

Sustitución de los tirantes del puente Santa Rosa en Bolivia

Replacement of the stay cables of the Santa Rosa Bridge in Bolivia

Josué Galvis Ramos^a, Raimon Rucabado Jiménez, Ángel Aparicio Bengoechea^c,
Elkin Peña Leal^d, Rodolfo J. Tirado Gutiérrez^e, Mario A. Silva Cancino^f

^a MSc in Structural Engineering. Josué Galvis R & Asociados. Consultor en ingeniería estructural. jgalvis@unal.edu.co

^b MSc in Civil Engineering. MeKano4, S.A. Director de Proyectos especiales. rucabado@mekano4.com

^c PhD Civil Engineer. UPC, Barcelona Tech. Consultor en ingeniería estructural. angel.carlos.aparicioupc.edu

^d Master's student in Structural Engineering. MK4 COLOMBIA S.A.S. Jefe de proyecto. elkin.pena@mekano4.co

^e Ph.D. student in Civil Engineering. MK4 COLOMBIA S.A.S. Director técnico. rodolfo.tirado@mekano4.co

^f Civil Engineer. MK4 COLOMBIA S.A.S. Gerente. marioalfredosilvac@mekano4.co

RESUMEN

Este trabajo aborda el proceso de diseño, mantenimiento y rehabilitación de un puente atirantado en Bolivia, ubicado entre los departamentos de Santa Cruz y Chuquisaca (Sucre). Tras más de 30 años de servicio, la rotura de uno de sus tirantes propició la realización de un estudio de patología y capacidad resistente, el cual reveló la necesidad de sustituir todos sus tirantes. Este documento presenta los aspectos técnicos del diseño y del proceso constructivo, ofreciendo una visión integral de la planificación, ejecución y los resultados obtenidos durante todas las fases del proyecto, así como los desafíos que surgieron durante su materialización.

ABSTRACT

This paper addresses the design, maintenance, and rehabilitation process of a cable-stayed bridge in Bolivia, located between the departments of Santa Cruz and Chuquisaca (Sucre). After more than 30 years in service, the failure of one of its stay cables prompted a structural pathology and load-bearing capacity assessment, which identified the need to replace all the stay cables. This document presents the technical aspects of the design and construction process, providing a comprehensive overview of the planning, execution, and results obtained throughout all phases of the project, as well as the challenges encountered during its implementation.

PALABRAS CLAVE: Vulnerabilidad, rehabilitación, tirantes, puente atirantado.

KEYWORDS: Vulnerability, rehabilitation, stay cables, cable-stayed bridge

1. Introducción

El puente Santa Rosa está ubicado en el límite entre los departamentos de Santa Cruz y Chuquisaca, en Bolivia. Su estructura fue diseñada por la empresa Jean Müller International, y su construcción se llevó a cabo entre los años 1990 y 1992. La estructura tiene una longitud total de 190 metros, dividida en tres vanos: dos laterales de 30 metros y uno central de 130 metros (Figura 1). Está conformada por dos pilas o pilones de 32 metros de altura, que se conectan al tablero mediante 48 tirantes (12 por cada pila, distribuidos en dos caras: lado norte y lado sur). El tablero consiste en una losa esbelta con ancho de calzada de 7.30 m y espesor entre 250mm y 355mm (Figura 2).



Figura 1. Vista general del puente Santa Rosa, antes de su intervención.

Los tirantes originales estaban compuestos por torones de 7 hilos de acero de 0.6", con 12 torones en los tirantes más largos (T3, T4, T5 y T6) y 7 torones en los tirantes más cortos (T1 y T2). Los torones eran continuos y recorrían toda la longitud desde los anclajes en el vano central hasta los anclajes en los vanos laterales y estribos, pasando por la cabeza de pila a través de tubos desviadores cuadrados de 90 mm x 90 mm, los cuales estaban apoyados sobre una lámina de acero de 12 mm anclada a la

cabeza de pila. Los estaban inyectados en toda su longitud con lechada de cemento, excepto en las zonas de anclaje.

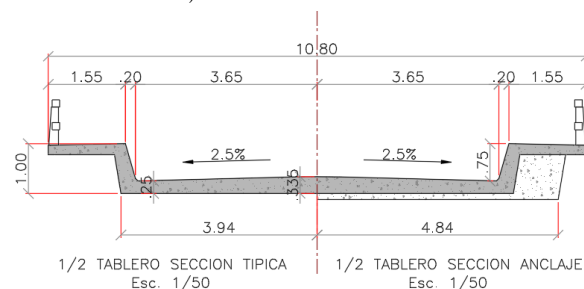


Figura 2. Sección típica del tablero.

En 2017, el puente sufrió la rotura del tirante 5, ubicado en el vano central, en el lado sur del pilono Santa Cruz. Los registros fotográficos muestran que el tramo donde ocurrió la rotura no había sido correctamente inyectado, lo que dejó vacíos en el cable. Esta deficiencia propició la corrosión de los torones, provocando un deterioro progresivo de la sección de acero, lo que finalmente ocasionó la rotura del tirante (Figura 3).



Figura 3. Rotura de tirante 5, lado sur, pilono Santa Cruz, ocurrido el año 2017.

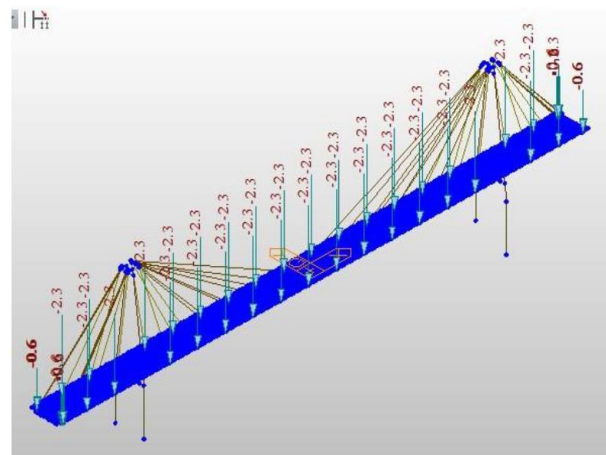
En 2021, en respuesta a lo sucedido y a las recomendaciones de un diagnóstico previo de la estructura [1], que advertía sobre una posible corrosión en los torones inmersos en la lechada de cemento, la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC) contrató los estudios y un proceso de rehabilitación del puente.

La planificación del proyecto consideró tanto los aspectos técnicos como logísticos, ya que el puente se encuentra en una ubicación remota, lejos de fuentes de suministro de materiales y maquinaria. Además, las actividades de rehabilitación debían ejecutarse sin interrumpir el flujo vehicular. Se desarrolló un plan detallado que abarcó desde la instalación de equipos hasta las pruebas de carga y controles de calidad, optimizando cada fase del proceso sin afectar la operatividad del puente.

El proceso de diseño para la sustitución de los tirantes del puente Santa Rosa se llevó a cabo con un enfoque integral que abarcó diversos aspectos técnicos para garantizar la seguridad, eficiencia y durabilidad de la estructura. Se inició con la creación y calibración de un modelo estructural detallado, que permitió evaluar el comportamiento del puente bajo diversas cargas y verificar la capacidad de los tirantes existentes. El siguiente paso fue el diseño de los conectores de tirantes, elementos clave para garantizar la correcta fijación y distribución de las cargas entre los tirantes y el resto de la estructura del puente. Estos conectores fueron diseñados con materiales y geometrías específicas para optimizar su rendimiento y adaptabilidad a las condiciones de la obra civil existente.

afectar la circulación vehicular. A continuación, se detalla cada una de estas fases.

Tras recopilar y organizar la información disponible—planos originales, memorias de cálculo, reglaje altimétrico, fuerzas de los tirantes, levantamiento topográfico y estudios previos—se desarrolló un modelo tridimensional en el software MIDAS CIVIL 2021 v1.0 para analizar el comportamiento estructural bajo las diversas cargas. (Figura 4). Este enfoque integral posibilitó una evaluación precisa de las deformaciones, esfuerzos y estabilidad de la estructura, considerando tanto las condiciones originales como los factores actuales que pudieran influir en su desempeño estructural.



Este modelo se construyó utilizando elementos tipo barra para las vigas del tablero y las pilas, elementos placa para el tablero y elementos tipo cable para los tirantes. Se asumió que la cimentación estaba empotrada en la base.

Josué Galvis, Raimon Rucabado, Ángel Aparicio, Elkin Peña, Rodolfo Tirado y Mario Silva / IX CONGRESO ACHE – GRANADA 2025 3

2.2 Verificación de la capacidad de los tirantes.

Al tratarse de una estructura existente, fue crucial tener en cuenta las condiciones geométricas previas. Entre otros aspectos, se debía determinar si los diámetros de los tubos guía embebidos en el tablero serían suficientes para albergar los nuevos tirantes, los cuales estarían conformados por torones con una mayor área de sección más la vaina de polietileno de alta densidad HDPE de protección. Los tubos guía embebidos en el tablero tenían diámetros de 225 mm y 187 mm, adecuados para tirantes de 12 y 7 torones, respectivamente (Figura 5).



Figura 5. Tubos guía embebidos en estribos para tirantes de 12 torones.

El análisis determinó que los tirantes cumplían con los requisitos de carga sin exceder los límites normativos en estados límite de servicio y último. Por ello, no fue necesario aumentar el número de torones ni modificar los tubos guía, permitiendo conservar la configuración original del proyecto y garantizando la seguridad y estabilidad de la infraestructura.

2.3 Conector de tirantes

El desviador de tirantes, situado sobre la cabeza de la pila, consistía en un tubo cuadrado de 90×90 mm para cada tirante, que descansaba sobre una lámina de acero de 12 mm anclada a la cabeza de la pila. Estos desviadores se alojaban en canales de 95 mm de ancho, los cuales

contaban con topes laterales que evitaban el deslizamiento transversal del tubo (Figura 6).



Figura 6. Cabeza de pila lado Santa Cruz, antes de la intervención.

Para la sustitución de los desviadores, inicialmente se consideró implementar una solución similar a la original, pero sus dimensiones resultaban insuficientes para los nuevos torones, que contaban con protección individual de polietileno y un mayor diámetro (15,7 mm).

Después de estudiar y analizar diversas alternativas, se determinó que la solución más viable consistía en sustituir los desviadores originales por conectores de tirantes agrupados. Con esta nueva solución, los cables delantero y trasero se conectaban entre sí mediante un conector que cumplía la misma función que el desviador existente (Figura 7). Esta configuración permitió la coexistencia de los tirantes antiguos, los tirantes provisionales y los tirantes nuevos durante el proceso de sustitución.

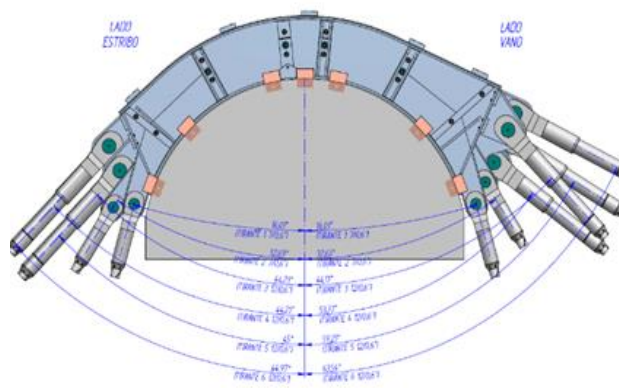


Figura 7. Esquema de conjunto de conector de tirantes.

Los elementos que componen los conectores de tirantes fueron dimensionados siguiendo las recomendaciones de [2 a 4]. Además, se realizó una validación de la estabilidad a pandeo global y local de los componentes principales de los conectores mediante el análisis de un modelo de elementos finitos. En este análisis, se evaluó el escenario más desfavorable, correspondiente a la sustitución del primer grupo de tirantes (Figura 8).

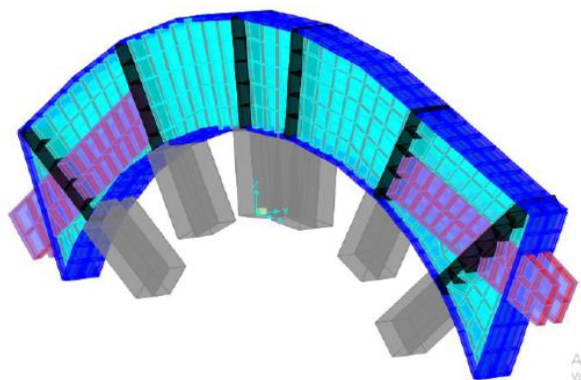


Figura 8. MEF de conector de tirantes.

2.4 Metodología para la sustitución de los tirantes.

Dada la incertidumbre sobre la integridad y capacidad de resistencia de todos los tirantes existentes, así como las dificultades para inspeccionarlos adecuadamente dentro de las vainas de protección de estos para detectar posibles avances de corrosión o pérdida de sección, se consideró necesario instalar tirantes provisionales. Estos se ubicarían en posiciones adyacentes a los bloques de anclaje de los tirantes actuales, proporcionando un margen de seguridad durante la ejecución de los trabajos.

Una vez definidos el tipo de tirantes a utilizar, la solución para la cabeza de pila y los elementos provisionales requeridos, se propuso una estrategia de sustitución por familias de tirantes. Cada familia de tirantes estaba conformada por un tirante del vano principal, su contrarresto y el par de tirantes simétricos respecto al eje longitudinal del tablero, es decir, 6 familias por cada pila, sumando un total de 12 familias. Se establecieron 48 etapas para la

sustitución de las 12 familias de tirantes, organizadas en el siguiente ciclo: a) Montaje y tesado de los tirantes provisionales, b) Destesado, corte y desmontaje de los tirantes existentes, c) Montaje y tesado de los tirantes nuevos, d) Destesado de los tirantes provisionales. Estas actividades se detallan en el siguiente capítulo.

3. Ejecución de trabajos en campo

3.1 Montaje y tesado de tirantes provisionales.

Los tirantes provisionales consistían en 4 cables de 12 torones de pretensado de 0.6 pulgadas, los cuales sostenían el tablero a través de elementos metálicos ubicados en el vano principal y el estribo, que pasaban por un desviador provisional ubicado en la cabeza de pila. El desviador provisional consistía en una silla curva que desviaba los torones, permitiendo su paso desde el vano principal hacia el vano lateral y el estribo. Este se ubicaba entre la viga que conecta las dos cabezas de pila. (Figura 9).



Figura 9. Desviador provisional sobre pila, antes de su instalación.

Los elementos metálicos del estribo y el tablero estaban conformados por cerchas metálicas ancladas al tablero mediante barras de pretensado. Estas cerchas contaban con un brazo basculante en el cual se encontraban las

placas de anclaje y las cuñas de los tirantes provisionales (Figura 10).



Figura 10. Elemento provisional en vano principal.

Una vez posicionados los elementos provisionales en la zona de anclaje del tirante a reemplazar, se procedía a su ajuste mediante barras de pretensado, utilizando gatos hidráulicos. Posteriormente, se llevaba a cabo el enfilado de los torones y el tesado de cada uno de estos, de forma secuencial, hasta alcanzar la carga definida en el diseño.

3.2 Destesado, corte y desmonte de tirantes existentes

Debido a que los tirantes existentes estaban completamente inyectados con lechada de cemento en toda su longitud, no era posible aplicar carga a estos torones para soltar las cuñas de sujeción en el anclaje existente, esto debido, a que la lechada impedía la elongación de los torones, bloqueando así el proceso de destesado. En consecuencia, se optó por cortar los tirantes en una zona previamente definida. Para abordar esta situación, se diseñaron e implementaron accesorios de acero, denominados "bridas de sujeción" (Figura 11), que se fijaban a los tirantes existentes mediante bloques cilíndricos de hormigón estructural adheridos a los torones. Estas bridas sostenían la carga a través de cuatro barras de pretensado de 32 mm de diámetro, lo que permitía transferir la carga del tirante

existente al tirante provisional de manera controlada.



Figura 11. Brida de sujeción en tirante existente.

El accesorio incluía un tramo donde los torones quedaban expuestos, los cuales eran cortados aplicando fuego lentamente con el fin de debilitar progresivamente la sección del tirante existente (Figura 12). Una vez cortados los torones, la brida de sujeción sostenía ambos extremos del tirante y transmitía la carga a las barras de pretensado, que eran descargadas mediante gatos hidráulicos huecos. Con el tirante existente completamente descargado, se procedía al desmontaje tanto del tirante del vano principal y de retenida como del desviador original.

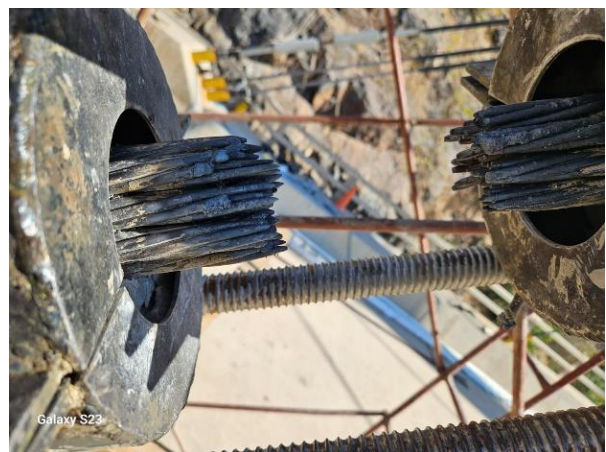


Figura 12. Torones cortados (tirante No. 5).

3.3 Montaje y tesado de tirantes nuevos.

3.3.1 Instalación y posicionamiento de conector de tirantes.

Una vez retirado el tirante existente, se procedía a realizar una limpieza exhaustiva del canal donde se encontraba el desviador original. Luego, se repintaba la superficie con un material protector de alta adherencia. Posteriormente, se cubría el canal del nuevo tirante con una capa de resina adhesiva epóxica, de aproximadamente medio milímetro de espesor, para formar una base adecuada. En ese momento, se instalaba el conector correspondiente, asegurando su ortogonalidad (Figura 13).



Figura 13. Instalación del primer conector de tirantes correspondiente al tirante 5 lado sur lado Santa Cruz.

3.3.2 Instalación y tesado de tirantes.

Los nuevos tirantes eran prefabricados en el tablero del puente y se desplazaban longitudinalmente sobre rodillos. Posteriormente, se izaban utilizando una brida en el extremo superior. Una vez que el elemento estaba en posición, se insertaba el bulón entre la horquilla y la orejeta correspondiente del conector. Luego, el extremo inferior del tirante se elevaba con una grúa hasta que los extremos de los torones penetraban en el tubo guía (Figura 14).



Figura 14. Conexión de tirantes nuevos a conector en cabeza de pila.

Una vez enhebrados los torones, se procedía al tesado utilizando un gato unitario, alcanzando las cargas especificadas en el diseño. Se debía tener especial cuidado en no desfasear un tirante respecto a su opuesto en más del 20% de la carga, para evitar el deslizamiento del conector.

3.4 Destesado de tirantes provisionales

Una vez finalizado el tensionado de cada par de tirantes (lado sur y norte), se procedía al destesado de los tirantes provisionales (Figura 15). Tras verificar las fuerzas en los tirantes nuevos, se retiraban los tirantes provisionales y se trasladaban a la siguiente posición.



Figura 15. Destesado de tirantes provisionales

Estas actividades se realizaron para las 12 familias de tirantes, permitiendo la renovación completa de los tirantes del Puente Santa Rosa.

En la Figura 16 se muestra la estructura con los nuevos tirantes, reflejando el resultado del trabajo realizado.



Figura 16. Vista general puente Santa Rosa al finalizar la sustitución de los tirantes.

4. Deformaciones en tablero y tensiones en tirantes.

El seguimiento y control de la ejecución de los trabajos se realizó mediante la observación de las deflexiones del tablero y los pilones, comparando las deflexiones teóricas esperadas con las deflexiones reales en cada fase del proceso. Antes de la sustitución de cada grupo de tirantes, se llevó a cabo una medición topográfica de los puntos de control ubicados en las zonas de anclaje sobre el tablero y la cabeza de pila (Figura 17). Las mediciones se realizaron entre las 7:00h y las 8:00h de la mañana, con el fin de garantizar que se efectuaran bajo

condiciones de temperatura homogénea en la estructura.

Para la etapa final (Etapa 48), se proyectó una contraflecha de 65 mm en la mitad del vano central, como medida preventiva ante las pérdidas diferidas ocasionadas por la elongación de los tirantes nuevos. Se asumió que las deformaciones debido a la retracción por fraguado y al flujo plástico del hormigón ya se habían producido, dado que se trataba de una estructura construida hace más de 30 años.

4.1 Deformaciones del tablero.

En la Figura 18 se comparan las curvas de deformaciones correspondientes a la etapa 0 (la geometría inicial del tablero antes de iniciar los trabajos), la deflexión teórica y la deflexión real del lado sur, después de finalizar la etapa 48 (Ultima etapa). En general, se observa que la curva de deflexión real sigue una forma similar a la curva de deflexión teórica, con un desfase en el vano central que varía entre 17 mm y 27 mm. De manera similar en la Figura 19, al analizar el lado norte se encuentra un desfase entre las deflexiones teóricas y las reales que oscila entre 6 mm y 30 mm.

En cuanto a las deformaciones de los pilones, se descartó su monitoreo debido a la imposibilidad de medir las coordenadas iniciales antes de iniciar los trabajos, lo que impidió establecer un punto de referencia para el seguimiento.

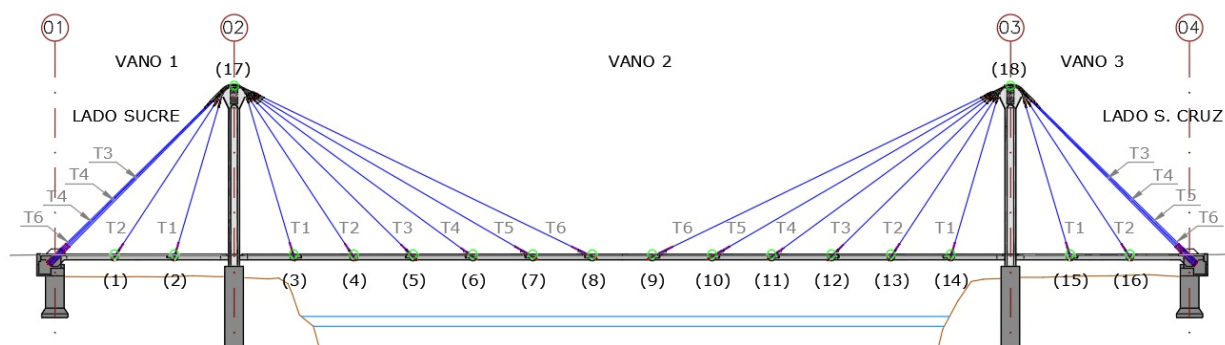


Figura 17. Identificación de puntos de control.

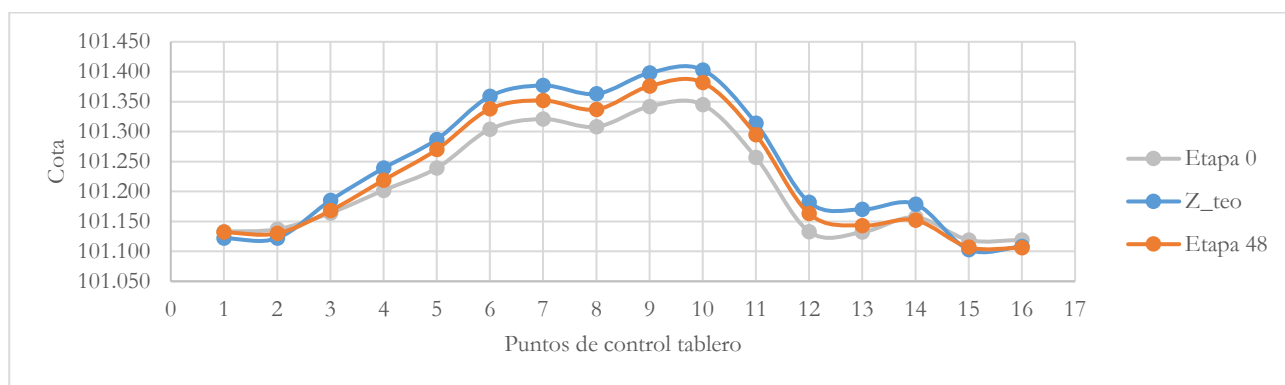


Figura 18. Deformaciones del tablero lado sur.

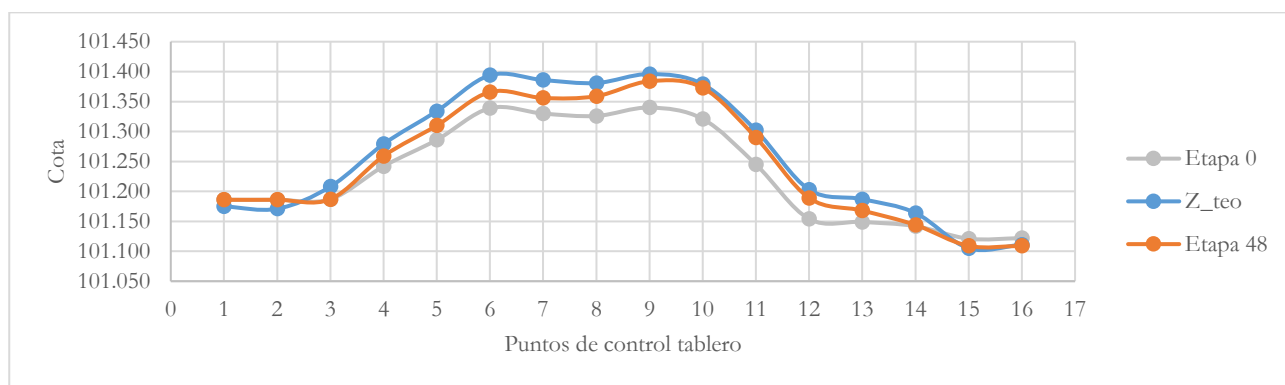


Figura 19. Deformaciones del tablero lado norte

4.2 Cargas en tirantes

Una vez finalizada la etapa 48, se procedió a medir las cargas en los tirantes mediante la verificación de presión con manómetro (ver Tabla 1). Al comparar las cargas teóricas esperadas con las cargas obtenidas en campo, se observó que la relación entre la carga real y la carga teórica fluctuaba entre el 90% y el 110% para la mayoría de los tirantes, con excepción de algunos de los tirantes 2 y 3. Este comportamiento fue analizado y se concluyó que los valores eran aceptables, considerando que, para la elaboración del modelo matemático, había sido necesario hacer suposiciones y aproximaciones sobre las propiedades de los materiales existentes.

Tabla 1. Cargas teóricas vs cargas reales en tirantes tras etapa final.

Tirante	Pilon	Ubic.	Carga teórica [Tonf]	Carga real [Tonf]	C. real/ C. teo
6	SUCRE	RET	104.4	105.0	1.01
6	SUCRE	PRIN	102.7	109.9	1.07
6	S. CRUZ	RET	104.6	110.0	1.05
6	S. CRUZ	PRIN	102.5	110.9	1.08
5	SUCRE	RET	104.2	100.3	0.96
5	SUCRE	PRIN	95.8	92.8	0.97
5	S. CRUZ	RET	104.4	107.1	1.03
5	S. CRUZ	PRIN	95.8	92.0	1.04
4	SUCRE	RET	102.3	107.7	1.05
4	SUCRE	PRIN	94	86.3	0.92
4	S. CRUZ	RET	102.5	109.4	1.07
4	S. CRUZ	PRIN	94.1	92.3	0.98
3	SUCRE	RET	102	107.8	1.06
3	SUCRE	PRIN	57.3	76.5	1.33
3	S. CRUZ	RET	102.2	116.3	1.14
3	S. CRUZ	PRIN	57.5	77.7	1.35
2	SUCRE	RET	54.9	58.2	1.06
2	SUCRE	PRIN	55.5	57.3	1.03
2	S. CRUZ	RET	55	57.0	1.04
2	S. CRUZ	PRIN	55.6	62.2	1.12
1	S. CRUZ	RET	54.7	56.9	1.04
1	S. CRUZ	PRIN	58.6	56.8	0.97

5. Conclusiones

Con la sustitución de los tirantes del puente Santa Rosa, la estructura fue equipada con tirantes de última tecnología, diseñados para cumplir con los estándares actuales de durabilidad, resistencia última y a la fatiga, así como con los requisitos de comportamiento estructural exigidos por las normativas vigentes, lo que contribuye a prolongar su vida útil. El procedimiento se ejecutó de manera controlada y segura, permitiendo mantener la operatividad del puente durante toda la intervención.

La solución adoptada para reemplazar los desviadores originales por conectores se ajustó de manera óptima a la geometría de la cabeza de pila. Este conjunto de elementos metálicos permitió diferenciar los tirantes del vano principal de los de retenida. Su conexión articulada mejoró el comportamiento estructural al eliminar esfuerzos transversales en la zona de conexión, además de facilitar las tareas de inspección, mantenimiento y futuras sustituciones.

Las inspecciones y el mantenimiento preventivo periódico en estructuras atirantadas son fundamentales para garantizar su seguridad y durabilidad a lo largo del tiempo. La detección temprana de posibles fallas en los tirantes y la evaluación constante de su estado permiten abordar problemas antes de que se conviertan en situaciones críticas. Estas acciones son esenciales para preservar la integridad estructural y prevenir fallos inesperados, asegurando así la funcionalidad y seguridad de la infraestructura a largo plazo.

En el caso del puente Santa Rosa, la pérdida de uno de sus tirantes no provocó un colapso total, lo que evidencia la importancia de un diseño estructural robusto y adecuado. La consideración de factores de seguridad y redundancia permitió que la estructura se mantuviera en pie y facilitó su rehabilitación. Este evento destaca la necesidad de contar con

diseños bien planificados y refuerza la importancia de las inspecciones periódicas para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente.

Agradecimientos

Agradecemos la dedicación y trabajo de todas las personas que hicieron posible la materialización de este proyecto, al ingeniero Josué Galvis Ramos, por su dedicación y compromiso tanto en la planeación como el seguimiento de las actividades en obra, al ingeniero Ángel Aparicio Bengoechea, por su revisión del diseño y sus recomendaciones a la hora de planificar las fases del proyecto, al ingeniero Raimon Rucabado por su aporte de experiencia en el dimensionamiento de los tirantes y conectores a medida, también a las empresas Mekano4 S.A. (España), MK4 Colombia S.A.S. (Colombia), por sus aportes en la estructuración, ejecución y seguimiento del proyecto y a la Agencia Boliviana de Carreteras ABC, y a la asociación UNTRES - López y Zambrana (Bolivia), por darnos la oportunidad de participar en la intervención de este imponente proyecto.

Referencias

- [1] Consultoría por producto para la elaboración del plan de mantenimiento o conservación del Puente Santa Rosa. Ing. Severo Victor Caspa c. Octubre 2012.
- [2] PTI Recommendations for Stay Cable Design, Testing and Installation (4ª edición, Febrero de 2001).
- [3] Cable Stays Recommendations of French Interministerial Commission on Prestressing (CIP, Edición de Noviembre de 2001 en francés, Junio 2002 en inglés).
- [4] FIB Recommendations for the Acceptance of Stay Cable Systems using Prestressing Steels (revisión final Noviembre de 2003).