

UN PROYECTO SINGULAR DE REHABILITACIÓN Y AISLAMIENTO SÍSMICO: EL VIADUCTO YARUMO BLANCO EN CORDILLERA CENTRAL. COLOMBIA

A unique retrofit and seismic isolation project: The Yarumo Blanco viaduct in Cordillera Central. Colombia

Javier Muñoz-Rojas Fernández^a, Silvia Fuente García^b, Pedram Manouchehri^c

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. CFCSL. Director de División. jmrojas@cfcsl.com

^b Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. CFCSL. Directora de Proyectos. sfuente@cfcsl.com

^c Ingeniero Civil. CFCSL. Ingeniero de Proyectos. Universidad Politécnica de Madrid. pmanouchehri@cfcsl.com

RESUMEN

El viaducto Yarumo Blanco del corredor Bogotá-Buenaventura es una estructura de hormigón pretensado con sección cajón de 640 m de longitud y 11 vanos con luz típica 75 m, y junta intermedia. Tiene una marcada curvatura en planta, con una vinculación monolítica entre tablero y las pilas rectangulares con marcadas diferencias de altura. La ejecución se interrumpió durante más de tres años con la estructura parcialmente realizada. Al retomarse, se detectaron patologías estructurales además de falta de capacidad sismorresistente, que obligó a cambiar la configuración sísmica de la obra por medio de una solución innovadora basada en la instalación de aisladores pendulares en la base de las pilas cortas.

ABSTRACT

The Yarumo Blanco Viaduct along the Bogotá-Buenaventura corridor is a prestressed concrete structure with a box-girder section, spanning 640 meters in length and featuring 11 spans with a typical span length of 75 meters. The structure manifests a distinct curvature in plan, and features a monolithic connection between the deck and the piers of varying heights. Construction activities were halted for over three years, leaving the structure partially completed. Subsequent scrutiny of the original design and of the executed work yielded alarming findings, several pathologies and lack of seismic resilience. This led to modify the seismic configuration of the structure based on seismic isolation by cutting the shorter piers.

PALABRAS CLAVE: Rehabilitación, Dominio del tiempo, Aislamiento sísmico, Péndulos de fricción.

KEYWORDS: Retrofit, Nonlinear time history, Seismic Isolation, Friction Pendulum bearing

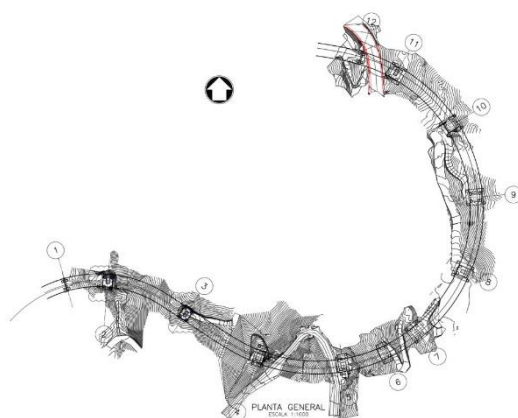


Figura 1. Configuración en planta.

1. Introducción

El viaducto Yarumo Blanco es una obra singular del corredor Bogotá-Buenaventura del proyecto Carretera Central. Tiene una longitud de 640 m distribuida en 11 vanos de luz típica 75 m con dos tramos independientes de 300 m y 330 m separados por una junta de dilatación. Tiene una marcada curvatura en planta por lo que la obra es también conocida como el viaducto de la Herradura.



Figura 2. Sección cajón dovela 0.

El proyecto original establecía un tablero para dos carriles de tráfico con una sección cajón de hormigón pretensado de 14 m de anchura y

canto variable entre 2.00 m y 4.25 m construido por avance en voladizos.

Todos los pilares cortos presentaban la misma sección cajón rectangular de 5.60x3.00 m., siendo los altos de canto variable, y se conectaban monolíticamente al tablero, excepto la pila intermedia sobre la que se sitúa la sección con junta de dilatación, que contaba con apoyos deslizantes. Dado que la orografía en la que está ubicada la obra es marcadamente abrupta y variable, la altura de las pilas resultantes era muy desigual, aspecto que condicionaba críticamente el comportamiento de la obra.

La construcción del proyecto original comenzó en 2011 pero las obras se detuvieron tres años después sin concluir. En ese momento sólo uno de los dos tramos estaba completo mientras en el otro sólo se había ejecutado parcialmente la subestructura.

Tras varios intentos por retomar la obra, el INVIAS desarrolló un proyecto que introducía ajustes y refuerzos del diseño original cuya construcción fue adjudicada al consorcio liderado por el grupo OHLA en el año 2019, actuando CFC como consultor en su propuesta.

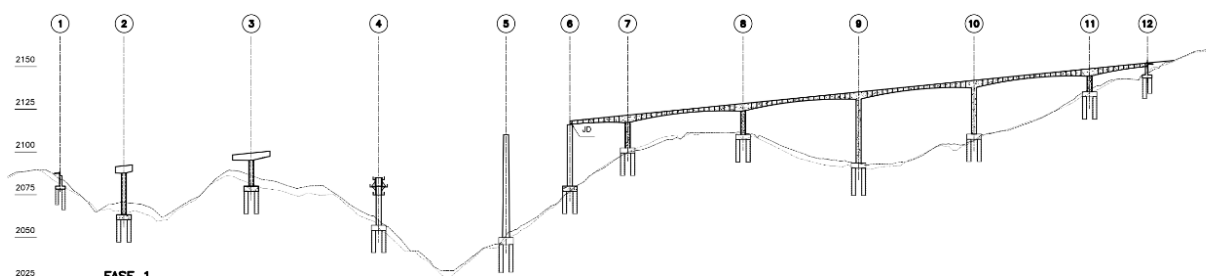


Figura 3. Alzado desarrollado del puente con el estado de la construcción en la paralización.

Dadas las incertidumbres sobre el estado de la obra construida y de su vulnerabilidad ante el evento sísmico, más aún cuando se encuentra en una de las zonas de mayor sismicidad en la

región montañosa central de Colombia, se llevó a cabo una revisión en profundidad del proyecto inicial y del proyecto de refuerzo (repotenciación), prestando especial atención al diseño sísmico de la obra y a su resiliencia.

Igualmente se acometió una campaña de inspección de la obra construida para completar los reconocimientos previamente ejecutados para el proyecto de repotenciación. Esto incluyó reconocimientos geotécnicos y su posterior interpretación y una inspección de todos los elementos de hormigón con tomas de muestras aleatorias para su ensayo. Todos estos estudios desembocaron en unas conclusiones preocupantes:

- Desde el punto de vista del diseño estructural la constatación de una inadecuada configuración sísmica del diseño original como consecuencia de las marcadas diferencias de rigidez de los pilares a los que se vinculaba rígidamente el tablero.
- Desde el punto de vista de la fiabilidad de lo construido previamente la constatación de la mala calidad generalizada de gran parte de la obra construida que había que mantener, presentando un amplio muestrario de patologías y deficiencias estructurales.

Las comprobaciones concluyeron que, para garantizar la capacidad y resiliencia futura de la obra manteniendo las partes construidas era necesario modificar su configuración sísmica - para lo cual se recurrió a una solución novedosa de aislamiento sísmico- así como acometer un variado catálogo de reparaciones y refuerzos de

muchas partes de la estructura construida -lo que incluyó el refuerzo de cimentaciones, reparación de patologías del hormigón y el empleo de pretensado exterior para el refuerzo del tablero ya construido-[1] y [2].

2. Innovación

El puente se encuentra en una zona de sismicidad extremadamente alta en la región montañosa central de Colombia. El proyecto de rehabilitación original no reevaluó la inadecuada configuración sísmica original del puente, sino que agravó el verdadero problema, ya que consistió principalmente en obras de refuerzo en las pilas más cortas y en algunas cimentaciones que redujeron la capacidad de desplazamiento de las pilas críticas.

Para aumentar su capacidad de desplazamiento -un factor clave para garantizar su resistencia en caso de sismo de gran intensidad- se consideró necesario modificar su configuración introduciendo aislamiento en la base de las pilas más cortas. Convencionalmente, los dispositivos de aislamiento se colocan en la parte superior de las pilas. Sin embargo, este planteamiento presentaba un importante reto constructivo, ya que requería la tediosa y difícil tarea de cortar la conexión monolítica entre el muelle y el tablero y, posteriormente, instalar los apoyos.

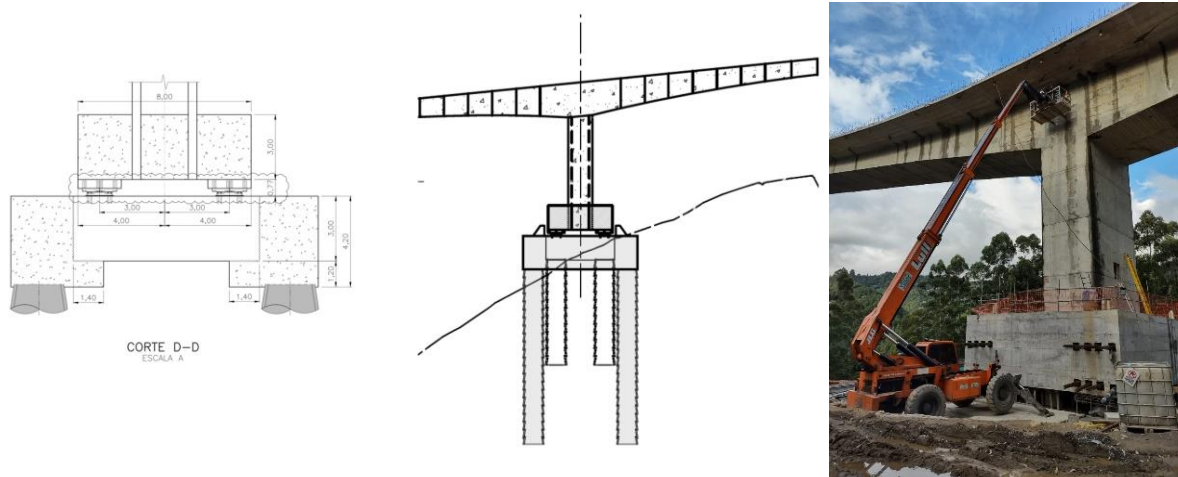


Figura 4. Aislamiento de las pilas cortas. Vista de las pilas

Para superar este problema, se aplicó una novedosa solución de aislamiento sísmico. Este planteamiento consistía en cortar la base de los pilares más cortos para instalar apoyos pendulares de fricción, con lo que se mejoraba la capacidad de desplazamiento al tiempo que se facilitaba el proceso de construcción. Otra ventaja de este enfoque es la eliminación del momento flector transmitido a las cimentaciones.

Dado que la modificación de un puente totalmente monolítico a una configuración híbrida con aislamiento de la base sólo en las

pilas más cortas es, en efecto, un planteamiento inusual, era necesario un análisis detallado y de vanguardia del comportamiento dinámico. La solución propuesta se validó mediante un análisis estructural exhaustivo, que incluía análisis no lineales en el tiempo, interacción suelo-estructura y análisis de sensibilidad, que tenían en cuenta la dispersión de las propiedades de los materiales, entre otros factores. Este riguroso análisis permitió al equipo aplicar con confianza la innovadora solución y alcanzar el nivel de desempeño deseado.



Figura 5. Aislamiento híbrido, solo en pilas cortas.

3. Rehabilitación de la estructura

3.1 Refuerzo de la subestructura

Tras la inspección inicial, se descubrió que una parte considerable de las cimentaciones de la subestructura carecía de la capacidad adecuada. Para rectificarlo, se perforaron pilotes adicionales y se ampliaron las dimensiones de los encepados para dar cabida a los nuevos pilotes. Sin embargo, una inspección más detallada reveló la presencia de importantes huecos y

discontinuidades a lo largo de los pilotes originales, lo que reducía aún más la capacidad de los cimientos.

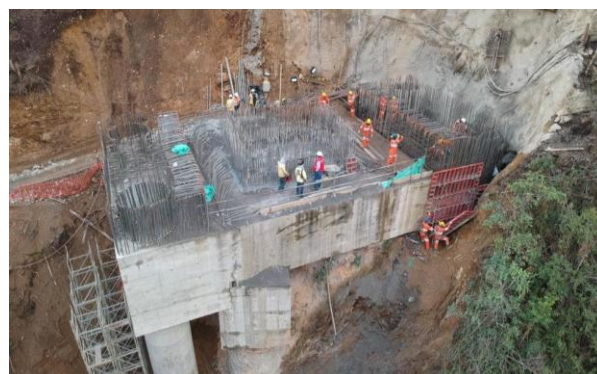


Figura 6. Bases de cimentación aisladas.

Para solucionar este problema, se ejecutaron micropilotes a través de los pilotes originales. Esta estrategia no sólo restituyó en parte la capacidad axial del pilote, sino que también permitió rellenar con lechada los huecos presentes en el pilote, mitigando así cualquier posible problema.

3.2 Aislamiento de base

Una vez finalizada la preparación de los encepados, se hormigonaron los bloques de base

de los pilares y se cosieron a éstos mediante postensado, tras lo cual se cortó el hormigón de las pilas con un hilo de diamante. Para controlar las reacciones horizontales residuales que pudieran surgir durante el proceso de corte, se incorporaron elementos de bloqueo auxiliares con gatos horizontales, mientras que los gatos verticales se utilizaron para la transferencia de carga al nuevo sistema de apoyos.

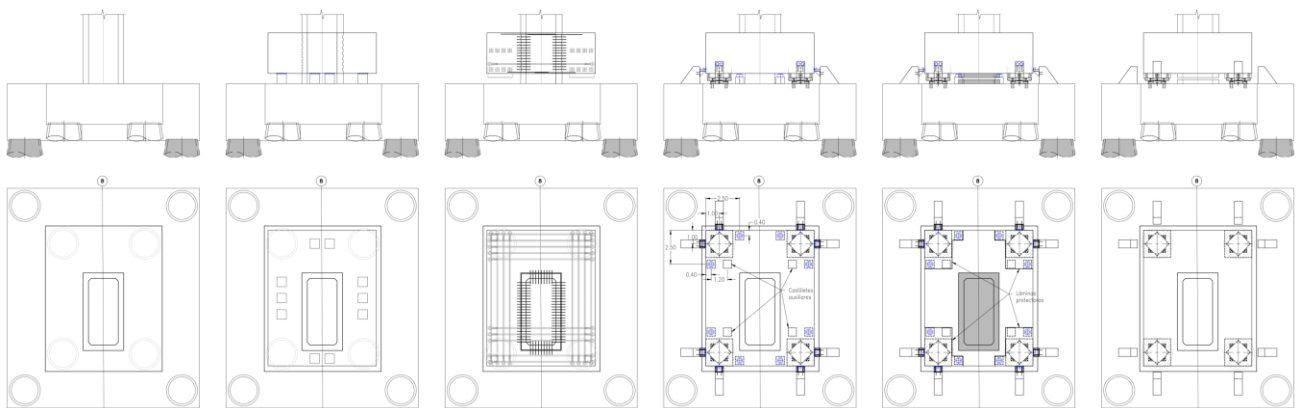


Figura 7. Secuencia de ejecución de bloques en la base de las pilas aisladas.

Para disipar eficazmente la energía durante los movimientos fuertes, se evaluaron dispositivos de aislamiento de la base, y se consideraron dos tipos. Aunque inicialmente se analizó el cojinete de goma de plomo, se comprobó que, debido a la deformación plástica de su núcleo de plomo durante un terremoto de gran magnitud, sería necesario recentrarlo o sustituirlo.



Figura 8. Bases de cimentación aisladas.

Como alternativa, se seleccionó un dispositivo de péndulo deslizante de doble cara debido a su superioridad sobre el apoyo de neopreno con núcleo de plomo. Este dispositivo utiliza la fricción para disipar la energía durante un movimiento fuerte y tiene una función de recentrado, reduciendo así la necesidad de mantenimiento y sustitución. Además, se aplicaron medidas de protección para mitigar los efectos del agua y el polvo.



Figura 9. Aisladores en la base de pilas cortas.

3.3 Refuerzo de las pilas

La revisión del proyecto también arrojó deficiencias tanto en el diseño como en la construcción de las pilas altas, que en el diseño final debían transmitir el cortante.

En la ejecución se detectaron coqueras, y falta de resistencia en el hormigón. Además se evaluó la capacidad de momento plástico de las pilas, y se detectó que no tenían capacidad para resistir el cortante asociado, que podría derivar en un fallo no dúctil de las pilas.

Fue necesario reforzar los fustes de las pilas altas monolíticas con fibra de carbono.



Figura 10. Pila forrada de fibra de carbono.

3.3 Terminación del tablero

Una vez reforzadas las pilas se procedió a la ejecución del tablero de la mitad del puente, que estaba prácticamente sin empezar, salvo las

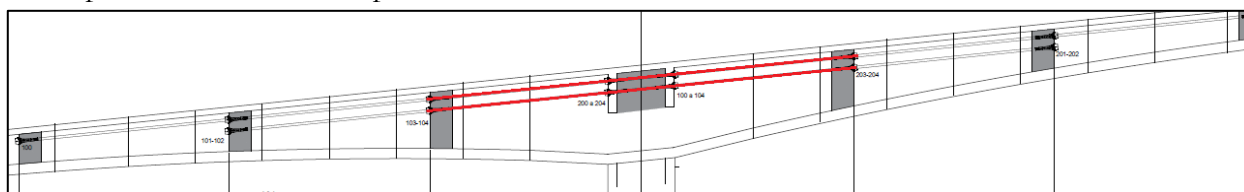


Figura 11. Distribución del pretensado exterior.

Las medidas correctoras finales implicaron la sustitución completa de los cordones de la losa inferior. El efecto de las unidades de la losa superior se sustituyó por nuevas unidades exteriores de PT. La fuerza inicial de las unidades internas se restableció completamente mediante las compresiones proporcionadas por el PT

primeras dovelas de dos de las pilas. Este se pudo ejecutar a partir del proyecto original con algunas modificaciones, para adecuarlo a los medios auxiliares disponibles.

3.4 Sustitución de pretensado y pretensado exterior adicional en el tablero

La inspección de las secciones de viga cajón construidas cinco años antes de la reanudación de la construcción del puente, reveló que las vainas de los cables de pretensado, supuestamente terminados durante la construcción original, se habían dejado sin inyectar y sin proteger en dos de los cinco vanos. Se observó corrosión generalizada, óxido y daños por agua en todas las unidades inspeccionadas, lo que planteaba un complejo dilema. Una inspección completa de todos los cables se consideró poco práctica, mientras que una inspección aleatoria limitada no proporcionaría información suficiente para establecer hipótesis de seguridad. Solo se podían sustituir los tendones anclados en los cajetines de la losa inferior, ya que las unidades de la losa superior no eran accesibles. No abordar la fiabilidad real de estos elementos podría dar lugar no sólo a un riesgo real para la seguridad de la estructura, sino también a un complejo escenario legal en caso de comportamiento incorrecto en el futuro.

externo, que se ancló en el interior de la viga a nuevos bloques de hormigón conectados a las almas y a las losas superiores

Para evitar sobrepasar los límites de tensión en el hormigón al combinar las fuerzas de ambos sistemas, la mitad de los torones superiores existentes se cortaron en una

cuidadosa secuencia realizada en paralelo al tesado de las nuevas unidades. Estos cordones cortados no se retiraron, sino que se mantuvieron en sus conductos que posteriormente se rellenaron con lechada, actuando como armadura pasiva y aumentando la capacidad última de las secciones.



Figura 12. Anclaje de pretensado exterior y refuerzo de fibra de carbono.

Para resistir los efectos locales cerca de los anclajes del pretensado externo y compensar la armadura transversal cortada para ejecutar los bloques de anclaje, se colocaron tiras de fibra de carbono en las zonas cercanas. Las medidas propuestas se llevaron a cabo para garantizar la durabilidad y la seguridad de los tendones de pretensado de la viga y para mitigar los riesgos de cualquier comportamiento incorrecto futuro.

4. Evaluación de la capacidad sismorresistente del diseño original y del diseño de repotenciación

4.1 Modelos de cálculo iniciales

La comprobación del diseño original y del proyecto de repotenciación se realizó con un cálculo modal espectral similar al empleado en dicho estudio. Se empleó un modelo con elementos tipo barra con el que se realizó un análisis de sensibilidad para diferentes hipótesis de partida que presentaban incertidumbres (cimentaciones, propiedades del hormigón, etc.). Con este estudio se pretendía comprobar la robustez de la solución del diseño de repotenciación original.

Se ajustaron para ello las condiciones de fisuración en las columnas, los valores de interacción suelo estructura y la longitud efectiva de los pilotes construidos, ya que se desconocía la colaboración de las zonas en las que se habían detectado discontinuidades mediante sondeos.

Se compararon también los resultados del mismo modelo cambiando los ejes de coordenadas, para tener en cuenta la actuación del sismo en diferentes ejes, debido a la gran curvatura en planta del viaducto.

FIGURE 1. CONFINED CONCRETE SECTION (LOWER CONFINEMENT)

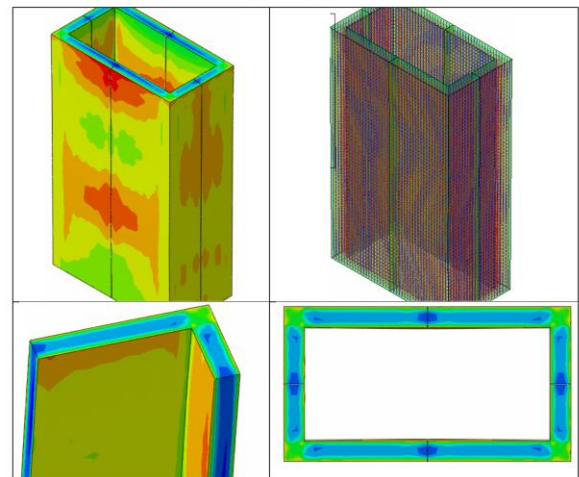


Figura 13. Modelización de las pilas de hormigón ABAQUS.

4.2 Acciones sísmicas

Durante la fase de revisión del proyecto, se determinó que el espectro de diseño original, basado en las normas colombianas, no era aplicable al emplazamiento del puente. Se llevó a cabo un análisis de riesgos específico para el emplazamiento y se definió un nuevo espectro de diseño que era significativamente mayor para periodos inferiores a 0,75 segundos. Para garantizar la seguridad y fiabilidad del puente, se seleccionaron y escalaron los registros de movimientos del terreno de acuerdo con el procedimiento especificado por la AASHTO.

Como el emplazamiento está situado cerca de una falla, también se tuvo en cuenta la aceleración vertical del terreno. Los movimientos verticales del terreno son especialmente importantes, ya que activan los modos verticales de vibración de la estructura.

Además, el dispositivo sísmico, péndulo deslizante, utilizado en el puente disipa la energía a través del mecanismo de fricción, que es a su vez proporcional a las fuerzas verticales.

El periodo del primer modo de la estructura aislada era de 2.35 segundos.

4.3 Interacción suelo-estructura

La respuesta dinámica de una estructura se ve considerablemente afectada por la interacción suelo-estructura, debido principalmente a la naturaleza blanda del suelo y a la considerable

masa de los encepados. En el proceso de diseño y selección de un dispositivo de apoyo pendular por fricción, el rango de desplazamiento de la subestructura desempeña un papel fundamental. Para modelizar el movimiento del sistema de pilotes bajo cargas sísmicas, se desarrolló una simulación numérica incorporando características de muelles no lineales en forma de curvas p-y. Estas curvas se han utilizado para reproducir eficazmente el comportamiento del sistema de pilotes y su respuesta a la actividad sísmica.

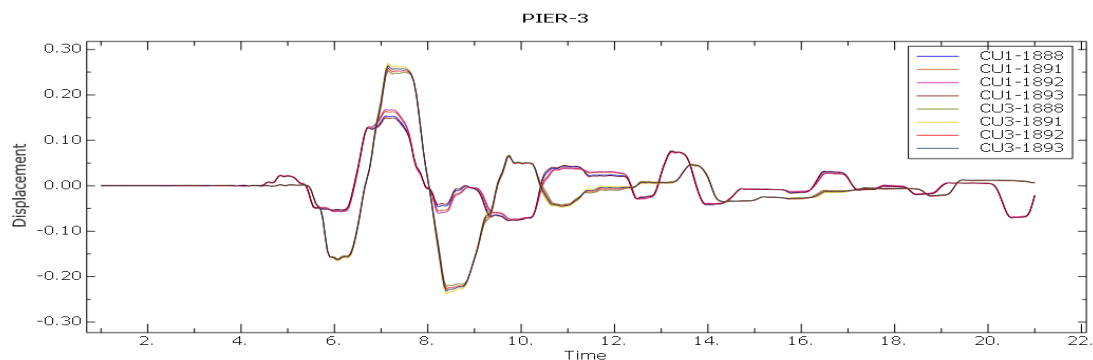


Figura 14. Simulación de los desplazamientos de los aisladores de fricción en el modelo paso a paso en el tiempo.

5. Comprobaciones de la estructura con aislamiento de base

5.1 Modelo de cálculo

Para el análisis numérico del puente se empleó un modelo más complejo que el empleado en las comprobaciones anteriores. En este nuevo estudio se combinaron elementos tipo láminas con elementos lineales realizado con el software ABAQUS. En tablero y encepados se emplean los primeros y los segundos en pilares y pilotes. En estos, dada la eventual importancia que puede cobrar en las pilas más cortas la deformación por cortante, se emplean vigas tipo "Timoshenko" [3].

Para reproducir la eventual formación de rótulas plásticas, los elementos de los pilares y pilotes incorporan la distribución de la armadura como fibras con deformaciones

unidimensionales y comportamiento elástico-plástico [3].

El comportamiento no lineal del hormigón se aproxima con el enfoque de tensión-stiffening [4].

En las evaluaciones de la estructura en la configuración inicial sin aisladores sísmicos, se utilizó un modelo de "plasticidad de daños en el hormigón (CDP)" en las secciones de los pilares. Tras la integración de los dispositivos de aislamiento de base, esta metodología cambió a una combinación de elementos de viga y modelos con tensión-stiffening asumiendo que tras la intervención los elementos de hormigón permanecen en el rango elástico.

5.2 Modelización de los aisladores

El comportamiento de los aisladores se simuló mediante el riguroso análisis dinámico paso a paso del modelo de elementos finitos de la estructura sometida a siete conjuntos de movimientos tridimensionales compatibles con

el espectro de respuesta. Las siguientes figuras demuestran la histéresis de los aisladores.

5.3 Modelos locales

Se realizaron modelos locales con elementos tipo sólido de todas las cimentaciones y bloques de anclaje a las pilas de los sistemas de aislamiento.

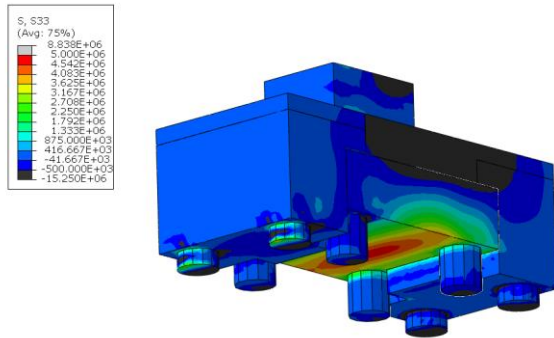


Figura 15. Modelos locales de las cimentaciones.

6. Conclusiones

Durante la modernización y rehabilitación del puente Yarumo Blanco se enfrentaron a importantes retos, como la mala calidad de los componentes construidos y la vulnerabilidad crítica derivada de la inadecuada configuración sísmica original. No obstante, el equipo del

proyecto ideó con éxito un proyecto de rehabilitación con una solución innovadora de aislamiento sísmico. En lugar de demoler los elementos existentes, el proyecto optó por readaptarlos, con lo que se ahorró una importante cantidad de hormigón procedente de la demolición, se redujo la huella de carbono global del proyecto y, paralelamente, se redujo el impacto en el paisaje natural.

La solución a la que se llegó es fácil de mantener y estéticamente adecuada, ya que no se introdujeron modificaciones importantes en el diseño original del puente. Además, el proyecto se sometió a exhaustivas inspecciones, lo que garantizó su seguridad. Aunque se descubrieron numerosos defectos durante el proceso de rehabilitación, el equipo del proyecto demostró flexibilidad para resolverlos a medida que avanzaba la construcción. El proyecto también ofrece valiosas perspectivas sobre la aplicabilidad de los sistemas de aislamiento de bases a estructuras complejas con una geometría y un comportamiento dinámico complejos. Esta solución innovadora permitió dotar al puente del nivel de prestaciones deseado, mostrando la importancia del pensamiento creativo y el análisis riguroso en los proyectos de ingeniería.

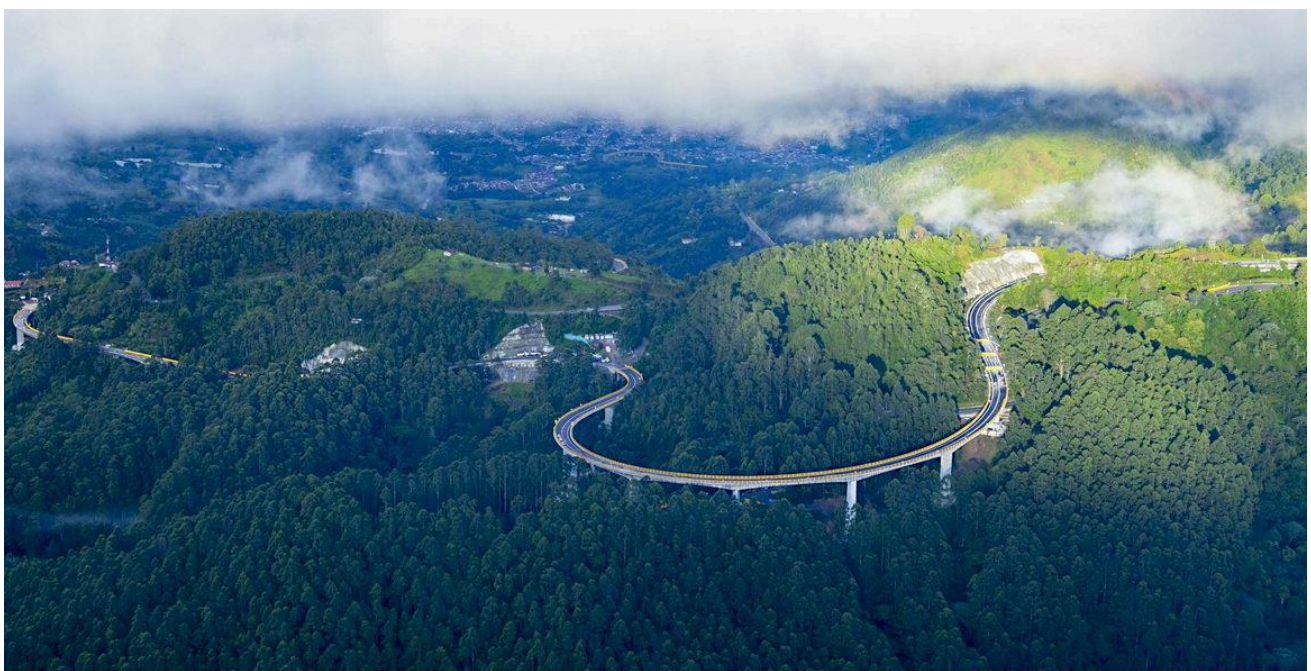


Figura 16. Vista aérea del puente terminado.

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a las siguientes entidades y personas que han permitido la realización de este proyecto:

INVIAS, Ingeniero Carlos Felipe Sandoval, en la propiedad

Consorcio Vía América OHLA-Ginovart-Alca, con los ingenieros Ignacio Echarte, Benito Incera, Juan Sebastián Acosta, Jhon Fredy

Pedraza y Albert Barbosa que participaron en la construcción construcción.

Servicios técnicos de OHLA: Mauricio Aguirre y Carlos León.

UIS: Álvaro Viviescas

Maurer SE: Raúl Arranz, Sebastián Patiño y Sabrina Vargas, proporcionando los aisladores SEC-VSL que ejecutaron el pretensado.

Al todo el equipo de Carlos Fernández Casado que participó en la obra, especialmente Raúl González y Miguel Ángel Gil.



Figura 17. Vista final del viaducto de Yarumo Blanco.

Referencias

- [1] Muñoz-Rojas, J , Echarte, I Viviescas, A, (2022) *Una solución innovadora de aislamiento sísmico de obras existentes: El proyecto de repotenciación del puente de la Herradura en la Cordillera Central*, XXVIII Congreso Nacional de la Ingeniería. Barranquilla.
- [2] Muñoz-Rojas, J. , Fuente, S., Manouchehri, P., (2022) *El proyecto de repotenciación del puente de la Herradura en la Cordillera Central*, Simposio Latinoamericano de Puentes, Midas.

Asociacion Ingenieros Estructurales de Antioquia.

- [3] Abaqus, *Analysis User's Guide*, 2018th ed. (2018) , Simulia Corp.:Dassault Systèmes.
- [3] Abaqus, *Therory Guide*, 2018th ed. (2018) , Simulia Corp.:Dassault Systèmes.