

Reforzamiento De La Superestructura De Un Puente Tipo Viga Losa De Hormigón Armado

Reinforcement Of The Superstructure Of A Reinforced Concrete Beam Type Bridge

Autores

Juan Carlos Mediavilla Pazmiño¹, Luis Tinerfe Hernández Rodríguez², Martha María Molina Padrón³

¹ Ingeniero Civil. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador, jcmp4437@gmail.com

² Ingeniero Civil. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador, luis.hernandezr@epn.edu.ec

³ Ingeniero Civil. Investigadora, Puebla, México, marthammolinap@gmail.com

RESUMEN

Este puente tipo viga losa con tres tramos, según un estudio previo realizado, se concluye que las vigas tienen déficit de resistencia a flexión ante las cargas vehiculares de la normativa ecuatoriana vigente, aunque cumplen con su resistencia a corte, determinándose que el mismo requiere de un reforzamiento para garantizar su funcionalidad a mediano y largo plazo. A partir de esto se describen de forma general diferentes métodos para el reforzamiento de la superestructura de un puente con algunos años de explotación y que se requiere su intervención. Los métodos expuestos son con polímero reforzado con fibras de carbono, con sus siglas en inglés CFRP, reforzamiento con postensado externo, reforzamiento con encamisado de los elementos estructurales y reforzamiento con arriostres de pandeo restringido con sus siglas en inglés BRB. Partiendo del objetivo de la necesidad de reforzar los elementos estructurales de este puente de hormigón armado, tipo viga losa, construido en 1986, se propone el encamisado metálico, dando por resultado que es factible su utilización mejorando la capacidad resistente del puente. Este tipo de reforzamiento consiste en anclar, mediante pernos, placas metálicas en las caras de las vigas del puente. El proyecto de reforzamiento se realizó utilizando un software especializado en modelación de puentes y siguiendo la metodología descrita en el Manual for Bridge Evaluation, llegándose a la conclusión que la resistencia a flexión de las vigas se incrementó en un 50% con respecto a su capacidad inicial.

Palabras claves: encamisado metálico, puente, reforzamiento estructural.

ABSTRACT

This slab beam type bridge with three sections, according to a previous study carried out, it is concluded that the beams have a lack of flexural resistance to the vehicular loads of the current Ecuadorian regulations, although they comply with their shear resistance, determining that it requires a reinforcement to guarantee its functionality in the medium and long term. From this, different methods are generally described for reinforcing the superstructure of a bridge that has been in operation for some years and requires intervention. The exposed methods are with carbon fiber reinforced polymer, with its acronym in English CFRP, reinforcement with external post-tensioning, reinforcement with cladding of the structural elements and reinforcement with restrained buckling braces with its acronym in English BRB. Starting from the objective of the need to reinforce the structural elements of this reinforced concrete bridge, slab beam type, built in 1986, metal cladding is proposed, resulting in its feasible use improving the resistant capacity of the bridge. This type of reinforcement consists of anchoring, using bolts, metal plates to the faces of the bridge beams. The reinforcement project was carried out using software specialized in bridge modeling and following the methodology described in the Manual for Bridge Evaluation, reaching the conclusion that the bending resistance of the beams increased by 50% with respect to their initial capacity

Keywords: metal casing, bridge, structural reinforcement.

Nota Editorial: Recibido: Julio 2023 Aceptado: Septiembre 2023

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los componentes importantes de una red vial son los puentes, estas estructuras permiten franquear obstáculos naturales y artificiales como ríos, valles, líneas férreas o carreteras con el fin de acortar tiempos y tener una continuidad vial.

Los puentes se diseñarán para estados límite especificados para alcanzar los objetivos de constructibilidad, seguridad y capacidad de servicio, con la debida atención a los problemas de inspección, economía y estética [1].

Benavides et al. [2], en 2022, exponen que el sistema de red vial de un país es vital para el desarrollo económico social, haciendo posible el comercio entre regiones con una adecuada conectividad, razón por la cual es importante la creación de nuevas carreteras y puentes, así como también la evaluación, rehabilitación de los ya existentes en la red vial. Un gran porcentaje de puentes existentes que conforman las redes viales en el Ecuador fueron diseñados con normas de cálculo estructural y sismo resistentes de puentes de hormigón armado, que a la fecha son obsoletas, tomando en cuenta principalmente los parámetros técnicos y cargas definidas, por lo tanto, es necesario conocer las circunstancias y la metodología con los cuales estas estructuras fueron diseñadas. Partiendo de esto realizaron el análisis estructural de un puente concluyéndose que los elementos de la superestructura presentan un grado de afectación con posible falla a flexión, por lo que deben reforzarse.

Machín y Sima [3], en trabajos realizados en Uruguay, plantean que es habitual en la práctica que muchos puentes existentes no cumplan con los requerimientos de una norma de diseño actual, sin embargo, mantienen las condiciones de servicio con niveles de confiabilidad aceptables. Al encontrarse la estructura en servicio se cuenta con herramientas que permiten disminuir las incertidumbres de las variables del cálculo y facilitar su evaluación estructural.

Lozano et al [4] afirman que cada vez es más importante el parque de puentes y evaluar el estado de las estructuras ya construidas que son necesarias mantener o que han sufrido alguna situación accidental, como puede ser un sismo. Hay diversas técnicas para ello y entre estas, la técnica de observabilidad, que combina dos enfoques: uno simbólico y uno numérico, se podría aplicar a la evaluación de puentes.

Garrido [5] realizó la evaluación del estado de conservación y de la capacidad resistente del puente Pedro de la ciudad de Valdivia, Chile, empleando el Manual para evaluación de puentes y se llega a la conclusión después del estudio que se ha podido determinar qué secciones poseen la resistencia más crítica tanto a momento flector como a cortante. Como conclusión se plantea que la capacidad de resistencia del puente a cortante es suficiente para todas las secciones, salvo para la sección de las pilas exteriores. Mientras que en la evaluación del momento flector se obtienen valores del factor de capacidad (RF), en las secciones más representativas, menores que 1, teniendo la resistencia más crítica en la sección ubicada en la zona central del vano lateral.

Partiendo de lo anterior, se estudian distintos métodos de reforzamiento como reforzamiento con polímero reforzado con fibras de carbono con sus siglas en inglés CFRP, reforzamiento con postensado externo, reforzamiento con encamisado de los elementos estructurales y reforzamiento con arriostres de pandeo restringido, con sus siglas en inglés BRB.

La selección de la metodología de reforzamiento depende de varios parámetros tales como: el tipo de puente, la disponibilidad de materiales, la complejidad del proceso constructivo, la modificación de la configuración estructural, la suspensión de los servicios que presta la estructura y del presupuesto económico.

Para que el reforzamiento sea eficaz, se debe realizar un proceso constructivo basado en las especificaciones técnicas del estudio, buscando componentes que cumplan con las dimensiones calculadas y las características físicas y mecánicas de los materiales [6].

En Colombia, Sika S.A.S. [7], en 2022, para la rehabilitación y reforzamiento estructural de algunos puentes vehiculares de la zona norte y sur en la ciudad de Bogotá. propone tecnologías de polímero reforzado con fibra, con sus siglas en inglés FRP o con sus siglas en español PRF, un material de alta durabilidad siendo esta, unas de las tecnologías más avanzadas en el mundo del mantenimiento.

Para el caso de este puente, se optó por el reforzamiento mediante el encamisado de placas de acero, permitiendo a la estructura seguir en funcionamiento a la par que se implementa el reforzamiento. Según la propuesta de reforzamiento para este caso de estudio, se anclarán placas, mediante pernos, tuercas y arandelas, a las caras laterales de todas las vigas que soportan los tableros; y adicionalmente, se colocarán placas en las caras inferiores de las vigas, que irán soldadas a las placas laterales. Las dimensiones y ubicación de los componentes del reforzamiento serán calculadas según el análisis estructural.

Además, se debe proveer de un mantenimiento periódico, siguiendo la metodología descrita en el Manual for Bridge Evaluation (MBE) [8], tanto a la estructura original, como al reforzamiento, para garantizar la vida útil de la estructura.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En trabajo anterior referente a esta misma investigación, Benavides et al. [2] exponen que la AASHTO [1] propone la determinación del factor de capacidad RF como un coeficiente cuantitativo para la evaluación del desempeño del puente. Este factor está dado por la siguiente expresión:

$$RF = \frac{C - (\gamma_{DC})(D_C) - (\gamma_{DW})(D_W) \pm (\gamma_P)(P)}{(\gamma_{LL})(L_L + I_M)} \quad (1)$$

Para los estados de límite de resistencia:

$$C = \varphi_C \cdot \varphi_S \cdot \varphi \cdot R_n \quad (2)$$

Aplicando el límite inferior:

$$\varphi_C \cdot \varphi_S \geq 0.85 \quad (3)$$

Para los Estados Límite de Servicio:

$$C = f_R \quad (4)$$

En las expresiones anteriores:

RF se corresponde con el factor de capacidad.

C se corresponde con la capacidad nominal del miembro.

f_R es el esfuerzo admisible especificado en el código LRFD.

R_n es la resistencia nominal del miembro.

D_C es el efecto de carga muerta debido al peso propio de los elementos estructurales y no estructurales.

D_W es el efecto de carga muerta debido a la superficie de rodamiento e instalaciones para servicios públicos.

P son las cargas permanentes sobrepuestas (no incluye las estructurales).

L_L es la sobre carga vehicular.

I_M es el incremento por carga vehicular dinámica.

γ_{dc} es el factor LRFD de carga para componentes estructurales y accesorios.

γ_{DW} es el factor LRFD de carga para superficie de desgaste y utilitarios.

γ_P es el factor LRFD de carga para cargas permanentes.

φ_C es el factor de condición.

φ_S es el factor de sistema.

φ es el factor LRFD de resistencia.

El Manual for Bridge Evaluation (MBE) [8], define que en general los valores calculados de factor de carga están alrededor del número 1. Entonces, si el factor de capacidad es menor que 1 "La estructura no cumple los niveles requeridos de seguridad y requiere acciones correctivas", si el factor de capacidad es mayor o igual a 1 "El nivel de seguridad de la estructura es satisfactorio". Esto se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Evaluación de la estructura en función del factor de capacidad (RF).

	Condición			Evaluación
Si	RF	\geq	1	La estructura satisface las solicitaciones de carga
Si	RF	$<$	1	La estructura no satisface las solicitaciones de carga

Existen diversos métodos para el reforzamiento de puentes. A continuación, se van a exponer las principales características de cuatro de ellos.

2.1. Reforzamiento Mediante Encamisado Metálico De Elementos Estructurales

Cuando los elementos no tienen la suficiente sección o cuantía de acero de refuerzo para soportar las solicitaciones de diseño, se puede optar por un encamisado de los elementos estructurales que necesitan aumentar su capacidad. El término encamisado puede referirse al agrandamiento de la sección transversal a través de placas de acero de refuerzo en la parte externa del elemento. Para realizar este procedimiento, se debe tratar la superficie del elemento de hormigón armado con cepillo de alambre y limpiar todo polvo para mejorar la adherencia entre el hormigón existente y el encamisado que será aplicado. Luego se cortan dos placas de acero del espesor requerido cuyas dimensiones deben ser tales que al colocarlas alrededor del elemento de hormigón quede cierto espacio vacío entre dicho elemento y el encamisado metálico.

Investigaciones realizadas por Belal, Mohamed, & Morad [9], en 2015, indicaron que el encamisado de acero aumenta la capacidad tanto al corte como a flexión del elemento estructural en un rango entre 75% y 125%.

Otros autores como Truong, Dinh, Kim, & Choi, [10] en 2017 proponen también encamisados parciales como puede ser en los extremos de las columnas, donde existe mayor cortante, o un encamisado total que consiste en forrar de placas metálicas la totalidad de la superficie del elemento estructural. Los autores de este estudio proponen sujetar las placas al elemento de hormigón a través de pernos metálicos en lugar de sólo confiar en un adhesivo o en los elementos metálicos transversales encargados de proveer confinamiento.

En la Figura 1 se muestra el encamisado con placas y el detalle de la distribución de pernos en las placas.

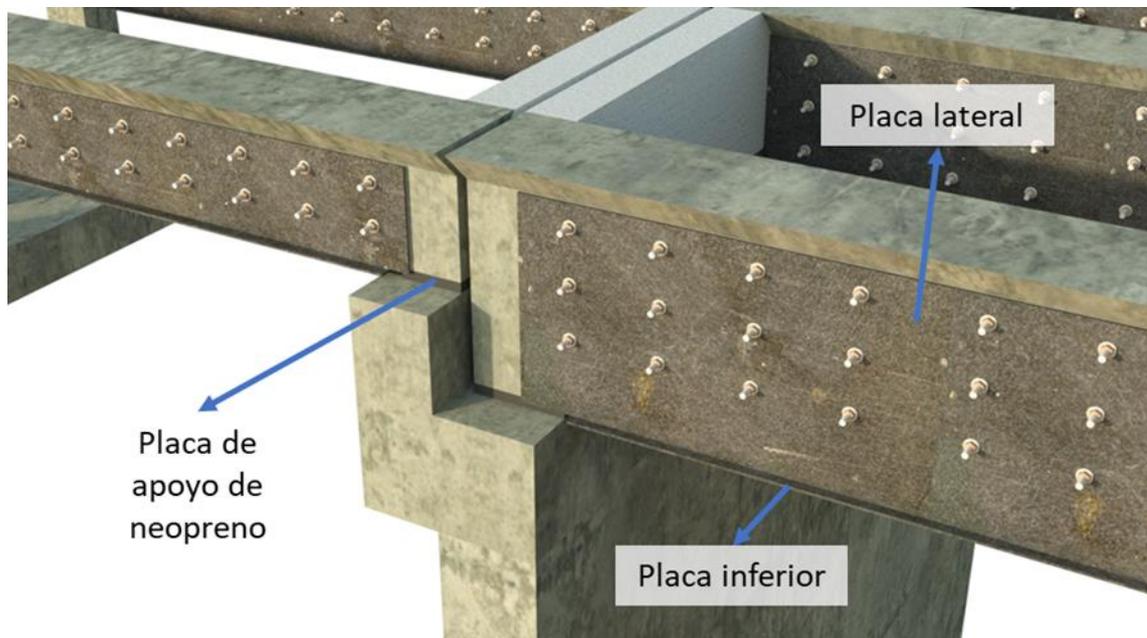


Figura 1: Encamisado con placas en vigas de puentes

2.2. Reforzamiento Con Polímero Reforzado Con Fibras De Carbono

Este método utiliza como material polímero reforzado con fibras de carbono (CFRP, por sus siglas en inglés). El código que norma y regula el uso de dichas fibras en el reforzamiento estructural de estructuras de hormigón armado es el ACI 440.2R-17 [11]. Estas fibras tienen un alto módulo de elasticidad, son delgadas y pueden aplicarse donde las alternativas tradicionales son difíciles de aplicar. En la figura 2 se muestra una foto donde se aplica este reforzamiento.



Figura 2: Viga de hormigón con polímero reforzado con fibras de carbono

Es preciso saber cuándo es conveniente aplicar este método de reforzamiento. Wang, Dai, & Bai, [12], en 2019, exponen que, si bien el método es efectivo para reforzar elementos a flexión y a corte, así como para proveer confinamiento adicional, no es efectivo para reforzar fallas de corte por punzonamiento o aumentar la capacidad de soporte de zapatas.

Los materiales de polímero reforzado con fibras son ampliamente aceptados como un aspecto importante de la infraestructura civil moderna. Las ventajas de los materiales PRF sobre los materiales de construcción tradicionales, como el acero convencional y el hormigón reforzado con acero, se basan en su rendimiento estructural mejorado en cuanto a estabilidad, resistencia y durabilidad [13].

Por lo general conllevan a una disminución de la rigidez, excepto cuando se emplean las fibras de carbono, Estos materiales están disponibles en una variedad de formas, incluidos cables, láminas, placas y más.

2.3. Reforzamiento Con Postensado Externo

Este método requiere atravesar elementos de hormigón en caso de que existan en la línea de aplicación del postensado. Cuando se trata de aplicar el método en edificios de hormigón habrá columnas y vigas por las que tendrán que atravesar los cables de alta resistencia. Para el caso particular de este puente, ya que los cables tendrían que pasar por debajo de las vigas, éstos atravesarían por las vigas cabezales sin afectar el acero de refuerzo existente en esas vigas. Se atribuye el éxito de este método al bajo costo y la mínima interrupción al funcionamiento e instalaciones del puente, así como al rápido tiempo de ejecución, pero tiene la limitante que necesita tecnología y mano de obra especializada.

En la Figura 3 se representa como aplica esta técnica del postensado externo.

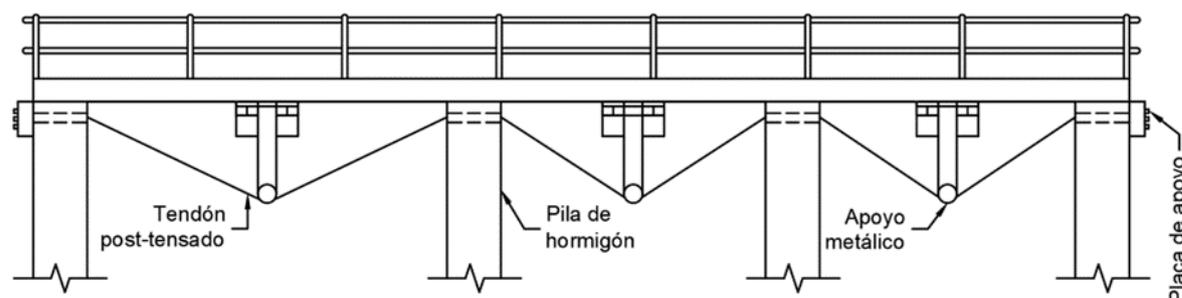


Figura 3: Aplicación de postensado externo a las vigas de un puente

Para puentes construidos vano por vano o por la unión de dovelas, el uso de tendones externos provee mayor eficiencia en la sección transversal de la caja, tanto en dirección transversal como longitudinal, lo cual hace posible un alma más angosta en la parte inferior que en la parte superior. Esto hace que el centroide de la sección transversal esté más arriba respecto al eje horizontal, lo cual maximiza la excentricidad y eficiencia del postensado en la región del vano medio, necesaria para tener un efecto dominante de flexión a través de este método [14].

2.4. Reforzamiento Con Arriostres De Pandeo Restringido

Los arriostres de pandeo restringido son disipadores de energía del tipo histeréticos y constituyen sistemas de control pasivo. Son eficaces para controlar desplazamientos laterales y disipar energía sísmica de estructuras. Estos elementos de refuerzo, similares a las riostras diagonales comunes, están constituidos de un núcleo de acero (que funciona como fusible para el disipador), una envoltura metálica alrededor del núcleo, y un relleno de mortero ocupando todo el espacio entre el núcleo y la envoltura. El núcleo de acero se lleva la carga axial mientras que el tubo exterior juntamente con el hormigón de relleno provee soporte lateral al núcleo y previenen el pandeo global. Comúnmente una delgada capa de material antiadherente entre las superficies del núcleo de acero y el hormigón elimina la transferencia de corte durante el elongamiento y contracción del núcleo de acero y también acomoda su expansión lateral cuando está en compresión [15].

En la Figura 4 se representa el detalle de un arriostre de pandeo restringido.

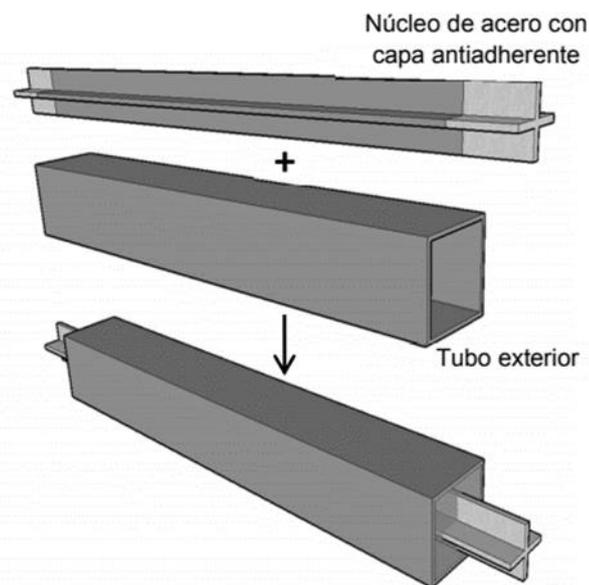


Figura 4: Detalle de un arriostre de pandeo restringido

Este sistema presenta una disposición de elementos similar al de los pórticos con arriostramiento concéntrico, con la diferencia de que la estabilidad de la estructura ya no solo depende de los arriostramientos que resisten tracción, también reciben el aporte de los arriostramientos en compresión. Para ello se emplean riostras resistentes al pandeo (BRB por su nombre en inglés Buckling Restrained Brace), que consisten, en un núcleo de acero cubierto por un material antiadherente, que evitará que este interactúe estructuralmente como una sección compuesta con el mortero con el cual se rellena el tubo donde dicho núcleo de acero es introducido.

Al estar confinado, el núcleo de acero no puede pandear y por lo tanto funciona como un elemento dúctil, que puede llegar a ser sometido al esfuerzo de fluencia. El núcleo se contrae y se expande, según el tipo de esfuerzo y sus propiedades en tracción son básicamente iguales a las de compresión.

2.5. Descripción Del Puente A Reforzar

El puente consta de una longitud total de 39,2 m, constituido de 3 tableros continuos de los cuales los extremos tienen una longitud de 10,4 m, y el del medio de 18,4 m. En la superestructura hay 4 vigas de hormigón armado de 10,4 m de longitud en cada uno de los tramos extremos y 4 vigas de hormigón armado de longitud 18,4 m en la parte central.

Las pilas están formadas por dos muros de hormigón armado en la parte central, con unas dimensiones de 8,30 m de ancho, 0,50 m de espesor y una altura de 12,10 m. En las partes externas están los estribos de hormigón armado.

La superestructura tiene una calzada formada de dos carriles cada uno de 4,25 m, dos veredas peatonales de 0,75 m cada una incluyendo las barandas y una canal de agua a cada lado, sumando en total un ancho de 10 m. La subestructura está compuesta por estribos abiertos y pilas tipo muro, con vigas cabezal "L" con trabas sísmicas.

La construcción finalizó en el año 1986 con filosofías diferentes a la propuesta por los códigos actuales, cuyas especificaciones originales, tanto en construcción como diseño, no consideraban la magnitud de los posibles peligros actuales.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En un trabajo previo de esta misma investigación, Benavides et al. [2], en 2022, concluyen que las vigas tienen déficit de resistencia a flexión ante las cargas vehiculares de la normativa ecuatoriana vigente, aunque cumplen con su resistencia a corte, determinándose que el mismo requiere de un reforzamiento para garantizar su funcionalidad a mediano y largo plazo.

Entonces se decide el reforzamiento usando el encamisado metálico, pues se considera que este método es el más idóneo para aplicar adaptado las condiciones de Ecuador. La selección de este tipo de reforzamiento es debido a que la técnica del pretensado requiere tecnología y mano de obra calificada y en Ecuador solo es utilizada de forma general en vigas de puentes y en puentes con dovelas tipo cajón. El reforzamiento con postensado exterior no se ha utilizado aún. El reforzamiento con arriostres de pandeo restringido más bien es

usado para cargas laterales, aunque podría usarse para disminuir la longitud de las vigas, pero se cambiaría el esquema de análisis de estas, teniendo momentos negativos, mientras que su diseño original es simplemente apoyado, por lo que solo tiene momentos positivos, no contando con suficiente acero en la parte superior. El uso de polímero reforzado con fibras de carbono es una tecnología que cada día cobra más importancia por sus ventajas, pero de igual forma no se conoce que haya sido utilizada aun en el país y habría que comenzar con preparar la mano de obra que la va a ejecutar. Sin embargo, el encamisado metálico si es utilizado en edificaciones y se han realizado varios proyectos con este reforzamiento en el Centro de Investigación de la Vivienda de la Escuela Politécnica Nacional.

Este estudio se complementa con un enfoque práctico sobre la implementación del reforzamiento de encamisado metálico. Para este tipo de reforzamiento se requiere de los siguientes materiales: placas metálicas, varillas roscadas, tuercas y arandelas. Las herramientas y materiales complementarios para instalar los elementos del encamisado metálico son: equipos de limpieza, taladros de percusión, mortero grout, epóxico, llave de ajuste de tuercas y material de soldadura. Además, se debe considerar el proceso de perforación de agujeros en las placas metálicas (ya sea por corte plasma o láser) y el proceso de soldadura (se recomienda usar el proceso de soldadura continuo MIG/MAG).

Para el análisis estructural del puente, representado en la figura 5, se utilizó el software CSiBridge en su versión de evaluación. Se definieron en el software las propiedades mecánicas de los materiales, la ubicación y longitud de los ejes viales, la geometría de los elementos estructurales (pilas, cabezales, diafragmas, vigas y tableros) y se construyó una representación computacional de la estructura.

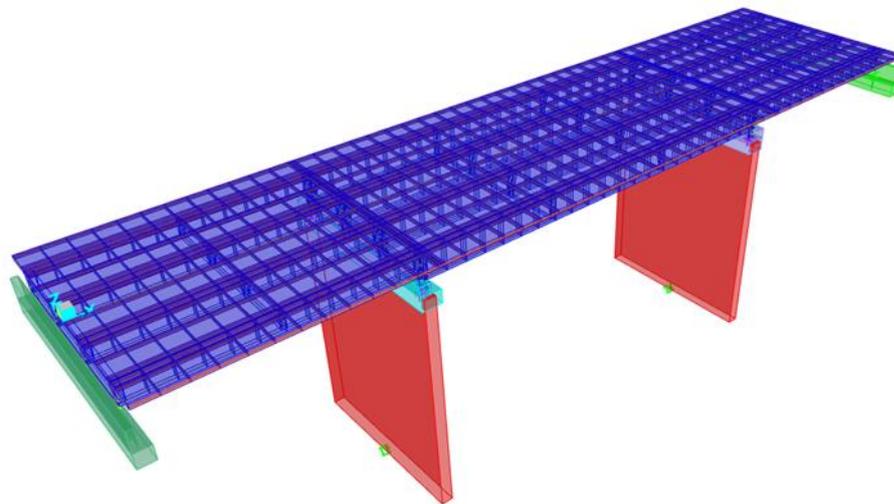


Figura 5: Geometría final del modelo computacional del puente en perspectiva

Para la definición de cargas en el modelo computacional, se consideró la carga vehicular especificada en la normativa actual del Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, que corresponde al camión de diseño HS-MTOP. El mismo que corresponde a un incremento aproximado del 37,8% del camión de diseño de la AASHTO HS-20-44. En la figura 6 se muestran las cargas asociadas al vehículo y la separación entre ellas. Estos datos fueron ingresados al modelo computacional como carga dinámica.

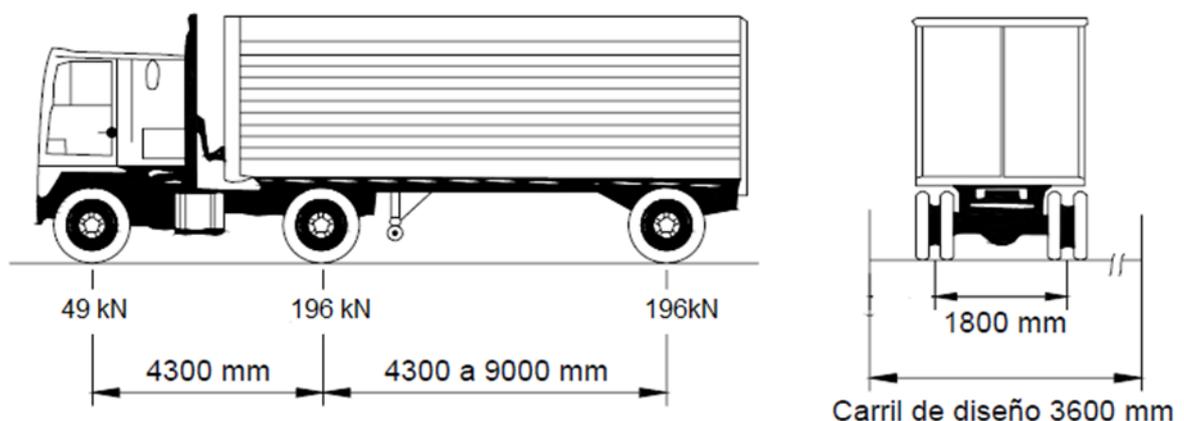
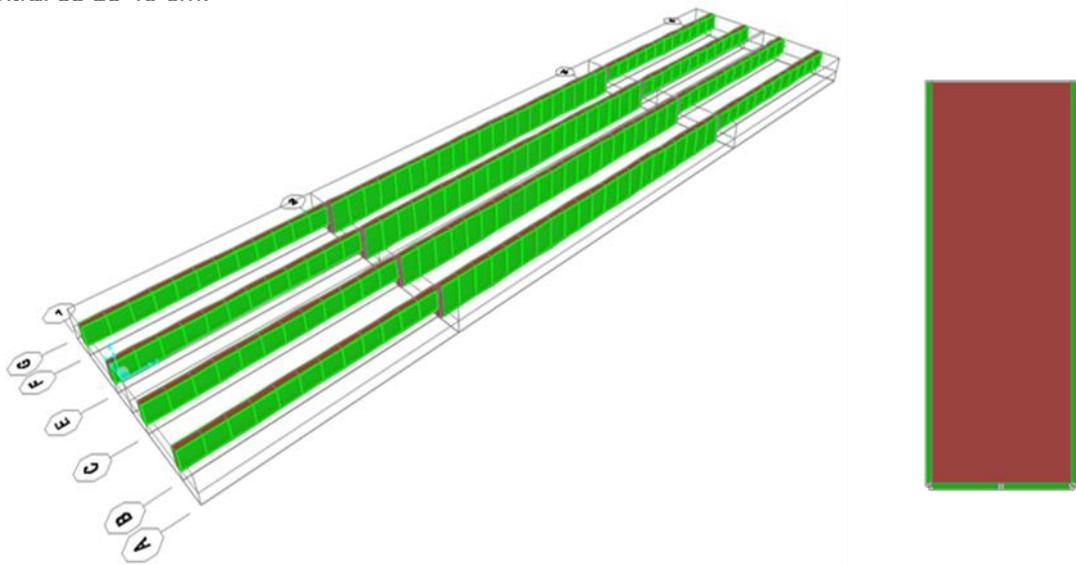


Figura 6: Camión de Diseño HS-MTOP. Fuente NEVI [16]

Una vez modelado el puente en su estado actual, se procedió a realizar otro modelo que incorpore el reforzamiento con placas metálicas de un espesor de 12 mm. Para el modelamiento de las placas metálicas, se consideró adherir elementos tipo shell con las dimensiones requeridas y los parámetros mecánicos del acero estructural ASTM-A36. En el proceso de modelamiento se colocaron las debidas restricciones de desplazamiento, para que las placas trabajen como elementos anclados a las vigas de hormigón, y no como elementos que pueden tener desplazamientos independientes. En la figura 7 se representa el modelo de reforzamiento de las vigas del puente. Se debe tener en cuenta que el software realiza un análisis de elementos finitos para la obtención de los diagramas, y discretiza a los elementos de manera que se puede encontrar un valor de fuerzas internas para cada punto de análisis.

Según el diseño estructural, se han establecido dos hileras de pernos para las placas de las vigas de los tableros laterales y tres hileras para las placas de las vigas del tablero central, mostrándose en la figura 8 una vista tridimensional del reforzamiento aplicado a las vigas del puente. Las columnas de pernos en las vigas de los tableros laterales tienen una separación de 35 cm, mientras que la separación de las columnas de pernos en el tablero central es de 40 cm.



Vigas de hormigón en rojo y encamisado de placas metálicas en verde

Figura 7: Vista en perspectiva del modelo del reforzamiento

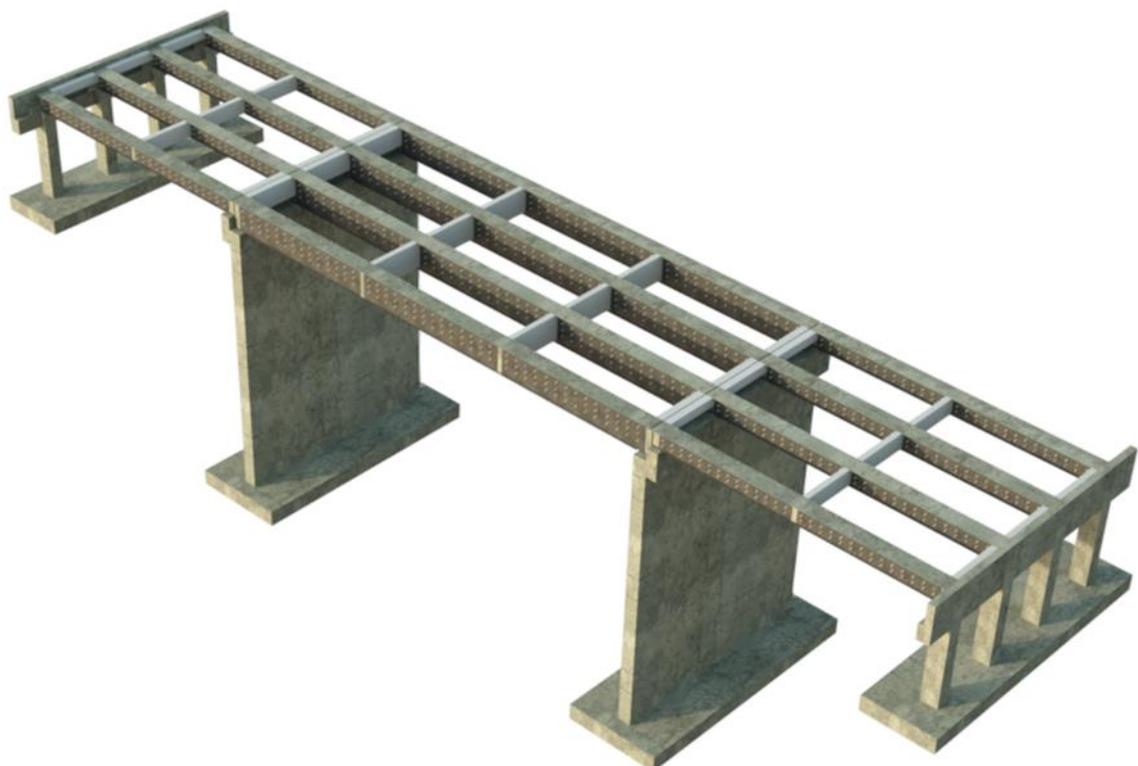


Figura 8: Vista tridimensional del reforzamiento aplicado a las vigas del puente

En la Figura 9 se puede apreciar en detalle la distribución de las placas, y pernos, ancladas a las vigas del puente.

Los pernos atraviesan toda la sección de la viga, esto garantiza un anclaje óptimo entre las placas laterales, mientras que la placa inferior va soldada a las laterales. En la figura 9 se muestra la posición de los pernos respecto a las varillas longitudinales originales de las vigas del puente. Las perforaciones se ubican de tal manera que los pernos no atraviesen ninguna varilla longitudinal. Si se da el caso de que una perforación coincida con un estribo, se recomienda perforar el estribo. Las placas se sueldan longitudinalmente a lo largo de esquinas diagonalmente opuestas, si se tratara de una sección cuadrilátera. Interiormente, en las placas se pueden soldar alambres delgados que mantengan la separación deseada entre la viga de hormigón armado y el encamisado para poder rellenar el espacio entre ambos. Ese vacío que queda se debe rellenar, y se puede hacer inyectando un material compuesto de resina epóxica y arena fina.

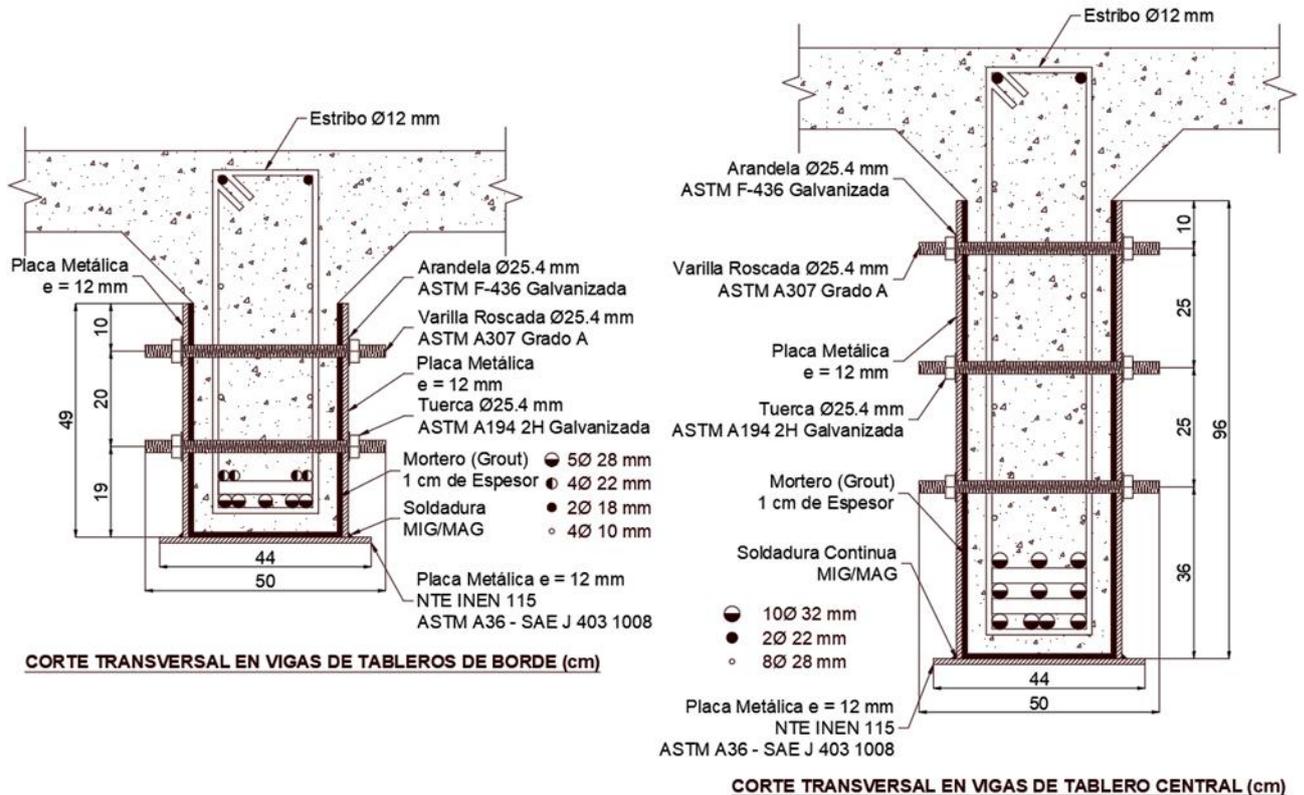


Figura 9: Sección transversal de las vigas reforzadas

Una vez que se cuenta con los dos modelos computacionales: modelo del puente en su estado actual y modelo del puente con el reforzamiento, se procede a obtener los resultados de fuerzas internas bajo las solicitaciones de carga vehicular y se aplica la metodología del cálculo del factor de resistencia (RF) para determinar el desempeño actual del puente y verificar si el reforzamiento incrementa este desempeño. En el apartado siguiente se resumen este método.

Estos datos fueron tabulados e ingresados en la ecuación (1), cuyos resultados se resumen en la Tabla 2.

Al observar la tabla 2, la cual resume los factores de capacidad RF a lo largo de las vigas del puente, se puede apreciar que, para el estado actual, los factores de capacidad para corte son todos mayores que uno, mientras que para momento se cuenta con la gran mayoría de factores de capacidad menores a uno (resaltados en rojo). Esto indica que el puente en su estado actual no satisface la demanda de diseño a flexión ante las cargas vehiculares normativas vigentes. Por otra parte, se observa que los factores de capacidad para el puente en su estado reforzado, muestra que todos son mayores que uno y generalmente se incrementan al doble al reforzar el puente con respecto a su estado actual. lo que indica que con el reforzamiento se ha suplido el déficit de resistencia a flexión. También se aprecia que incrementaron los factores de capacidad a cortante, que en cualquier caso es favorable para el desempeño de la estructura. Este tipo de reforzamiento es aplicable a las condiciones del Ecuador.

Tabla 2: Resumen de factores para el cálculo del factor de capacidad (RF).

Puente	Posición	RF			
		Estado Actual		Reforzado	
		Cortante	Momento	Cortante	Momento
	m	-	-	-	-
Tablero 1	0,00	1,10	3,35	1,84	6,47
	2,60	1,66	0,72	2,84	1,52
	2,60	2,03	0,72	3,37	1,53
	5,20	3,21	0,61	4,42	1,42
	5,20	3,01	0,61	4,23	1,42
	7,74	2,15	0,72	3,52	1,52
	7,74	1,77	0,72	2,98	1,51
Tablero 2	13,1	1,33	1,38	2,35	2,67
	13,1	1,48	1,38	2,59	2,69
	15,67	1,99	0,77	3,26	1,61
	15,67	2,23	0,77	4,11	1,64
	18,29	2,31	0,58	3,75	1,29
	18,29	2,73	0,58	4,35	1,3
	20,91	2,73	0,58	4,35	1,3
	20,91	2,31	0,58	3,75	1,29
	23,52	2,23	0,77	4,1	1,64
	23,52	1,99	0,77	3,26	1,61
	26,1	1,48	1,38	2,59	2,69
26,1	1,33	1,38	2,35	2,67	
Tablero 3	31,46	1,77	0,72	2,98	1,51
	31,46	2,15	0,72	3,52	1,52
	34,00	2,98	0,61	4,21	1,42
	34,00	3,23	0,61	4,44	1,42
	36,60	2,03	0,72	3,37	1,53
	36,60	1,66	0,72	2,84	1,52
	39,20	1,10	3,34	1,84	6,47

4. CONCLUSIONES

La evaluación del puente reflejó que las vigas tienen déficit de resistencia a flexión ante las cargas vehiculares de la normativa ecuatoriana vigente, aunque cumplen con su resistencia a corte. Por medio del reforzamiento con encamisado de placas metálicas ancladas mediante pernos a las vigas de hormigón se consiguió suplir este déficit; por lo que se puede decir que el reforzamiento cumple con su propósito.

Si se observa la Tabla 2, el factor de capacidad (RF) generalmente se incrementa al doble al reforzar el puente con respecto a su estado actual. Como se expuso anteriormente, debe cumplirse que el factor de capacidad sea mayor o igual a 1, por lo que económicamente lo más recomendado es que sea 1. De la Tabla 2 se observa que el valor más pequeño para momento flector es 1,29, por lo que se pudo disminuir el espesor de las placas de refuerzo y hacer un proceso iterativo hasta aproximarse a 1. Sin embargo, por ser ese un puente clasificado según la Importancia operacional como Crítico, se prefirió mantener ese reforzamiento previéndose un posible aumento de la carga en el futuro.

La metodología constructiva aquí mostrada es una guía que se podría seguir para la implementación en obra; no obstante, se podría adaptar a las condiciones de sitio o disponibilidad de material y herramientas, siempre y cuando se procure que se mantenga en lo posible el diseño original del reforzamiento.

Se recomienda realizar un mantenimiento periódico del puente que incluya desde la remoción de hongos, maleza, restos vegetales, propios de la humedad y así evitar el biodeterioro de los materiales. Se debe tener muy en cuenta la corrosión debido a la misma humedad y a la salinidad propia de la zona costera, que, de no controlarla, oxidará a los elementos metálicos utilizados para su reforzamiento y es recomendable realizar este mantenimiento preventivo cada 2 años. La inspección de otros elementos como capa de rodadura, aceras, barandas, drenaje hacen referencia a un proceso más puntual y directo del puente y se recomienda realizarla cada 6 años. Esta inspección debe ser muy detallada y se necesitan equipos especializados de apoyo, también la desviación del tráfico para que se pueda evaluar mucho mejor sus partes.

1. AASHTO LRFD. "Bridge Design Specifications", American Association of State Highway and Transportation Officials. 9th Edition, Washington DC, USA, 2020
2. J. Benavides, M. Díaz, L. Hernández y E. Mora, "Evaluación estructural de un puente en la ruta Spondylus del Ecuador", Revista Ciencia y Construcción, vol. 3, No. 3, pp. 6-18, 2022
3. V. Machín, F. Sima, "Evaluación de estructuras de puentes existentes con metodologías basadas en Confiabilidad". Conference: First International bridge conference - Chile - Future Challenges: Design, Construction and Maintenance, 2017
4. J. Lozano, M. Nogal, L. Jun, D. Xu, J. Turmo, G. Ramos, "Evaluación estructural de puentes existentes. técnicas de observabilidad" Second International bridge congress – Chile: Design, construction and maintenance, 2017
5. A. Garrido "Evaluación del estado de conservación y de la capacidad resistente del puente Pedro de Valdivia". Trabajo para Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Austral de Chile, 2018. Disponible en: <https://docplayer.es/158159231-Evaluacion-del-estado-de-conservacion-y-de-la-capacidad-resistente-del-puente-pedro-de-valdivia.html>
6. VicRoads, Bridge Maintenance and Repair Manual, Denmark: Structures of Roads Corporation Victor, 2018
7. Sika S.A.S, "Reforzamiento estructural de puentes vehiculares", Sika Colombia S.A.S, 2022
8. AASHTO. "The Manual for Bridge Evaluation (MBE)." 3rd Edition Washington DC, USA, 2020
9. M. Belal, H. Mohamed & S. Morad, "Behavior of Reinforced Concrete Columns Strengthened by Steel Jacket", Egypt: HBRC Journal, 2015.
10. G. Truong, N. Dinh, J. Kim & K. Choi, "Seismic Performance of Exterior RC Beam–Column Joints Retrofitted using Various Retrofit Solutions". School of Architecture, Soongsil University, Seoul, South Korea: International Journal of Concrete Structures and Materials, 2017
11. ACI440.2R-17. "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures". Farmington Hills: American Concrete Institute, 2017
12. G. Wang, J. Dai & Y. Bai, Y. "Seismic Retrofit of Exterior RC Beam-Column Joints with Bonded CFRP Reinforcement: An Experimental Study" School of Urban Construction and Safety Engineerin: Composite Structures, 2019
13. V. Kytinou, P. Kosmidou & C. Chalioris "Numerical Analysis Exterior RC Beam-Column Joints with CFRP Bars as Beam's Tensional Reinforcement under Cyclic Reversal Deformations" Applied sciences, MDPI, Basel, Switzerland, pp 1 -19, 2022
14. FHWA. "Post-Tensioning Tendon Installation and Grouting Manual". Department of Transportation: Federal Highway Administration, USA, 2013
15. S. Bahey, & M. Bruneau. (2011). "Buckling Restrained Braces as Structural Fuses for the Seismic Retrofit of Reinforced Concrete Bridge Bents". State University of New York at Buffalo, United States: Engineering Structures, 2011
16. NEVI. "Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes" (Vol. III). Quito. Ecuador. 2013

Acerca De Los Autores

Juan Carlos Mediavilla es Ingeniero Civil graduado en 2023 en la Escuela Politécnica Nacional (EPN) de Quito, Ecuador.

Luis Hernández es Profesor Titular de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental y Director del Centro de Investigación de la Vivienda de la EPN de 2019 a 2022, Ingeniero Civil graduado en 1984 en la Universidad de Camagüey y Doctor en Ciencias Técnicas graduado en 2004 en la Universidad Tecnológica de la Habana.

Martha María Molina es investigadora en Puebla, México. Ingeniera Civil graduada en 1987 en la Universidad de Camagüey y Master en Estructuras en la Universidad de Camagüey en 2010.