferencia de los resultados al utilizar elementos *Link Rigid* que separan en altura los elementos en la superestructura, con los resultados obtenidos al aplicar la herramienta *Offset* en las vigas, riostras y tablero, representando toda la superestructura en un solo nivel. Se decidió tomar la configuración con elementos *Link Rigid* debido a que no se encontró diferencia alguna en los resultados y puesto que era más fácil separar en varios nodos los diferentes niveles de la superestructura.

Para el modelado del tablero mediante el uso de elementos *frame* se tomaron en cuenta las recomendaciones de Amirhormozaki et al. (Amirhormozaki, Pekcan, & Itani, 2015), donde se determinó la separación horizontal y vertical de la grilla que conforma el tablero, así como las secciones transversales de cada uno de los elementos que la conforman (Figura 6). Para las macizas, se supone que el flujo de cizallamiento vertical ocurre a $0.3t_s$ del borde del tablero

(Amirihormozaki, Pekcan, & Itani, 2015), donde t_s es el espesor del tablero. Por lo tanto, la línea central de las “vigas de borde” en el tablero se encuentra a una distancia igual a $0.3t_s$. Las dos vigas de borde representan el flujo de cortante vertical de la losa con un espaciado de $0.6t_s$ y una altura igual al espesor de la losa. Los elementos longitudinales principales se ubican a nivel de espesor medio de losa y se ubican simétricamente con respecto al eje que pasa por el espesor del alma de las vigas. Para las vigas internas, el ancho de estos elementos fue igual al ancho efectivo de la aleta.

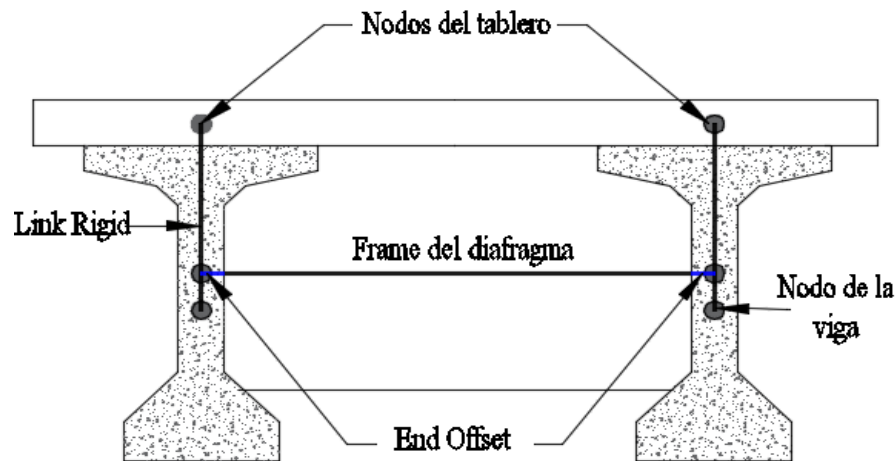
Figura 6.

Localización de elementos longitudinales de la grilla de elementos frame y anchos tributarios.



Nota. Tomado de: Amirihormozaki et al. (Amirihormozaki, Pekcan, & Itani, 2015)

Por último, con base a las recomendaciones de Araujo et al. (Araujo, Cai, Chandolu, Avent, & Alaywan, 2007), las conexiones de las vigas con las riostras se definieron como rígidas mediante la asignación de *End Offset* en los elementos *frame* que representan las riostras (Figura 7), asumiendo que la conexión diafragma-viga es completamente rígida con el fin de evaluar el caso donde mejor trabajan las riostras.

Figura 7.*Conexión Diafragma-Viga.*

2.3. Factores de distribución (FD)

La superestructura del puente estudiado se compone por una losa flexible y un sistema de vigas longitudinales y transversales (riostros). Las cargas verticales aplicadas sobre la losa se distribuyen sobre todos los elementos de la superestructura en función de la rigidez relativa de estos (Longo , 1979). Según Alves (Alves, 2004), la distribución de carga se puede determinar a través de coeficientes llamados factores de distribución que estimen el porcentaje de carga que recibe cada elemento estructural con respecto al total aplicado. Estos factores permiten analizar la respuesta de cada elemento estructural debido a la aplicación de cargas ubicadas en cualquier posición. Dicha respuesta puede representarse mediante gráficos como las líneas de influencia transversal para una sección específica, en las cuales se presenta el porcentaje de cargas, fuerzas o esfuerzos internos que recibe una viga debido a la aplicación de una carga unitaria en cualquier posición transversal del tablero. Las líneas de influencia transversal se determinan al graficar los

factores de distribución respecto a su posición transversal y se deben obtener para cada sección del puente, si estas cambian.

Para el presente estudio se calcularon los factores de distribución de momento, cortante y carga mediante los modelos de elementos finitos descritos previamente y mediante los métodos analíticos de Engesser-Courbon y Fauchart, que corresponden a métodos simplificados utilizados en el análisis de puentes para la determinación de los factores de distribución de carga en una superestructura. Las siguientes secciones describen la metodología utilizada para calcular los factores de distribución y la descripción de los casos de estudio para la evaluación de dichos factores.

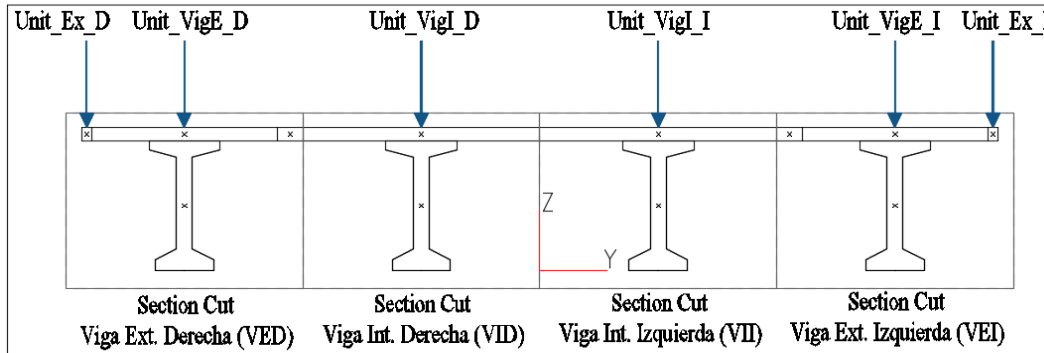
2.3.1 Factores de Distribución obtenidos a partir del Método de elementos finitos (MEF)

- **Factores de distribución de momento y cortante**

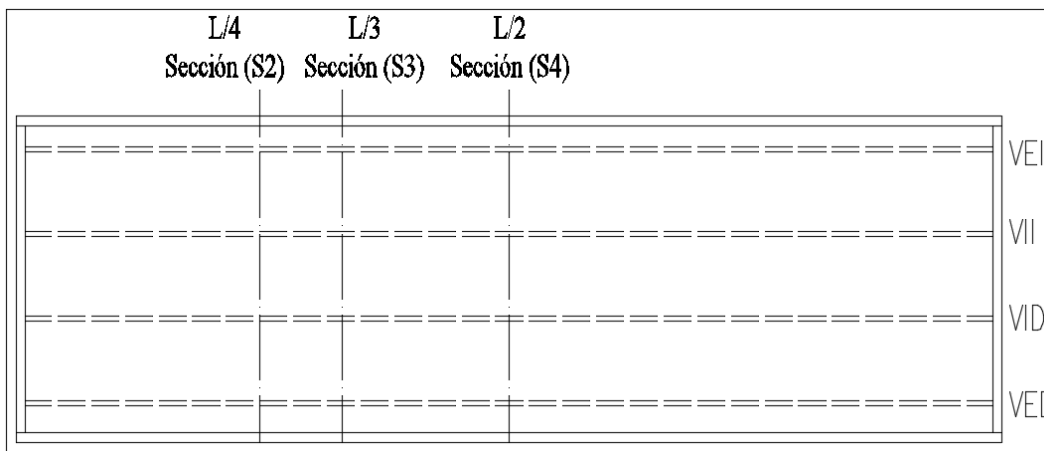
Para determinar los factores de distribución transversal de momento y cortante, fueron utilizados casos con cargas unitarias (1 kN) aplicadas transversalmente en seis puntos distintos (Figura 8), una a la vez. La ubicación trasversal de las cargas corresponde a posiciones clave en el tablero, mientras que longitudinalmente fueron aplicadas en tres secciones de estudio ubicadas a un cuarto, un tercio y en la mitad de la luz del puente (Figura 9). Las fuerzas internas como el momento flector y el cortante de cada viga compuesta (viga y tablero actuando en conjunto) se determinaron mediante la herramienta Section Cut del software SAP2000, usando las regiones señaladas en la Figura 8. Los factores de distribución se determinaron como el porcentaje de momento o cortante que toma cada viga compuesta con respecto al total presente en la sección de estudio.

Figura 8.

Posición transversal de casos de carga aplicados y definición de los sectores de Section Cut.,

**Figura 9.**

Secciones de estudio empleadas.



- **Factor de distribución de carga**

Para determinar los factores de distribución de carga se utilizaron los diagramas de cortante correspondientes a los casos de cargas unitarias indicados anteriormente. Sin embargo, en este caso los cálculos estuvieron centrados en determinar la magnitud de la “reacción” de cada una de las vigas en una sección específica. Los cálculos se realizan asumiendo que los nodos de cada una de las vigas localizados en la sección de estudio son apoyos flexibles que generan una reacción

vertical al aplicar una carga unitaria. La reacción se determinó como la diferencia de los valores del cortante en la viga compuesta antes y después de la sección de interés. El factor de distribución de carga de cada viga se determinó como el cociente de la reacción de dicha viga sobre la sumatoria de las reacciones de todas las vigas. Debido a la naturaleza estática de las cargas utilizadas, dichas reacciones se pueden calcular a partir de los diagramas de cortante de los elementos longitudinales o transversales, lo cual facilita la obtención de los factores de distribución para los casos donde hay presencia de una riostra intermedia en la sección de estudio. Los cálculos realizados en detalle se encuentran en el Anexo B.

2.3.2 Métodos analíticos

- **Método de Engesser-Courbon**

El método fue creado en 1940 y fue desarrollado para vigas paralelas, de inercia constante y unidas perpendicularmente mediante riostras de rigidez infinita. Además, en el método se desprecia la rigidez torsional de las vigas (Alves, 2004). Al adoptar dichas hipótesis, los elementos transversales poseen deformaciones lineales y sus desplazamientos verticales se describen con la ecuación de una recta, es decir, hay movimiento de cuerpo rígido. La expresión general (ecuación 1) para determinar los coeficientes de distribución en cada viga (q_i) es función de la inercia de las vigas (I_i), la distancia horizontal desde el centroide de la carga aplicada al centro elástico de la sección transversal del tablero (x_0), y de la distancia horizontal entre el centroide de la i -ésima viga y el centro elástico (x_i).

$$q_i = F * \left(\frac{I_i}{\sum_{i=1}^n I_i} + \frac{x_0 * X_i * I_i}{\sum_{i=1}^n I_i * x_i^2} \right) \quad (1)$$

El cálculo realizado para la determinación de los factores de distribución por medio del método de Engesser-Courbon y sus respectivos resultados se presentan en el Anexo C.

- **Método de Fauchart**

El método de Fauchart es aplicado en tableros de múltiples vigas sin diafragmas intermedios, donde las vigas deben estar bi-apoyadas y tener inercia constante. La rigidez longitudinal del tablero es despreciada en el método (Stucchi, 2006). Dicho método ganó espacio en los análisis de tableros de puentes con la necesidad de considerar la flexibilidad transversal del tablero (despreciando aportes de rigidez longitudinal). Fauchart propuso el cálculo de una estructura plana que represente un metro de largo de sección transversal de tablero, donde las vigas son reemplazadas por resortes que imponen resistencia al desplazamiento vertical y a la rotación del tablero. Las constantes de cada resorte [rigidez a torsión (k_v) y rigidez a flexión (k_t)] dependen de las características geométricas de las vigas y se calculan mediante las ecuaciones 2 y 3, donde l es la longitud de vano, I es la inercia de la sección, I_t : inercia polar de la sección, E_{cs} : módulo de elasticidad, y G es el módulo de elasticidad transversal.

$$k_v = \left(\frac{\pi}{l}\right)^4 * E_{cs} * I \quad (2)$$

$$k_t = \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 * G * I_t \quad (3)$$

El cálculo realizado para la determinación de los factores de distribución por medio del método de Fauchart y sus respectivos resultados se presentan en el Anexo D.

2.3.4. Casos de estudio de las líneas de influencia

Para evaluar los factores de distribución calculados se determinaron las líneas de influencia transversal de carga, momento y cortante de las vigas externas e internas del puente estudiado. En estos cálculos se tuvo en cuenta las cuatro configuraciones de riostras (Figura 5) y las tres secciones de estudio indicadas (Figura 9), además de los diferentes métodos analíticos discutidos en las secciones previas. Para determinar el efecto de todos estos parámetros se dividieron las comparaciones de los factores de distribución en dos casos de estudio:

(1) Efectividad de los métodos analíticos de Engesser-Courbon y Fauchart con relación a los resultados calculados con el MEF.

(2) Influencia del número de riostras intermedias en los factores de distribución de carga de las vigas externas e internas calculadas con el MEF.

Las comparaciones se llevaron al cabo superponiendo en un solo gráfico las líneas de influencia correspondientes a cada caso y determinando el valor absoluto de la diferencia relativa porcentual ($|Diff|$) entre los valores máximos de las líneas de influencia de los métodos analíticos y el MEF. La sección de resultados presenta una muestra de los gráficos de cada caso de estudio. Los resultados completos con todas las líneas de influencia calculadas se presentan en el Anexo E.

2.4 Respuesta estructural del puente

Para conocer el efecto que tiene el número de riostras intermedias en la respuesta estructural del puente bajo carga viva vehicular de diseño, se utilizó el software CSi Bridge el cual posee una interfaz más amplia que la de SAP2000 en cuanto a la definición y aplicación de la carga viva vehicular. Por ejemplo, en CSi Bridge se incluyen parámetros como el ancho de carga de carril, número de ejes de carga, separación mínima de ejes de carga al borde del tablero y separación transversal entre ejes de carga. La respuesta estructural se determinó a través de envolventes de fuerzas y momentos internos (momento flector, torque y fuerza cortante) y deflexiones máximas en las vigas. Estos efectos se calcularon para dos casos de cargas móviles correspondientes a las descritas en el la Norma Colombiana de Diseño de Puentes (CCP14) (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2014), y en la Norma Brasileña ABNT (NBR 7188) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), como se describe a continuación.

La carga viva vehicular de la Norma CCP14 se compone de 6 cargas puntuales que representan las cargas transmitidas por las ruedas del camión de diseño, y de una carga distribuida vehicular conocida como carga de carril de diseño, la cual está limitada a 3 m de anchura por carril y tiene una magnitud de 3.43 kN/m^2 (Figura 10). Para la carga viva se tomó en cuenta el factor de amplificación dinámica (IM) y el factor de multipresencia (m), tal y como se sugiere en las secciones 3.6.2 y 3.6.1.1.2, respectivamente del CCP-14.

Figura 10.

Carga viva vehicular de diseño descrita en el CCP14.

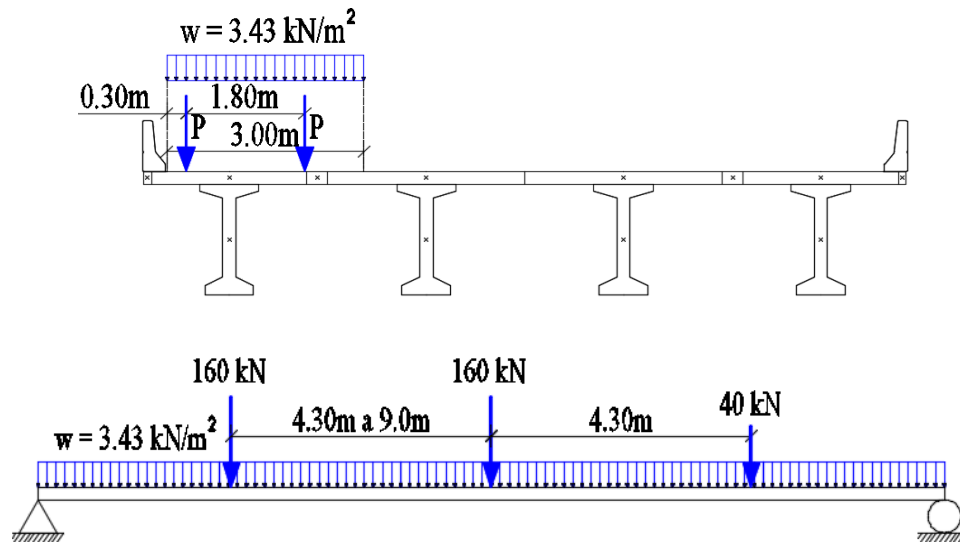
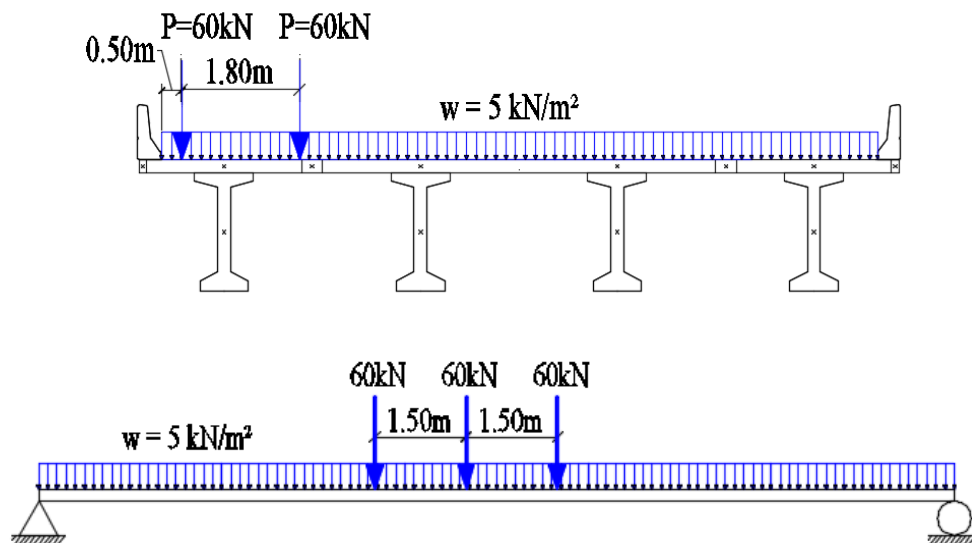


Figura 11.

Carga viva vehicular de diseño descrita en la NBR 7188.



La carga viva vehicular de la norma brasileña NBR 7188 se compone de un vehículo tipo de 450 kN compuesto de 6 ruedas, de 75 kN cada una, espaciadas 1.5 m entre ejes, y de una carga

uniforme de 5 kN/m^2 (Figura 11). Según las especificaciones de la NBR 7188, la carga uniforme distribuida no está presente en el área proyectada en donde se encuentra el vehículo tipo, por lo tanto, por facilidad en el análisis se utilizó la carga distribuida sobre todo el tablero, considerando el área proyectada del camión que en teoría no es ocupada por la carga distribuida. Para no alterar la magnitud total aplicada se determinaron nuevas cargas puntuales homogéneas sustrayendo el valor de la fuerza distribuida adicional al valor original de 75 kN . Estas cargas fueron amplificadas al aplicar los tres factores presentados en la norma brasileña: coeficiente de impacto vertical (CIV), coeficiente de número de carriles (CNF) y coeficiente de impacto adicional (CIA), este último es utilizado para tener en cuenta las discontinuidades en la pista de rodamiento como juntas de dilatación, estructuras de transición y accesos.

Las comparaciones se llevaron al cabo superponiendo en un solo gráfico las envolventes de fuerzas y momentos internos de cada puente con su configuración de riostras intermedias. También se extrajeron los valores máximos de cada envolvente con el fin de determinar la reducción respecto a los resultados del puente de cero riostras intermedias. Los resultados de las envolventes de fuerzas y momentos internos con base a la carga vehicular descrita en el CCP14 se presentan en la sección de resultados. Los demás resultados calculados con base a la normativa brasileña NBR 7188 están presentes en el Anexo F.

Para calcular la deflexión máxima se utilizaron los mismos casos de carga del cálculo de envolventes de fuerzas internas. Debido a que cada viga es representada con dos o más elementos finitos y que la viga y el tablero se conectan rígidamente, se decidió utilizar únicamente la deflexión máxima del elemento *frame* que representa las vigas prefabricadas. Esta deflexión se midió en la mitad de la luz del puente.

3. Análisis y Resultados

3.1 Factores de Distribución

Los factores de distribución se nombrarán como FD de aquí en adelante. La Tabla 1 presenta los valores máximos de los factores de distribución determinados por cada línea de influencia calculada en función del número de riostras intermedias, sección de estudio y tipo de viga. Las Figuras 12 y 13 presentan las diferencias relativas porcentuales entre los métodos analíticos y el MEF, calculadas con base a los resultados de la Tabla 1.

3.1.1. Efectividad de los métodos analíticos de Engesser-Courbon y Fauchart con relación a los resultados calculados con el MEF

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 1 y en las Figuras 12 y 13 se puede identificar que:

- El método de Engesser-Courbon se ajustó mejor en las vigas externas ya que sus diferencias relativas porcentuales son menores a 30%, salvo los casos donde las secciones de estudio coincidían con la posición de una riostra intermedia, Debido a su naturaleza lineal, el método no se ajusta propiamente a un FD en específico (Figura 14). En el caso de la viga interior, este método se ajustó mejor a los FD de momento ya que sus diferencias relativas porcentuales son menores que los FD de cortante y carga, en cambio, en las vigas externas dependiendo la sección y el número de riostras, el método se ajustaba a cualquier otro FD. En los casos donde las

secciones de estudio coincidían con la posición de una riostra intermedia, los FD de la viga externa se ajustaron mejor a los FD de momento y los FD de la viga interna se ajustaban mejor a los FD de carga y cortante.

- El método de Fauchart se ajustó mejor a los FD de momento en la viga externa, presentando diferencias relativas porcentuales menores a 18% en sus valores máximos. En la viga interna, Fauchart era más cercano al FD de momento en la mayoría de los casos estudiados, ambas afirmaciones no son válidas en las secciones de estudio que coincidían con la posición de una riostra intermedia. En estos casos los FD de Fauchart se ajustaban mejor a los FD de carga y cortante. La Figura 15 que presenta los casos de puentes de tres y dos riostras en las secciones S2 y S4, respectivamente, demuestran lo mencionado anteriormente. Con base a estas figuras se identifica que el método de Fauchart se ajustó no sólo en sus valores máximos de los FD de momento sino también a lo ancho del tablero.

- La incidencia de la sección de estudio en el ajuste de los FD de los métodos analíticos se ve reflejada principalmente por la ubicación de la riostra intermedia (Sección S4), la cual representa una sección que posee una rigidez transversal superior a las demás secciones del tablero que no coinciden con una riostra. Exceptuando estos casos, se puede identificar de las Figuras 12 y 13 que a medida que la sección de estudio se aproxima al centro de luz, el método de Fauchart es más cercano a los FD de momento, en cambio, el método de Engesser-Courbon tiende a ser menos preciso en la viga externa.

Tabla 1.

Valores máximos de los factores de distribución determinados.

Sección	Número de riostras	Viga Exterior					Viga Interior				
		Modelo MEF			Métodos analíticos		Modelo MEF			Métodos analíticos	
		FD Carga	FD Cortante	FD Momento	Engesser-Courbom	Fauchart	FD Carga	FD Cortante	FD Momento	Engesser-Courbom	Fauchart
Sección S2	0	0,97	0,85	0,65	0,70	0,53	0,95	0,83	0,48	0,30	0,40
Localizada a	1	0,97	0,81	0,65	-----	-----	0,95	0,78	0,49	-----	-----
1/4 de la luz	2	0,98	0,71	0,61	-----	-----	0,98	0,59	0,43	-----	-----
del puente	3	0,68	0,61	0,55	-----	-----	0,42	0,38	0,32	-----	-----
Sección S3	0	0,96	0,86	0,62	-----	-----	0,94	0,83	0,46	-----	-----
Localizada a	1	0,97	0,78	0,61	-----	-----	0,96	0,71	0,45	-----	-----
1/3 de la luz	2	0,65	0,59	0,52	-----	-----	0,40	0,36	0,31	-----	-----
del puente	3	0,99	0,92	0,57	-----	-----	0,98	0,95	0,40	-----	-----
Sección S4	0	0,96	0,98	0,60	-----	-----	1,01	0,98	0,45	-----	-----
Localizada a	1	0,31	0,31	0,32	-----	-----	0,36	0,36	0,30	-----	-----
1/2 de la luz	2	0,98	0,98	0,57	-----	-----	1,00	0,97	0,42	-----	-----
del puente	3	0,66	0,66	0,50	-----	-----	0,40	0,40	0,31	-----	-----

Figura 12.

Evaluación de los FD de los métodos analíticos respecto a los calculados con el MEF, (viga externa).

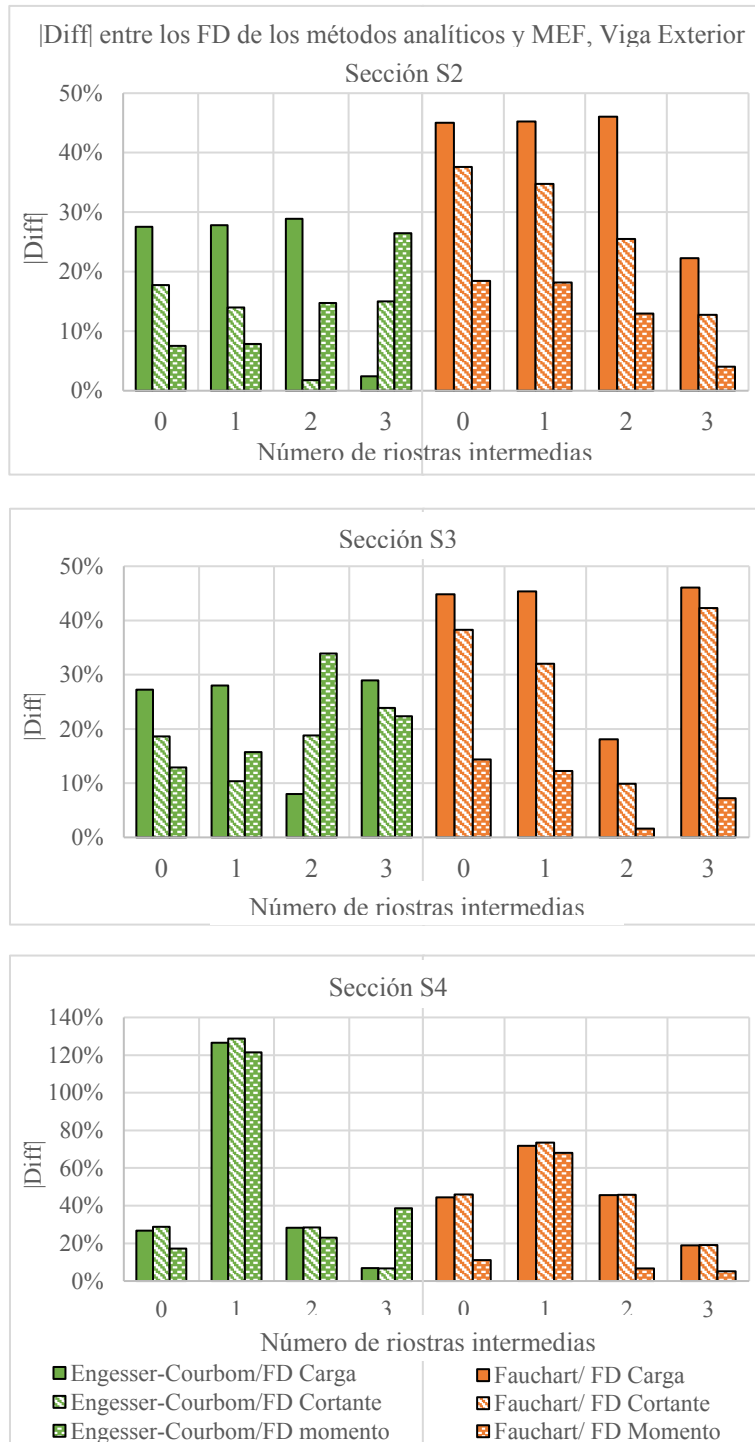


Figura 13.

Evaluación de los FD de los métodos analíticos respecto a los calculados con el MEF, (viga interna).

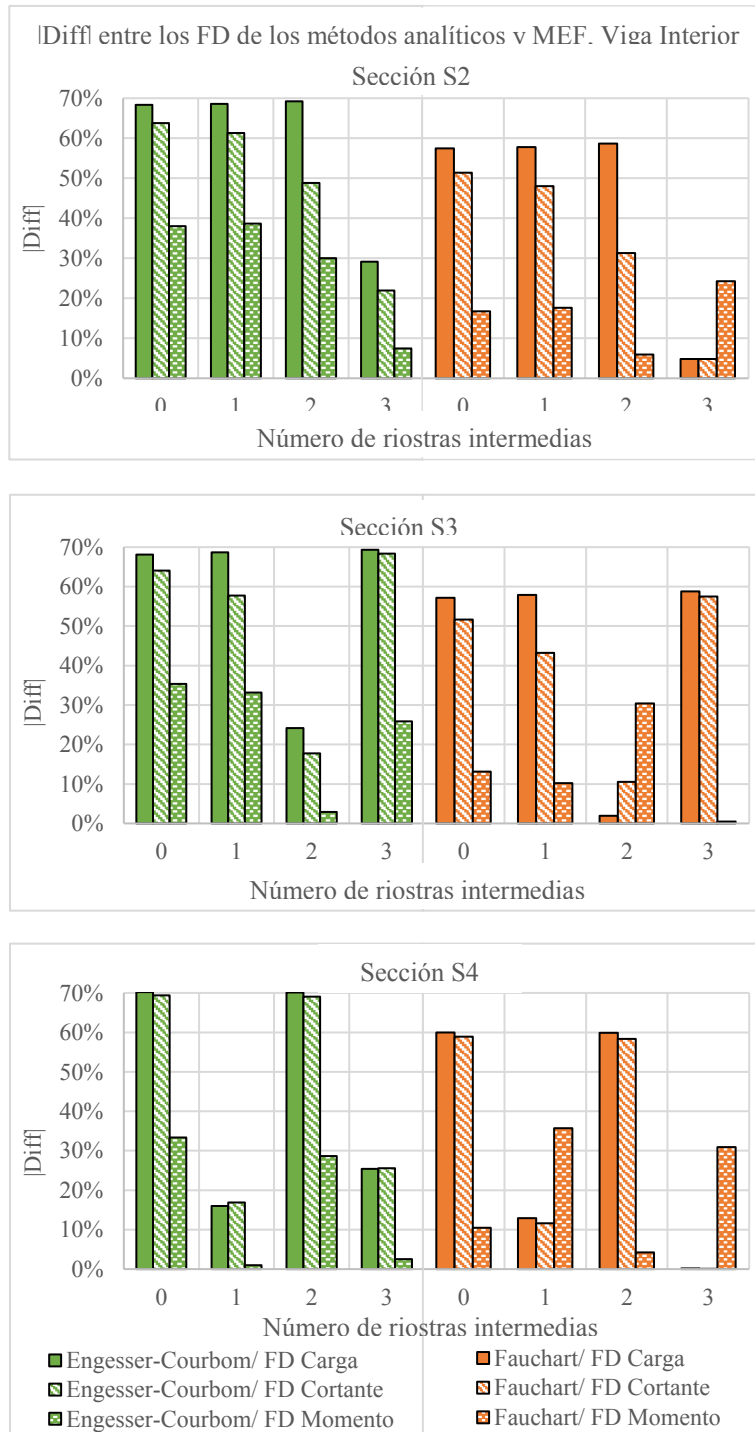
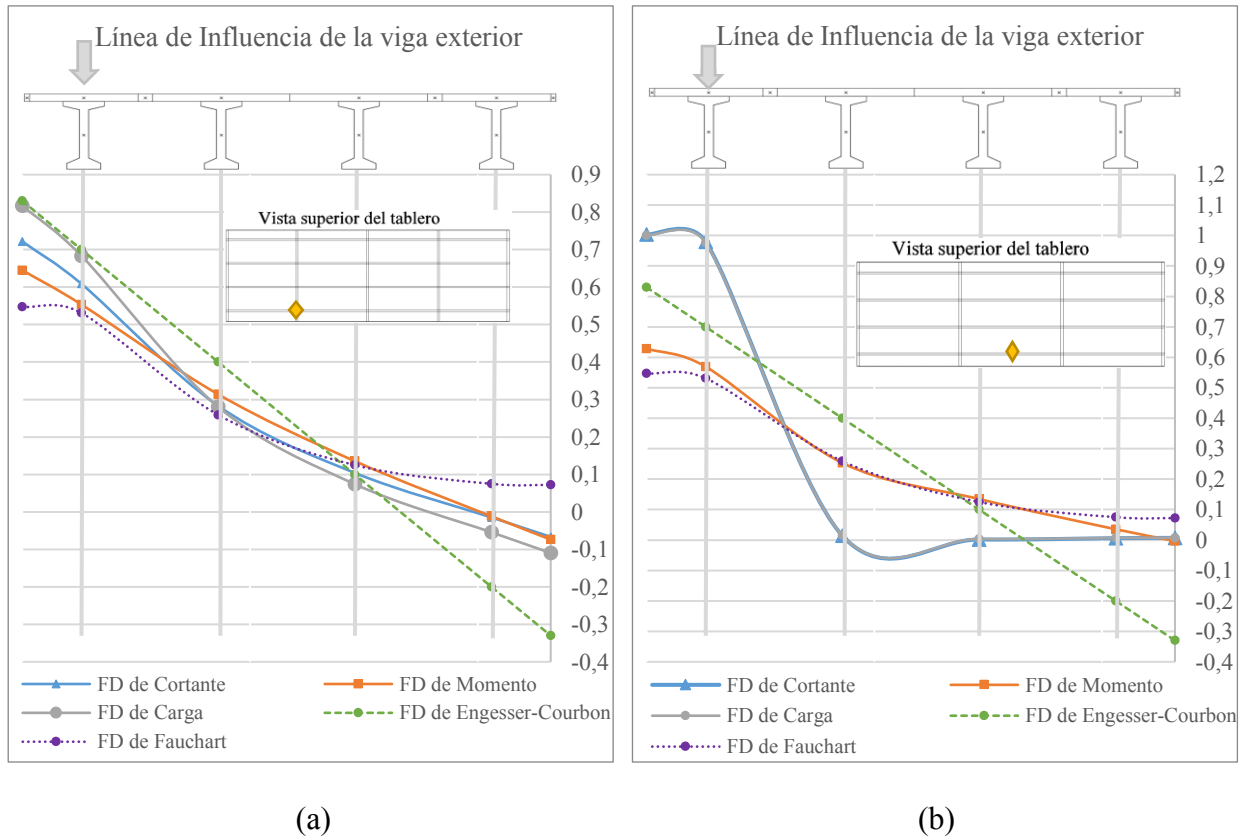


Figura 14.

Líneas de influencia transversal de la viga exterior, (a) puente N3, sección S4, (b) puente N2 sección S2.

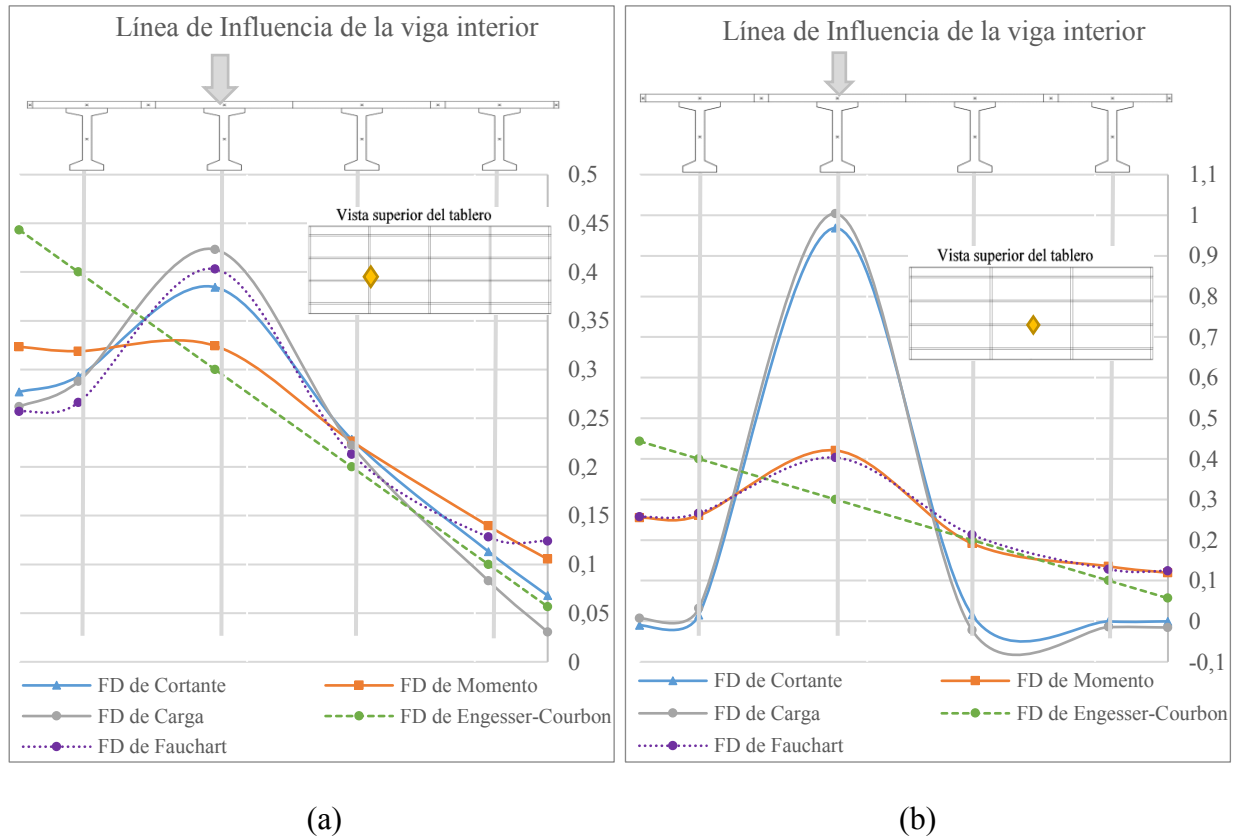


- El número de riostras intermedias mejora la precisión del método de Engesser-Courbon, debido a que a medida que estas aumentan los FD de carga, cortante y momento son más cercanos a los del método aproximado. Dicha mejora puede verse respaldada debido al incremento en la rigidez transversal del puente, puesto que el método se basa en la suposición de que el tablero es infinitamente rígido.

- Los FD de carga y cortante son cada vez más cercanos a medida que la sección de estudio se acerca a la mitad de la luz (Figura 15).

Figura 15.

Líneas de influencia transversal de la viga interna, (a) puente N3, sección S4, (b) puente N2 sección S2.



3.1.2 Influencia del número de riostras intermedias en los factores de distribución de carga de las vigas externas e internas calculadas con el MEF.

Las Tablas 2 y 3 listan los valores máximos de los FD de carga en función del número de riostras y la sección de estudio, así la variación de estos con respecto al puente sin riostras. De acuerdo con dichas tablas se identifica que los factores de distribución de carga se reducen en los casos donde la sección de estudio coincide con la posición de una riostra intermedia, presentando reducciones respecto al puente sin riostras (N0) del orden de 29% al 68% en la viga externa y 55%

al 65% en la interna. Esto indica que la presencia de un mayor número de riostras en el puente mejora el reparto de cargas entre todas las vigas. Lo anterior queda evidente en los resultados mostrados a modo de ejemplo en la Figura 16, la cual presenta las líneas de influencia de la viga externa para las cuatro configuraciones de riostras intermedias en la sección S4, que es una sección crítica en el diseño a flexión del puente. Las demás secciones no presentan reducciones en los FD de carga sino al contrario estos aumentaron. Además, se puede afirmar que la reducción de los FD de carga es inversamente proporcional al número de riostras intermedias, siendo la viga interior la más sensible por el cambio en el número de riostras.

Tabla 2.

Valores máximos de los FD de carga en función del número de riostras y sección de estudio

Sección	Viga Exterior				Viga Interior			
	N0	N1	N2	N3	N0	N1	N2	N3
S2	1,0	1,0	1,0	0,7	0,9	1,0	1,0	0,4
S3	1,0	1,0	0,6	1,0	0,9	1,0	0,4	1,0
S4	1,0	0,3	1,0	0,7	1,0	0,4	1,0	0,4

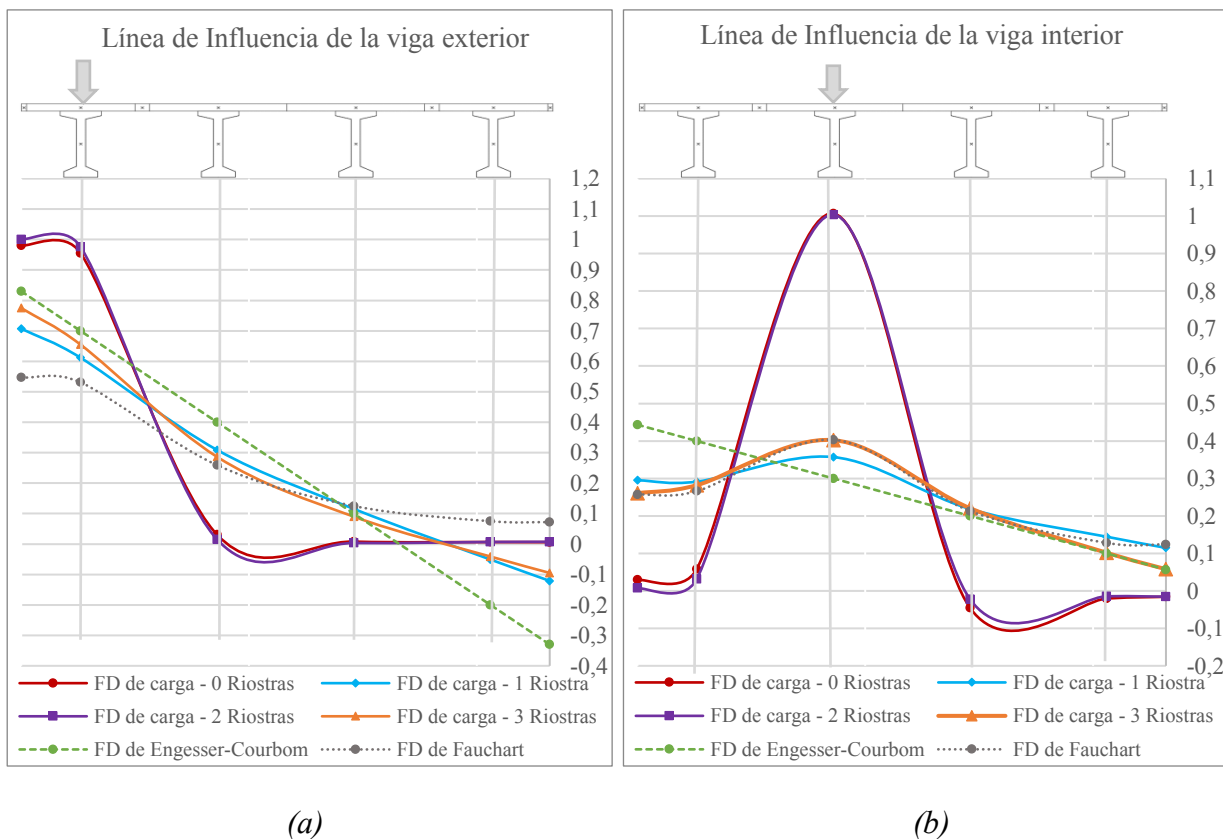
Tabla 3.

Variación de los FD de carga respecto al puente N0

Sección	Viga Exterior				Viga Interior			
	N0	N1	N2	N3	N0	N1	N2	N3
S2	--	0%	-2%	29%	--	-1%	-3%	55%
S3	--	-1%	33%	-2%	--	-2%	58%	-4%
S4	--	68%	-2%	31%	--	65%	0%	60%

Figura 16.

Líneas de influencia transversal de carga para cada configuración de riostras en la sección S4, (a) viga exterior, (b) viga interior.

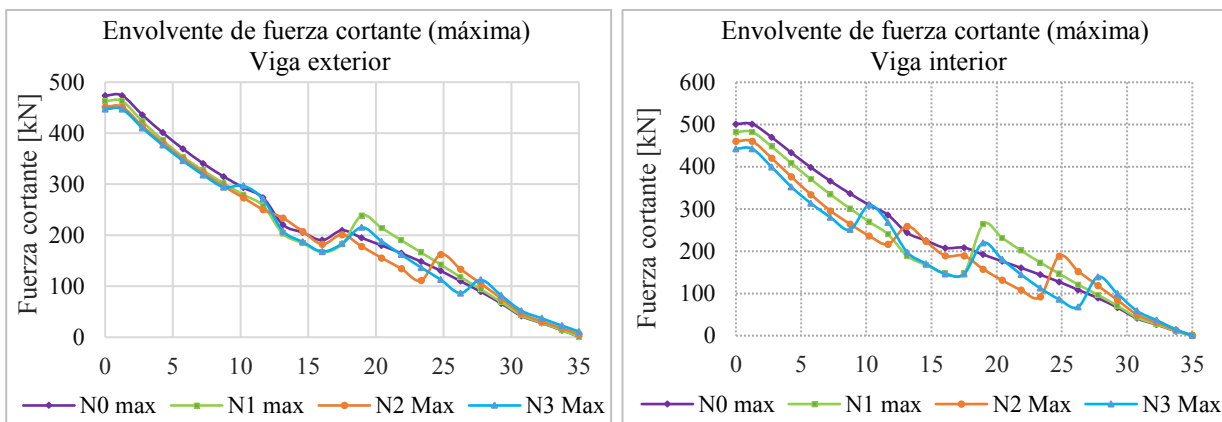


3.2 Envoltentes de fuerzas internas

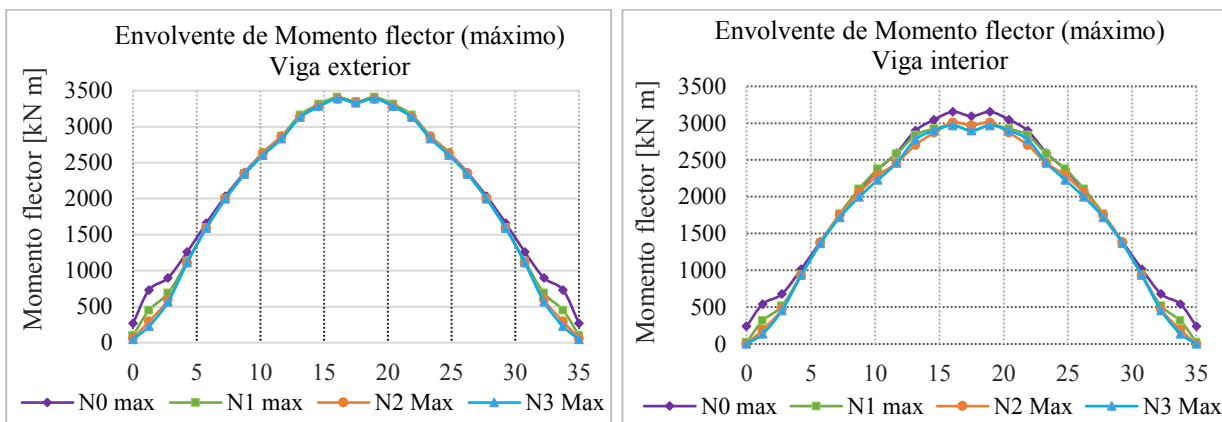
La Figura 17 presenta las envoltentes de fuerza cortante (a), momento flector (b) y torque (c) determinadas con base a la aplicación de la carga viva vehicular descrita en el CCP14. Las envoltentes de fuerzas y momentos internos calculados con base a la norma brasileña NBR7188 se presentan en el anexo F.

Figura 17.

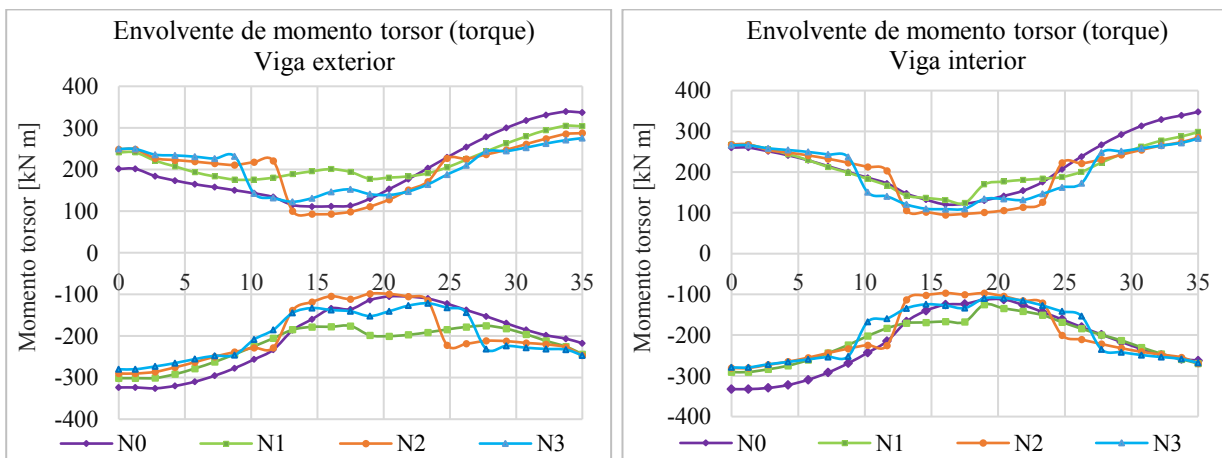
Envoltentes de fuerzas y momentos internos calculados con base a la aplicación de la carga vehicular del CCP14, (a) cortante, (b) momento flector, (c) torque.



(a)



(b)



(c)

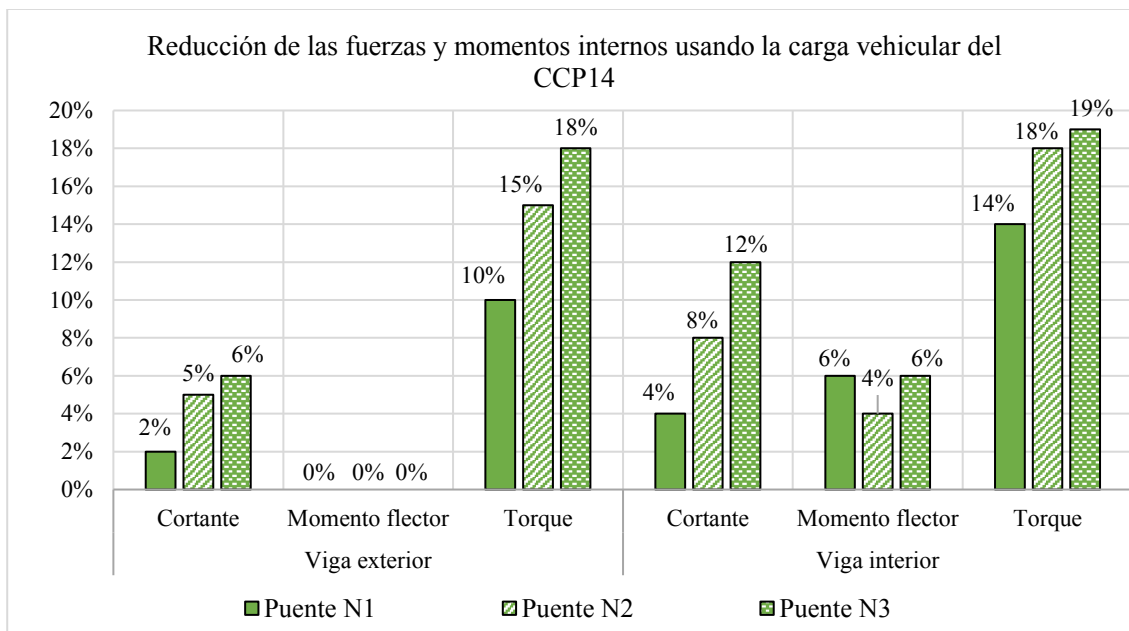
Tabla 4.

Valores máximos de las envolventes de fuerzas y momentos internos.

Modelo	Cortante		Momento		Torque	
	[kN]		[kN m]		[kN m]	
	V-Ext	V.Int	V-Ext	V-Int	V-Ext	V-Int
Carga vehicular descrita en el CCP14						
Puente N0	474	501	3346	3095	337	348
Puente N1	463	482	3342	2900	304	298
Puente N2	452	460	3337	2968	288	285
Puente N3	447	443	3333	2898	275	283
Carga vehicular descrita en la NBR 7188						
Puente N0	298	358	2407	2389	159	193
Puente N1	304	354	2446	2212	151	169
Puente N2	309	346	2415	2281	146	158
Puente N3	309	309	2433	2221	140	157

Figura 18.

Reducción de las fuerzas y momentos internos usando la carga vehicular del CCP14

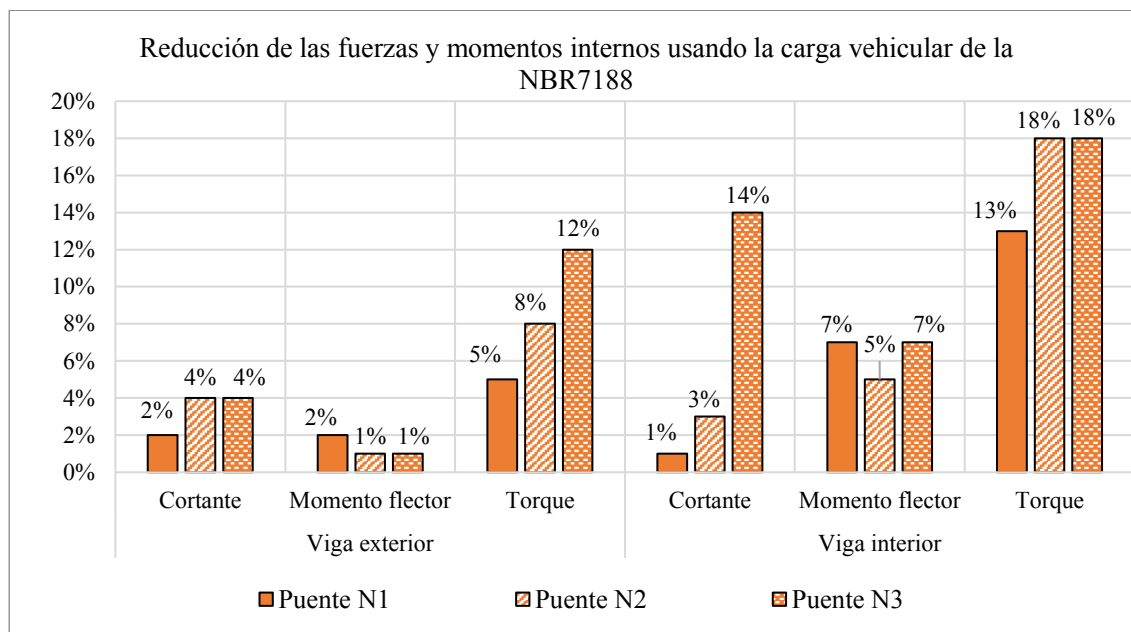


Con base a la Figura 18 se identifica que la viga interior presenta una mayor reducción que la viga exterior en todas las envolventes de fuerzas y momentos internos por la presencia de riostras intermedias. La reducción más significativa en ambas vigas ocurre para el torque, respuesta que presenta reducciones que van del 10% al 19%. La fuerza cortante es la siguiente envolvente que se ve afectada por las riostras intermedias, presentando reducciones del 2% al 6% en la viga exterior y del 4% al 12% en la viga interior. El momento flector en la viga externa no se reduce por la presencia de riostras intermedias, sin embargo, la viga interna presenta una reducción que es cuasi independiente del número de riostras. Hay una reducción progresiva en los valores máximos de cortante y torque a medida que se aumenta el número de riostras intermedias. Sin embargo, con el número de riostras utilizado no se puede afirmar hasta qué punto esta reducción deja de ser notable.

En la Tabla 4 se puede identificar que el diseño por momento flector para la carga viva del CCP14 estará controlado por la viga exterior, presentando una relación de momentos respecto a la viga interna (Momento viga externa/Momento viga interna) de 1,08 a 1,15. Por lo tanto, las posibles reducciones en las vigas exteriores debido a la presencia de riostras intermedias pueden llegar a ser importantes en el diseño. Sin embargo, según los resultados presentados en la Figura 18, el momento flector máximo en estas vigas no es afectado por el número de riostras. Esto implica que, aunque haya reducciones de momento flector en las vigas internas por la presencia de riostras intermedias, no se esperaría un efecto significativo en el diseño de las vigas, puesto que este seguiría controlado por las vigas externas.

Figura 19.

Reducción de las fuerzas y momentos internos usando la carga vehicular de la NBR 7188



La Figura 19 presenta la reducción de las fuerzas y momentos internos usando la carga viva vehicular de la NBR 7188. En esta también muestra que la viga interna es la que más se ve afectada por los diafragmas intermedios y el torque es el que más se reduce por la presencia de dichos elementos. Se puede identificar que tanto para la viga externa como interna hay una reducción más notable en el momento flector con respecto a los resultados calculados con base a la carga viva vehicular del CCP14 lo cual permite afirmar que analíticamente el tipo de carga que se utilice en el análisis de una superestructura va a afectar la percepción del efecto del número de riostras, de acuerdo con esto se identifica que el tipo de carga que se le aplique al puente cambia la forma como influyen los diafragmas intermedios en la respuesta estructural. La fuerza cortante en la viga externa y el torque en la interna no se reducen a medida que aumenta el número de riostras intermedias.

3.3 Deflexiones máximas

La Tabla 5 presenta las deflexiones máximas calculadas del modelo de elementos finitos, de acuerdo con los datos presentados se observa que tanto la viga externa como la interna presentaron reducciones o aumentos menores a 1 mm por la presencia de riostras intermedias. Este nivel de reducción de deflexiones se traduce en variaciones máximas del orden del 3%, lo cual es despreciable desde el punto de vista práctico.

Tabla 5.

Valores de deflexión máxima en función del número de riostras y el tipo de carga viva vehicular.

Modelo	Deflexión máxima [cm]	
	Vig Externa	Viga Interna
Carga vehicular descrita en el CCP14		
Puente N0	2,72	2,40
Puente N1	2,72	2,32
Puente N2	2,71	2,31
Puente N3	2,71	2,31
Carga vehicular descrita en la NBR 7188		
Puente N0	1,89	1,76
Puente N1	1,90	1,71
Puente N2	1,89	1,71
Puente N3	1,89	1,70

4. Conclusiones

El proyecto fue realizado para un puente de luz corta (35 m) con vigas prefabricadas y analizado con base a las cargas vivas vehiculares descritas en las normas de diseño de puentes CCP14 y NBR7188. No se tomaron en cuenta efectos inherentes a la aplicación de presfuerzo en las vigas y la conexión entre los diafragmas intermedios y las vigas se consideró como rígida. Las principales conclusiones del estudio son:

1. Por medio de elementos *frame* separados longitudinal y transversalmente en puntos estratégicos que en algunos casos coinciden con la posición del flujo de cortante, se encontró una configuración que captura el comportamiento de la superestructura del puente estudiado sin la necesidad de utilizar elementos finitos más complejos como *shell* que requieren de mayores costos computacionales.

2. Debido a las simplificaciones y la premisa de una respuesta seccional rígida, el método analítico de Engesser-Courbon no se ajusta propiamente a un factor de distribución en específico (carga, momento, o cortante) y subestima en la mayoría de los casos analizados estos factores de distribución, salvo los casos donde la sección de estudio coincide con una riostra intermedia. El método es más preciso en las vigas externas e incrementa su precisión a medida que aumenta el número de riostras.

3. El método analítico de Fauchart posee una correlación cercana con los factores de distribución de momento, a excepción de los casos donde la sección de estudio coincide con la posición de una riostra intermedia donde el método se aproxima más a los factores de distribución

de carga y cortante cuando se utiliza para las vigas internas. Este método presenta mayor precisión en las vigas externas e incrementa su precisión en la sección de la mitad de la luz.

4. La presencia de diafragmas intermedios influye en mayor medida la distribución de carga en las vigas internas, siendo las secciones transversales que coinciden con una riostra intermedia las que presentan una distribución más uniforme de la carga entre las vigas adyacentes. Este cambio en la distribución de carga se mantuvo constante al aumentar el número de riostras intermedias. Además, no hubo una mejora en la distribución de carga en secciones que no coincidían con la ubicación de estas.

5. Incrementar el número de riostras intermedias genera reducciones proporcionales en las envolventes y respuestas máximas de torque y cortante de las vigas internas y externas. Debido a la presencia de las riostras intermedias las vigas externas e internas presentaron una reducción en los valores máximos de torque del 10% al 18% y del 14% al 19% respectivamente, mientras que el cortante en estas vigas se redujo entre el 2% y 6% (vigas externas) y 4 y 12% (vigas internas).

6. La presencia de riostras intermedias disminuye el momento flector máximo de las vigas internas con reducciones del 4% a 6% al aplicar la carga viva vehicular descrita en la norma CCP14, siendo mayores en los puentes cuyas riostras coinciden con el centro de luz. Sin embargo, estas reducciones no representan un cambio significativo en el diseño por momento, debido a que este se encuentra controlado el momento de las vigas externas, el cual se mantuvo constante al aumentar el número de riostras intermedias.

7. La presencia de riostras intermedias reduce las deflexiones máximas en las vigas externas e internas en un 0,5% y 3%, respectivamente. Esto muestra desde el punto de vista práctico que las variaciones presentadas son despreciables.

5. Recomendaciones

De acuerdo con las limitaciones del estudio, se recomienda tener en cuenta un análisis más riguroso al que se realizó en el presente trabajo para cuantificar la verdadera influencia de los diafragmas intermedios en la distribución de cargas y respuesta en la estructura. Se requieren nuevos estudios que determinen el verdadero aporte de rigidez que poseen las riostras con toda la estructura, debido a que su conexión con las vigas no es en realidad una conexión rígida, que además dependerá del tipo de riostra y el método constructivo utilizado.

Referencias Bibliográficas

- Abendroth, R. E., Klaiber, F. W., & Shafer, M. W. (1995). Diaphragm Effectiveness in Prestressed-Concrete Girder Bridges. *Journal of Structural Engineering*(9), 1362–1369.
- Alves, E. (2004). Métodos de análise estrutural de tabuleiros de pontes em vigas múltiplas de concreto protendido. *Universidade Federal Fluminense*, 6(2), 50-51.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2012). *Standard Specifications for Highway Bridges*. Washington DC: AASHTO.
- Amirihormozaki, E., Pekcan, G., & Itani, A. (2015). Analytical Modeling of Horizontally Curved Steel Girder Highway Bridges for Seismic Analysis. Nevada - USA: *Journal of Earthquake Engineering*.
- Araujo, M., Cai, C. S., Chandolu, A., Avent, R. R., & Alaywan, W. (2007). Diaphragm Effects of Prestressed Concrete Girder Bridges: Review and Discussion. *Practice periodical on structural design and construction* © ASCE, 3(12), 161-167.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2014). *Norma Colombiana de Diseño de Puentes - LRFD - CCP 14*. Bogotá DC.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2013). Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. *ABNT NBR 7188*, 2, 1-5.
- Chandalu, A., & Araujo, M. (2009). Quantification of intermediate diaphragm effects on load distributions of prestressed concrete girder bridges. *PCI Journal*, 48-61.
- CSi. (2018). Structural Analysis Program, SAP2000 V20. Berkeley, CA, USA: Computers & Structures Inc.
- CSi. (2019). CSi Bridge Integrated 3D Bridge Design Software. Berkeley, CA, USA: Computers & Structures, Inc.

- de Oliveira, J., Figueiredo, C., Dieter Franzke, P., Ribas Lugarini, T., & de Oliveira, S. (2018). Métodos de Distribuição de Cargas na Seção Transversal de Pontes com Vigamento Múltiplo: Correlação com Resultados Experimentais. *X Congresso Brasileiro de Pontes E Estruturas*, 6, 1-9.
- Dupaquier, S., Marshall, J. D., & Stallings, M. (2015). Intermediate Diaphragm and Temporary Bracing Practice for Precast Concrete Girder Bridges. *American Society of Civil Engineers - University of Nevada*, 1-10.
- Eamon, R. E., & Nowak, A. S. (2002). Effects of Edge-Stiffening Elements and Diaphragms on Bridge Resistance and Load Distribution. *Journal of Bridge Engineering*, 7(5), 258–266.
- Hué Garcia, F. (2007). Elementos prefabricados de hormigón en puentes. 1-2.
- Kostem, C. N., & DeCastro, E. S. (1977). Effects of Diaphragms on Lateral Load Distribution in Beam - Slab Bridges. *Transportation Research Record*(645), 6-9.
- Longo, H. I. (1979). *Esforços Máximos em Pontes Tipo Grelha*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Serquén, A. R. (2016). PUENTES con AASHTO LRFD 2014. Lima - Perú.
- Stucchi, F. R. (2006). *Pontes e Grandes Estruturas*. São Paulo: Universidade de São Paulo Escola Politécnica.
- The PCI Bridge Design Manual Steering Committee. (2011). Bridge Design Manual . *Precast Prestressed Bridge Design Manual*, 3(2), 97.
- US Department of transportation - Federal Highway Administration. (2015). General Design and Location Features. *Load and Resistance Factor Design (LRFD) for Highway Bridge Superstructures*, 23.
- Vargas Sanabria, J. L. (2017). Introducción a la construcción acelerada de puentes. En *Estado actual de la construcción acelerada de puentes "CAP"* (págs. 17-20). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Wong, A. Y., & Gamble, W. L. (1973). Effects of Diaphragms in Continuous Slab Girder Highway Bridges. *Structural Research SerieSengupta No. 391, Illinois Cooperative Highway Research Series No. 138.*