

Sistema de tirantes VSL SSI2000 con Saddle en puentes de gran envergadura: Puente Héroes del Chaco, Asunción (Paraguay)

Stay cable system VSL Saddle SSI2000 on long-span bridges: Heroes del Chaco bridge, Asunción (Paraguay)

Javier Pascual ^a, Andrés Colmenares ^b, Miguel Ángel Calvo ^c y David Martínez ^d

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. VSL International. Ingeniero Centro Técnico España. javier.pascual@vsl.com

^b Ingeniero Civil. VSL Construction Systems S.A. Project Manager. andres.colmenares@vsl.com

^c Ingeniero Civil. VSL Construction Systems S.A. Director Producción Obra Civil. miguelangel.calvo@vsl.com

^d Ingeniero Civil. VSL Construction Systems S.A. Business Developer Manager. david.martinez@vsl.com

RESUMEN

El Puente Héroes del Chaco tiene una longitud total de 610 metros, compuesto por dos vanos de aproximación de 155 metros cada uno y un vano central de 300 metros. Los dos pilonos presentan una esbelta silueta que supera los 90 metros de altura, y el tablero de la estructura tiene un ancho de 32 metros. La estabilidad de la estructura se logra mediante un plano central con 23 tirantes continuos en cada pilono, sin necesidad de anclajes intermedios, utilizando el sistema Saddle VSL SSI2000. Este sistema incorpora la tecnología de «gota invertida», creando mayor fuerza de fricción en los cordones. El puente optimizará la movilidad en la región, y a su vez el crecimiento económico entre Asunción y la frontera con Argentina.

ABSTRACT

The Heroes del Chaco Bridge has a total length of 610 meters, consisting of two approach spans of 155 meters each and a central span of 300 meters. The two pylons have a slender silhouette that exceeds 90 meters in height, and the deck of the structure is 32 meters wide. The stability of the structure is achieved by a central plane of 23 continuous stays on each pylon, without the need for intermediate anchors, using the Saddle VSL SSI2000 system. This system incorporates «inverted drop» technology, creating greater frictional force on the strands. The bridge will optimize mobility in the region, while boosting economic growth between Asunción and the border with Argentina.

PALABRAS CLAVE: Puente, atirantado, saddle, Paraguay.

KEYWORDS: Bridge, cable-stayed, saddle, Paraguay.

1. Puente atirantado Héroes del Chaco, Asunción (Paraguay)

El puente Héroes del Chaco atraviesa el río Paraguay, conectando las ciudades de Asunción y Nueva Asunción (anteriormente conocida como Chaco'i). Su propósito es aliviar la congestión del puente Remanso, situado 8 km

río arriba, y destaca como el único puente de gran envergadura en la capital, además de ser el primero en enlazarla con la Región Occidental. El nuevo puente tiene capacidad para más de

10,000 vehículos por hora y representa una vía segura para peatones y ciclistas.

La estructura atirantada tiene una longitud total de 610 metros, compuesta por dos vanos de aproximación de 155 metros cada uno y un vano central de 300 metros. Los dos pilonos superan los 90 metros de altura y el tablero tiene un ancho de 32 metros con un único plano de tirantes central. El puente se sostiene mediante 23 tirantes continuos a través de cada pilono, sin necesidad de anclajes intermedios, con longitudes que varían entre 86 y 346 metros entre puntos de anclaje a lado y lado del pilono.

En puentes extradosados, la silleta o saddle es la solución más comúnmente utilizada en lugar de anclajes intermedios en el pilono. El tablero en estos puentes es, por naturaleza, más rígido que los de diseño clásico atirantado, ya que, el peso del tablero suele ser considerablemente mayor que la carga viva potencial que se genera a lo largo de su vida útil. Esto, implica que la variación de tensión esperada en los tirantes sea menor que en la solución de atirantado clásico. Sin embargo, en el caso del Puente Héroes del Chaco, de tipología

atirantada clásica, la relación entre las cargas vivas y muertas es más significativa.

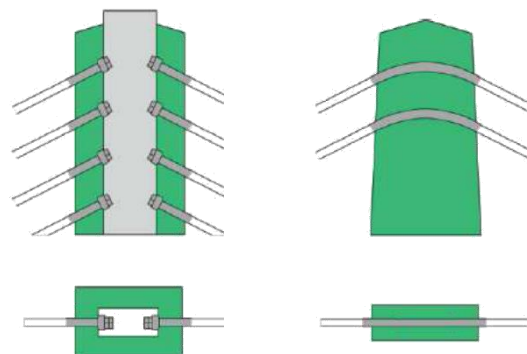


Figura 1. Anclaje en pilono (izquierda) y saddle (derecha).

La esbeltez de los pilonos presentó un desafío para las soluciones de anclaje convencionales, dadas las significativas limitaciones de espacio interior. Asimismo, el desequilibrio de fuerzas en ambos lados requería una solución que pudiera abordar ambas necesidades, sin comprometer el diseño arquitectónico y estético del conjunto

Figura 2. Vista aérea del puente atirantado durante construcción.



2. Descripción del sistema de tirantes VSL Saddle SSI2000

VSL dispone de sistemas de silleta o saddle, ampliamente empleados en puentes extradados, que cumplen con los requisitos técnicos de los anclajes de tirantes. Esta solución permite lograr geometrías esbeltas y eficientes.

Todos los componentes del sistema de saddle están sujetos a cargas de fatiga durante la vida útil del puente. Por lo tanto, debe demostrarse por medio de un ensayo en el laboratorio, de acuerdo con la Fédération Internationale du Béton (fib, por sus siglas en francés) [1].

2.1 Componentes del Saddle SSI 2000

El saddle SSI 2000 está compuesto por una caja rectangular de acero rellena de una matriz de material inyectado (mortero de ultra alta resistencia), en cuyo interior se practican orificios con una geometría específica de «gota invertida» (patentada), diseñada para proporcionar una alta fricción entre el cable y el saddle.

El sistema presenta tres barreras de protección contra la corrosión: el revestimiento propio de los cordones (galvanizados, encerados y pelados dentro del saddle), un relleno flexible inyectado alrededor de los cordones (el mismo material empleado en los anclajes SSI 2000e), y finalmente la matriz de mortero de soporte.



Figura 3. Esquema caja del saddle embebida en hormigón.

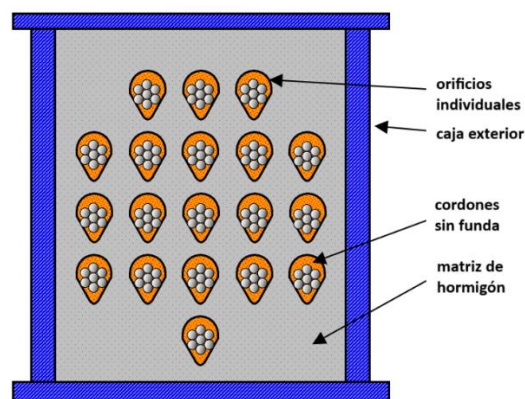


Figura 4. Sección del saddle.

2.2 Cordones paralelos individuales

El saddle dispone de orificios independientes para cada cordón. Las ventajas de este sistema son:

- El cordón está en contacto con el cuerpo del mortero y no hay contacto de acero con acero entre cordones, eliminando el riesgo de fretting-fatigue.
- Permite el mantenimiento y/o la sustitución del elemento de tracción de forma independiente.

El orificio patentado en forma de «gota de agua invertida» logra una alta fricción entre el cordón y el saddle, evitando al mismo tiempo problemas de fretting fatigue y permitiendo una fácil instalación del cordón.

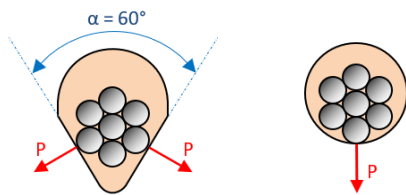


Figura 5. Perfil patentado VSL (izquierda) y perfil clásico (derecha).

2.3 Conjunto de transición del saddle

El conjunto de transición del saddle, que incluye varios elementos, cumple múltiples funciones:

- La transición del cable enfundado al no enfundado.
- El sellado hermético para evitar que el agua acceda al cordón no enfundado.
- La desviación de los cordones debida a tolerancias de construcción, fuerzas transversales y movimientos dinámicos del cable.

2.4 Resistencia axial y transversal

El saddle VSL está diseñado para soportar la fuerza de desviación inducida por la carga de rotura del cable del tirante, sin fallo alguno o sin que se produzca una deformación plástica que impida el desmontaje del conjunto de transición del saddle o del cordón.

El conjunto de transición del saddle está diseñado para transferir al pilono la carga transversal de 95% GUTS del tirante y desviación máxima de 100mrad en ELU (Estado Límite Último) y una tensión de 50% GUTS combinado con una desviación máxima de 50mrad en ELS (Estado Límite Servicio)

Bajo las fuerzas de desviación dadas, se aplican los siguientes criterios:

- No se produce ninguna deformación permanente en ninguna de las piezas del saddle.
- No se producen daños en el revestimiento del cordón.
- El saddle permanece estanco a la entrada de agua.

2.5 Fatiga

La resistencia a fatiga (largo plazo) del tirante bajo tensión cíclica de tracción, combinada con la tensión de flexión (que puede ser introducida por la tolerancia de instalación), la deflexión del tablero del puente y el cambio de la flecha del tirante cerca del anclaje se evalúan mediante ensayos según el fib Bulletin 89 y SETRA. 2002 [2].

- Amplitud de variación de tensión de 200 MPa con una tensión máxima del 45% del cable del tirante GUTS
- Amplitud de desviación de ± 5 mrad con una desviación máxima de 10 mrad
- 2 millones de ciclos de carga sincronizados

Los 2 millones de ciclos de carga corresponden al punto característico de las curvas de resistencia a la fatiga de los componentes de tracción de acuerdo con la norma EN-1993-1-11 [3] y otras directrices aplicables como el PTI [4].

Además, el rendimiento del sistema saddle ha sido validado para su aplicación en puentes extradados mediante ensayos de acuerdo con los siguientes parámetros:

- Amplitud de variación de tensión de 140 MPa con una tensión máxima del 60% de GUTS
- 2 millones de ciclos de carga

Los fenómenos que inducen al fretting fatigue en los cordones se producen en condiciones de desviación significativa de los

cordones (lo que induce una elevada presión de contacto), sometidos a un movimiento dinámico con alta fricción (condiciones secas).

El saddle SSI 2000 ha sido sometido a pruebas de fatiga, demostrando que no se produce fatiga por rozamiento.

2.6 Descompensación de cargas y fuerza de fricción

Debe evitarse el deslizamiento del cordón sobre el soporte debido a la diferencia de fuerzas entre los dos lados del pilono. El diferencial de fuerzas puede surgir durante la construcción (carga en voladizo desequilibrada) o también en servicio (carga viva).

La fricción es la forma más adecuada de transferir fuerzas diferenciales, cuyo valor máximo puede expresarse de la siguiente manera:

$$\frac{\Delta T}{T} = e^{\mu_{\text{eff}}\theta} - 1$$

Ambas tensiones (ΔT y T), el ángulo de apertura del saddle (θ) y el coeficiente de fricción efectivo (μ_{eff}) se representan en la figura siguiente:

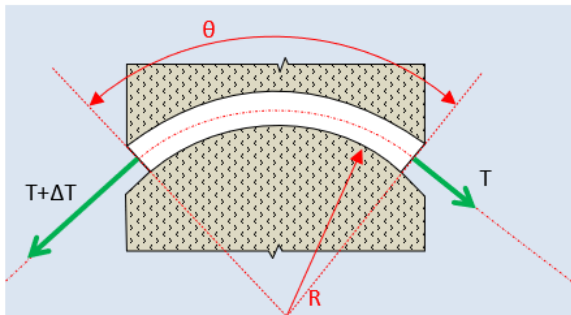


Figura 6. Fuerza diferencial transferida por el saddle.

El saddle está diseñado para soportar la fuerza diferencial por fricción. El coeficiente de fricción que se produce en la interfaz entre el cordón y el cuerpo del saddle son diferentes durante construcción y servicio:

- Durante el periodo de construcción, la carga desequilibrada puede ser importante. Por lo tanto, se requiere un

coeficiente de fricción relativamente más elevado. Las pruebas que reflejan las prestaciones de fricción durante la fase de construcción del puente se realizan en un saddle sin inyección de relleno. Además, la prueba se realiza para diferentes cargas iniciales, con el objetivo de reflejar los cambios de tensión que se producen durante la vida de construcción del puente.

- El ensayo se realiza para una carga inicial del 50% de GUTS que corresponde a la tensión máxima de servicio que potencialmente se puede producir en el cable del tirante.

Tabla 1. Coeficientes fricción Saddle.

Situación	Valor	Valor diseño (coeficiente de seguridad: 1.5)
Construcción	69.5%	46.3%
Servicio	53.7%	35.8%

3. Instalación de los tirantes a través del Saddle SSI2000

3.1 Preparación de los cordones

Generalmente, el proceso de pelado del cordón se ejecuta simultáneamente durante el enfilado. Sin embargo, en términos de rendimiento, resultó ser un proceso inviable debido a las características y los ciclos constructivos del proyecto.

Se decidió prefabricar los cordones previamente a su instalación. Esta tarea incluía: la creación del button head, el marcado de la zona de pelado correspondiente a los anclajes de tablero, así como el marcado de la zona de pelado correspondiente al tramo central del saddle. Este proceso se repitió con independencia de la longitud del tirante pues acabó siendo realmente eficiente.

Para ello se construyó una pista de preparación, en una zona habilitada próxima al puente, con el fin de independizar esta actividad al resto, y así conseguir optimizar los tiempos de enfilado de los tirantes.

Como parte fundamental para llevar a cabo esta actividad, se requirió del espacio suficiente para la construcción de la pista. En este sentido, se debe tener la longitud suficiente para realizar la medida de los cordones correspondientes al tirante de mayor longitud del proyecto, en este caso, una longitud libre de 345 metros. En cada uno de los extremos, además, se posiciona:

- Extremo 1: devanadora + bobina que contiene el cordón a preparar.
- Extremo 2: devanadora con motor incorporado + carrete vacío de bobina, donde se enrolla el cordón preparado.



Figura 7. Pista de preparación de los cordones.



Figura 8. Extremo 1 de pista de preparación.



Figura 9. Extremo 2 de pista de preparación

3.2 Enfilado de los cordones y tesado

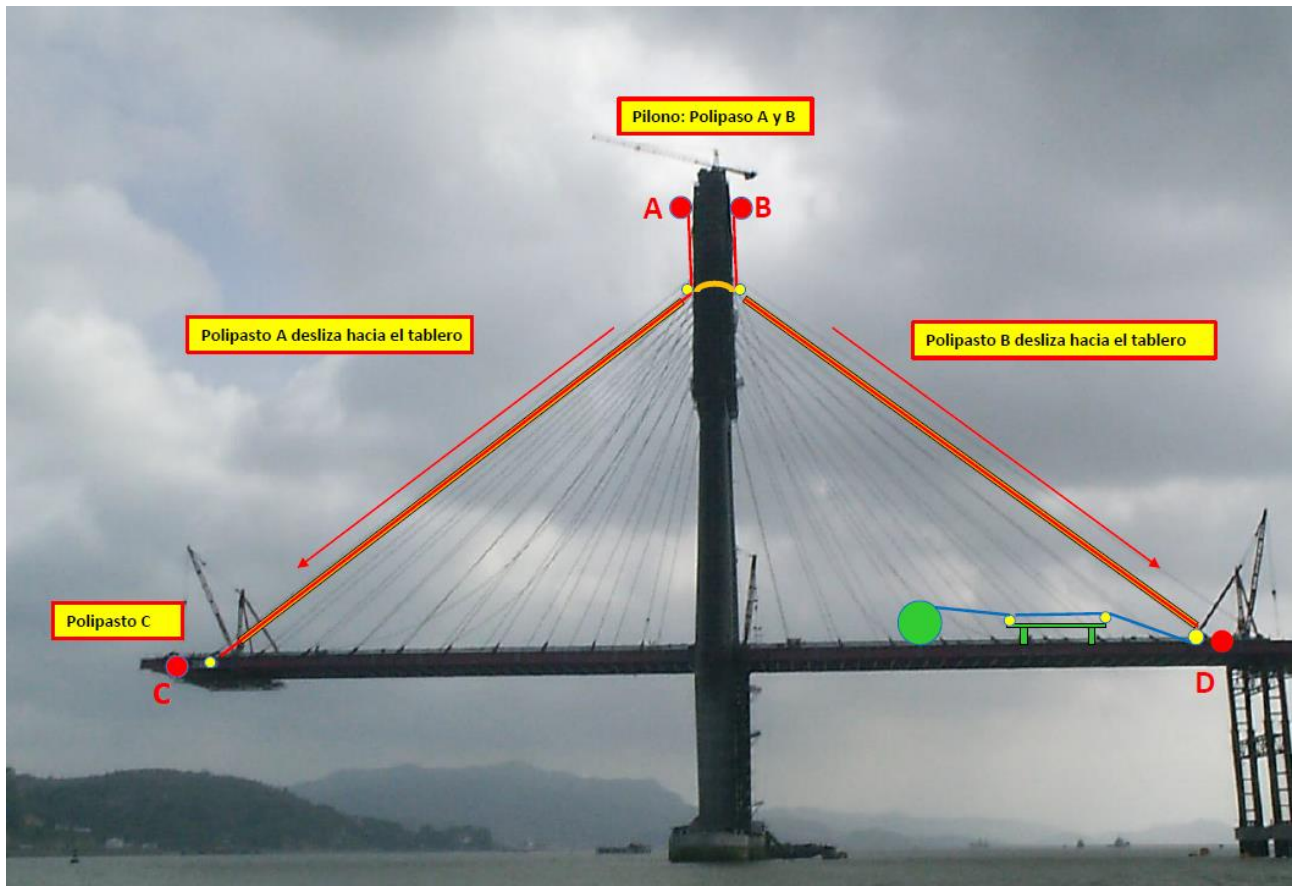
El izado de los cordones se realizó siguiendo la siguiente secuencia (ver Figura 10):

- Extremo D del tablero: ubicación de la bobina y sistema de agarre (button head), precortado y pelado.
- Parte superior del pilono en el lado B: ubicación de polipasto B (con potencia de 12 CV) encargado de subir el cordón a enfilarse desde el extremo D del tablero.
- Parte superior del pilono en el lado A: ubicación de polipasto A (con potencia de 7 CV) encargado de subir el cable No.3 ubicado en el extremo C del tablero.

- Extremo C del tablero: ubicación de polipasto C (con una potencia de 12 CV), encargado de continuar el enfilado del cordón.
- Parte inferior del tablero del extremo C y D (zonas de anclaje): tesado simultáneo del cordón con el fin de mantener la posición del cordón pelado dentro del saddle.

El proceso de instalación (primer tesado a aplicar) se hace por fuerza objetivo. Cada cordón se tesa a una fuerza diferente previamente calculada, a partir de las deformaciones de la estructura y la carga objetivo.

Figura 10. Secuencia de instalación cordones.



Con el fin de lograr la carga de instalación objetivo, la secuencia de fuerzas de tesado de cada uno de los cordones es inferior al previamente instalado, es decir, la carga del cordón $i+1$ va disminuyendo gradualmente. Esto permite que los cordones lleguen con cargas muy similares, tras una fase de igualación intermedia, al finalizar el proceso de instalación. Por tanto, una vez queda garantizada la igualación de carga entre cordones, en etapas de retesados posteriores, todos los cordones se puedan tesar en escalones de carga por elongaciones idénticas.

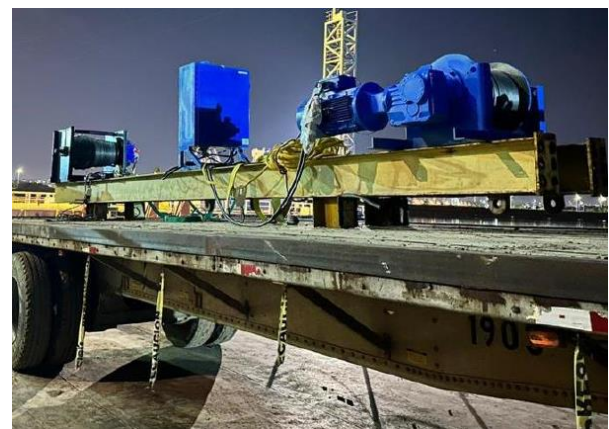


Figura 11. Polipastos a posicionar en parte superior del pylon (extremos A y B)

3.3 Retesado

En la operación de retesado, la introducción del escalón de carga se controla por deformaciones. Se determinan alargamientos iguales para todos los cordones (iso-elongación). Éstos se calculan en base al escalón de carga y desplazamientos esperados por el diseñador en los puntos de anclaje.

De esta forma se garantiza la tolerancia aceptada por la fib de $\pm 2.5\%$ entre cordones y $\pm 5\%$ en el tirante con respecto la fuerza final objetivo.



Figura 12. Escalones de carga controlados con alargamientos.

3.4 Actividades finales y cierre del sistema

Una vez se finalizan los ajustes de cargas en los tirantes, se procede a realizar las actividades finales, que incluyen:

- Descenso de tubos anti-vandálicos
- Cierre de tubos telescópicos en el pilono
- Instalación de capots
- Inyección de anclajes y saddles
- Instalación de desviadores

La inyección de los anclajes y saddles garantizará la protección frente a la corrosión en las zonas donde se retiró la funda individual de PEAD del cordón.

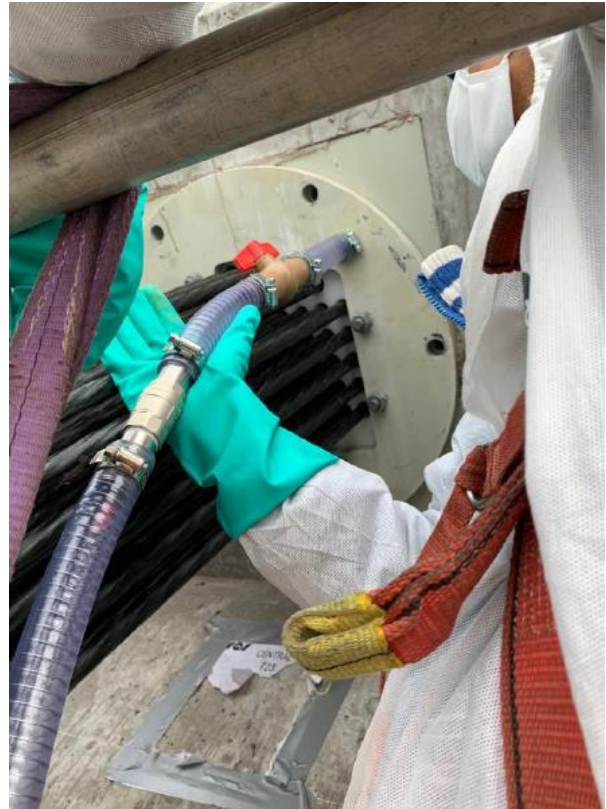


Figura 13. Inyección de saddle



Figura 14. Inyección de anclaje.



Figura 15. Instalación de desviador.

4 Conclusiones

El saddle SSI 2000 instalado en el Puente Héroes del Chaco ha resultado ser una alternativa exitosa frente a los anclajes clásicos ubicados dentro del pilono. Dicha solución permitió garantizar la estabilidad de los tirantes frente al desequilibrio de fuerzas que se presentaron a ambos lados del pilono. La implementación de la geometría de «gota invertida» garantizando una alta fricción de forma continua en los cordones, eliminando cualquier posible fenómeno de fretting fatigue.

La preparación de los cordones, a pesar de las longitudes que llegaban hasta los 345 metros resultó ser muy eficiente frente al pelado

y corte directo clásico en puentes de esta envergadura.

Agradecimientos

VSL Construction Systems S.A. y VSL International quieren agradecer a todas las personas, empresas y entidades públicas que han contribuido a la finalización de este gran hito de la ingeniería. En especial a los ingenieros Izan Gomes de Lacerda y Fernando Antona. Asimismo, a las empresas CDD y Heisecke conformando el Consorcio Unión y a Construgomes, por su valiosa experiencia, clave en cada etapa de este proyecto.

Referencias

- [1] Fédération Internationale du Béton (fib), Recommendations for the Acceptance of Stay Cable Systems, Bulletin 89, 2005.
- [2] Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA), French Interministerial Commission on Prestressing Cable Stays, 2002
- [3] European Standard, Eurocode 3: Design of steel structures , Part 1-11 (EN-1993-1-11).
- [4] Post-Tensioning Institute (PTI), Recommendations for Stay Cable Design, Testing and Installation, PTI DC45.1-18, 2018