

Viaducto Hernani-Astigarraga: el primer y único puente atirantado en la red ferroviaria de Alta Velocidad de España

Hernani-Astigarraga Viaduct: the first and only cable-stayed bridge in Spain's high-speed railway network.

Javier Pascual ^{*}, Marta Artal ^a, Miguel Ángel Calvo ^b y David Martínez ^c

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

^a Ingeniera Civil. VSL Construction Systems S.A. Project Manager. marta.artal@vsl.com

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

^c Ingeniero Civil. VSL Construction Systems S.A. Director Obra Civil y Reparaciones. david.martinez@vsl.com

RESUMEN

El viaducto atirantado Hernani-Astigarraga, con 482 metros de longitud, cruza el río Urumea y forma parte de la “Y-Vasca”, siendo el primer puente atirantado en la red ferroviaria de Alta Velocidad de España. Su estructura incluye tres pilonos metálicos de 30 metros de altura y un tablero de hormigón postesado con 108 tirantes de entre 10 y 60 metros. Los tirantes instalados pertenecen al sistema articulado MSI 2000. Este diseño no solo permite un montaje rápido, sino que también asegura un rendimiento a fatiga probado. Además, se implementó un monitoreo de las fuerzas en los tirantes mediante el equipo Vibratest de VSL en las diferentes etapas durante su construcción.

ABSTRACT

The Hernani-Astigarraga cable-stayed viaduct, measuring 482 meters in length, crosses the Urumea River and is part of the "Y-Basque," being the first cable-stayed bridge in Spain's High-Speed Rail network. The structure includes three metal pylons standing 30 meters tall and a post-tensioned concrete deck with 108 stays ranging from 10 to 60 meters. The installed stays belong to the articulated MSI 2000 system. This design not only allows for quick assembly but also ensures proven fatigue performance. Additionally, a monitoring system for the forces in the stays was implemented using VSL's Vibratest equipment at various stages during its construction.

PALABRAS CLAVE: Puente, atirantado, ferrocarril, AVE, VSL, vibratest, Hernani, Astigarraga.

KEYWORDS: Bridge, cable-stayed, railway, high-speed, VSL, vibratest, Hernani, Astigarraga.

1. Viaducto atirantado Hernani-Astigarraga

El viaducto Hernani-Astigarraga se ha convertido en el primer y único puente atirantado en la red ferroviaria de Alta Velocidad

de España, marcando un hito. El viaducto completo tiene una longitud total de 2.8 km, formado por una estructura continua de tres

tipologías diferentes: el viaducto de aproximación, el viaducto central atirantado y el viaducto de prolongación. La estructura propiamente atirantada de «tres puentes en uno» presenta un singular trazado en planta de curva en “S”. VSL se encargó de todos los trabajos de postesado, así como la instalación de los tirantes, a lo largo de todo el viaducto atirantado.

La estructura atirantada tiene 482 metros de longitud total (con vanos de 30m a 120m), compuesta por 3 pilonos metálicos de 30 m de altura y un tablero de 14.5m de ancho, con sección tipo U de hormigón postesado. El puente está sostenido por 108 tirantes (36 por pilono), con longitudes que oscilan entre los 10 y los 60 metros. La tecnología atirantada empleada es la denominada VSL MSI 2000, cuya potencia de anclaje instalada es de 31 y 37 cordones. Esta solución garantiza una instalación eficaz (montaje rápido de los tirantes gracias a la prefabricación *in situ*), así como un rendimiento a fatiga probado. Además, el puente ofrece una estética singular y atractiva. Por último, cabe destacar la medición de fuerzas de los tirantes, mediante el equipo Vibratest de VSL, llevada a cabo en las diferentes etapas de la obra, para un óptimo control y monitoreo de la estructura atirantada.



Figura 1. Vista aérea del viaducto atirantado.

2. Descripción del sistema de tirantes VSL MSI 2000

El sistema de tirantes VSL MSI 2000 está específicamente desarrollado para estructuras que necesitan una conexión articulada en sus extremos. Esto puede incluir cubiertas suspendidas, puentes arco o cualquier otra estructura que requiera de atirantamiento.

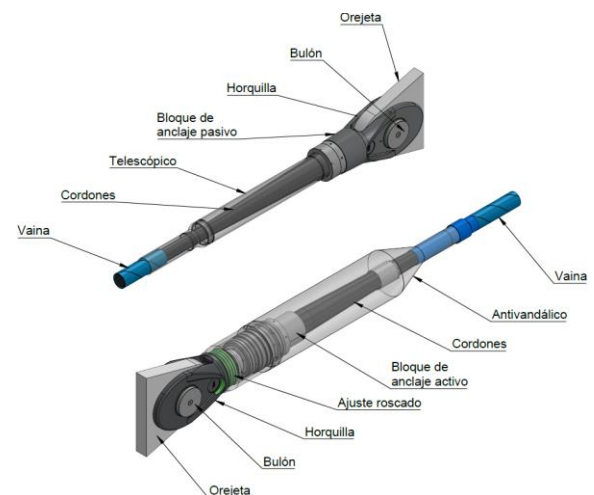


Figura 2. Componentes del sistema MSI 20000

Esta tecnología propia utiliza el principio patentado por VSL. Un sistema basado en cordones de 7 alambres (galvanizados, encerados y enfundados en vaina individual de PEAD), juntamente con cuñas incorporadas sobre un bloque de anclaje. Este sistema queda vinculado a la estructura a través de un conjunto de horquilla/orejeta para proporcionar máxima flexibilidad en su instalación y servicio.

En la parte inferior de tablero se encuentra el extremo activo, cuyo conjunto está roscado. Por encima, un tubo antivandálico que protege al tirante desde la horquilla inferior hasta una cota superior, típicamente de 2.5-3 m con respecto al tablero. Más arriba, se encuentra la vaina de PEAD con un ribeteado en doble hélice para minimizar las vibraciones inducidas por la interacción del viento y la lluvia. En la parte superior de cada tirante se encuentra el tubo telescópico, materializando el solape con la vaina global y permitiendo dilataciones y contracciones térmicas de los elementos plásticos durante la vida útil de la estructura. Por último, sobre el pilono, el sistema queda anclado por otro conjunto horquilla-orejeta donde, en su interior, queda instalado el anclaje pasivo.

2.1 Sistema probado de acuerdo con las recomendaciones internacionales

El sistema está ensayado y calificado en base a los criterios marcados por las recomendaciones internacionales, la Fédération Internationale du Béton (fib, por sus siglas en francés) [1] y el Post-Tensioning Institute (PTI, por sus siglas en inglés) [2]. Éstas engloban ensayos de fatiga y tracción, así como de estanqueidad del sistema, siguiendo los requisitos de durabilidad y rendimiento para su aplicación en tipologías de puentes atirantados de carretera y ferrocarril.

2.2 Ensayo de fatiga y tracción

El sistema se ha ensayado en repetidas ocasiones siguiendo los siguientes parámetros:

- Máxima tensión: $\sigma_{\max} = 45\%$ GUTS
- Variación de tensión: $\Delta\sigma = 200$ MPa
- Desviación angular: $\Delta\alpha = 0 - 10$ mrad
- Ciclos variación de tensión: 2.000.000

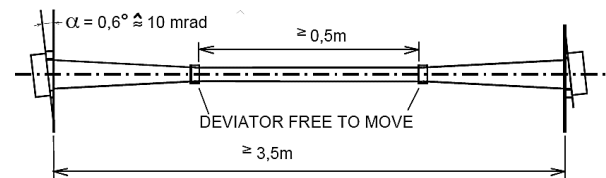


Figura 3. Representación esquemática del ensayo.

2.3 Ensayo de estanqueidad

Las características de los ensayos realizados son las siguientes:

Fase 1

- 10 ciclos de carga con amplitudes de tensión:
 - Tensión mínima: 20% GUTS
 - Tensión máxima: 50% GUTS

Fase 2

- Tensión estática: 30% GUTS
- Amplitudes ciclo temperatura:
 - Variación $\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$
- Número de ciclos de temperatura: 8
- Periodos ciclos de temperatura: ≥ 48 hrs
- Desviación del tirante:
 - 4 x 250 ciclos ± 25 mrad amplitud
 - 2 x mínima temperatura $T_{\min}$
 - 2 x máxima temperatura $T_{\max}$
- Presión agua: correspondiente a una altura de columna de agua de 3 m.

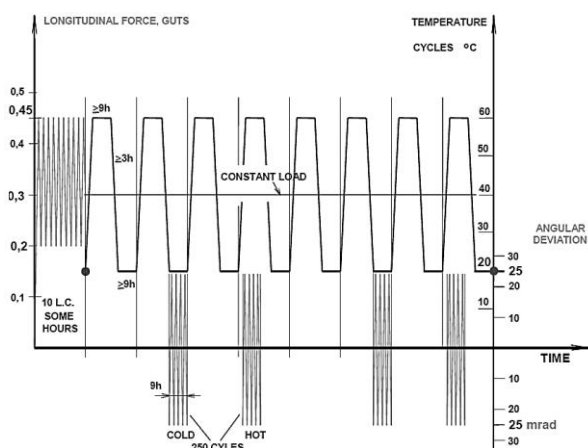


Figura 4. Ciclos de carga y temperatura del ensayo.

2.4 Ventajas del sistema MSI 2000

El uso de un terminal tipo horquilla proporciona una solución estéticamente atractiva para puentes y estructuras articuladas suspendidas de gran luz, gracias a su compacto tamaño y la fácil conexión a la estructura principal por medio de orejetas de acero.

Las principales ventajas que destacar de este sistema son:

- Sistema articulado permitiendo la tolerancia de instalación en la dirección principal del tirante.
- Adaptación a las tolerancias de construcción de ± 20 mrad en la dirección transversal a la orejeta.
- Rendimiento a fatiga ensayado y probado según fib y PTL.
- Posibilidad de prefabricar tirantes *in situ* permitiendo reducir notablemente los tiempos de instalación.
- Protección contra la corrosión individual para cada cordón que previenen la migración de daños y el fallo del tirante.
- Fácil ajuste de la fuerza del tirante durante la instalación y en cualquier momento requerido durante servicio.
- Mantenimiento muy bajo al utilizar los principios probados del sistema VSL SSI 2000, ampliamente utilizado en puentes atirantados.

- Tirantes esbeltos que cumplen con las expectativas de los arquitectos.

3. Instalación del sistema de tirantes VSL MSI 2000

La particularidad del sistema VSL MSI 2000 frente al bien conocido sistema clásico de instalación de tirantes «cordón a cordón», fue la necesidad de prefabricar todos los tirantes antes de proceder al izado, instalación y tesado. Por ello, todas las actividades que conllevaba el ensamblaje de tirantes se realizaron con anterioridad. Éstas incluían: precorte y pelado de cordones, soldadura de vaina, enfilado de cordones a través del tubo antivandálico, vaina de PEAD y telescópico, preclavado de cuñas, y, por último, la inyección de anclajes y capots.

3.1 Prefabricación

La etapa de prefabricación del tirante VSL MSI 2000 englobaba múltiples subactividades que debían ser planificadas previamente. El área de trabajo requerido debía permitir el desarrollo de dichos procesos, así como el acopio de los tirantes una vez estén conformados.

3.1.1. Instalación elementos exteriores

En esta primera etapa se debían disponer todos los elementos que encapsulaban al tirante. Entre ellos se encontraban: tubo antivandálico, vaina de PEAD y tubo telescópico. Era importante que todos los componentes estuvieran debidamente soportados por elementos auxiliares (carrito o similar) y evitar ser dañados durante su manipulación y/o acopio.

3.1.2. Precorte y enfilado de cordones

El tesado no se realizó de forma individual «cordón a cordón», sino todo el tirante a la vez por medio de barras y gatos. Por ello, la precisión en la longitud de los cordones era de vital importancia para garantizar la desviación aceptada por la fib. Los cordones se enfilaron de

forma conjunta a través de todo el sistema de encapsulación exterior.

3.1.3. Instalación de anclajes y clavado de cuñas

Se colocaron anclajes en ambos extremos del tirante (lado activo y pasivo). Posteriormente se instalaron las cuñas en cada uno de los orificios individuales. Dado que el tesado no se realizó directamente sobre los cordones, se debía aplicar una precarga sobre las cuñas (power-seating) para garantizar una correcta mordida y evitar posibles desclaves durante la fase de instalación o, a lo largo de la vida útil de la estructura.

3.1.4. Inyección de anclajes y cierre con capots

Puesto que el extremo de los cordones estaba pelado para garantizar la correcta mordida de la cuña, se debía restaurar la protección sobre los mismos para evitar problemas de corrosión futura. Por ello, se formalizó la inyección que protegía todo aquello que cubre el interior del capot.

3.1.5. Roscado del conjunto con la borquilla

Por último, se llevó a cabo el roscado del conjunto orejeta-anclaje que permitía cerrar totalmente el tirante y dejarlo predispuesto para la consecuente operación de izado.

3.2 Izado e instalación

Se comenzó izando el tirante por el extremo pasivo que iba instalado en la orejeta superior del pilono. A medida que el tirante levantaba del suelo durante la operación de izado, se debían ir retirando los carritos de soporte que estaban previamente distribuidos en su longitud sobre el tablero. Una vez en posición, se bloqueó con un pin de seguridad que cruza ambos elementos.

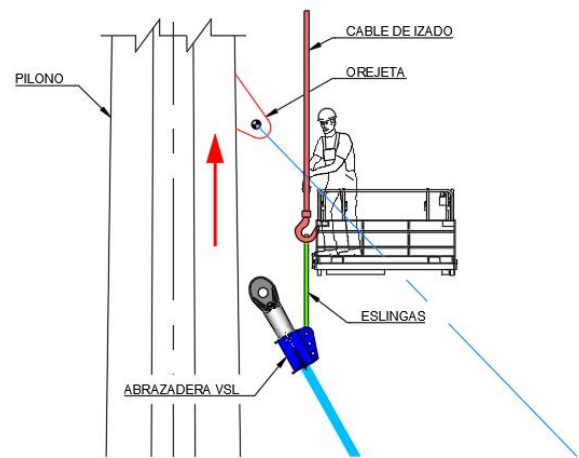


Figura 5. Izado del anclaje pasivo al pilono.

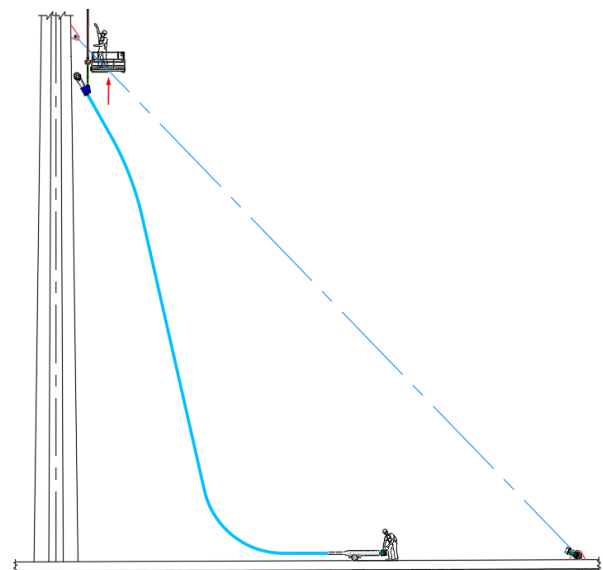


Figura 6. Catenaria descrita por el tirante durante la operación de izado.

El extremo activo, ubicado en el tablero, se aproximaría por medios de polipastos para alinear la horquilla a la catenaria que presentaba cada uno de los tirantes. De igual modo, se aseguró el conjunto por medio de un pin de bloqueo.

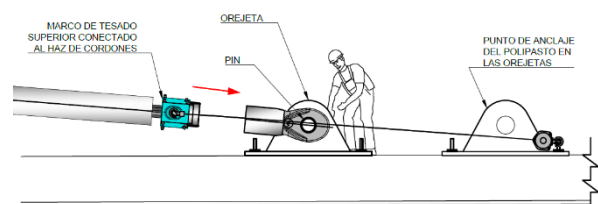


Figura 7. Aproximación del anclaje activo a la horquilla del tablero.

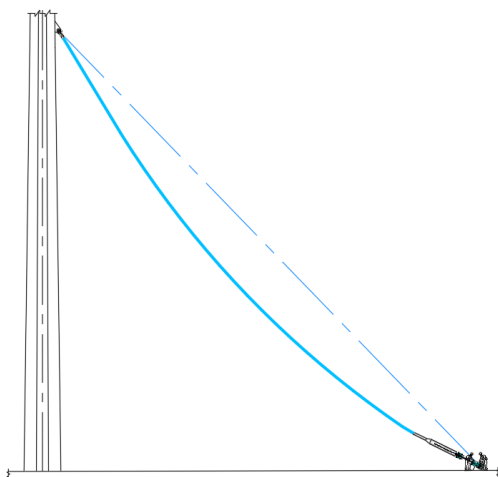


Figura 8. Tirante instalado antes de realizar el tesado.

Una vez se habían fijado ambos extremos articulados a las orejetas de pilono y tablero, se formalizó el ensamblaje del equipo de tesado sobre el tirante en su extremo activo (tablero).

3.3 Tesado

Los tirantes se tesaron en parejas enfrentadas, comenzando por la orientación norte: tirantes dirección Hernani (PK-) y tirantes dirección Astigarraga (PK+). Posteriormente, sus paralelos orientación sur.

La fuerza objetivo de tesado se logró por medio de varios escalones de carga, iguales entre ellos, y alternándolos a lado y lado del pilono. El propósito era minimizar el desequilibrio de fuerza en la estructura durante esta operación.

La operación de tesado se llevó a cabo por medio de un conjunto de barras y gatos. Estas permitían tesar la totalidad del tirante de una vez, a diferencia del procedimiento clásico «cordón a cordón». El equipo de tesado estaba compuesto por:

- Marco de tesado inferior: permitía el encaje del sistema en la horquilla activa para hacer reacción durante la operación. Además, un gato comprimía el sistema garantizando la estabilidad.

- Marco de tesado superior: Apoyaba en el bloque de anclaje activo, sirviendo de apoyo para los 4 gatos de tesado y permitiendo el paso de los cordones en su interior.
- Barras y gatos: eran los elementos principales de tesado, permitiendo una aplicación de carga escalonada ajustándose a las necesidades operacionales de tesado planteadas por el diseñador.

Además, el conjunto del sistema MSI estaba dotado de un conector ajustable roscado, capaz de empujar el anclaje y, a su vez, permitiendo ser roscado en el interior del socket. De esta forma, una vez terminada la operación de tesado, el conjunto quedaba totalmente bloqueado.

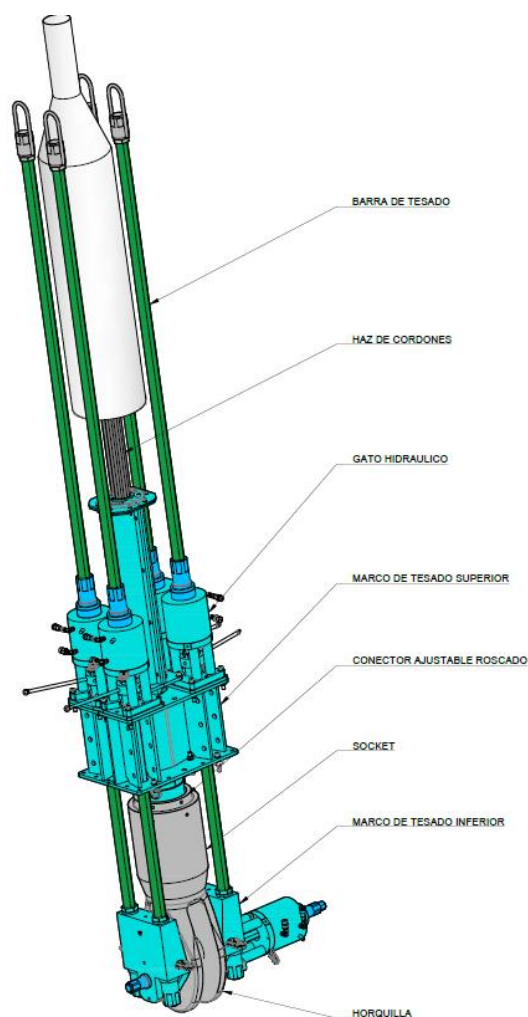


Figura 9. Ensamblaje equipo de barras y gatos sobre el tirante (lado activo).



Figura 10. Vista del equipo instalado en un tirante.

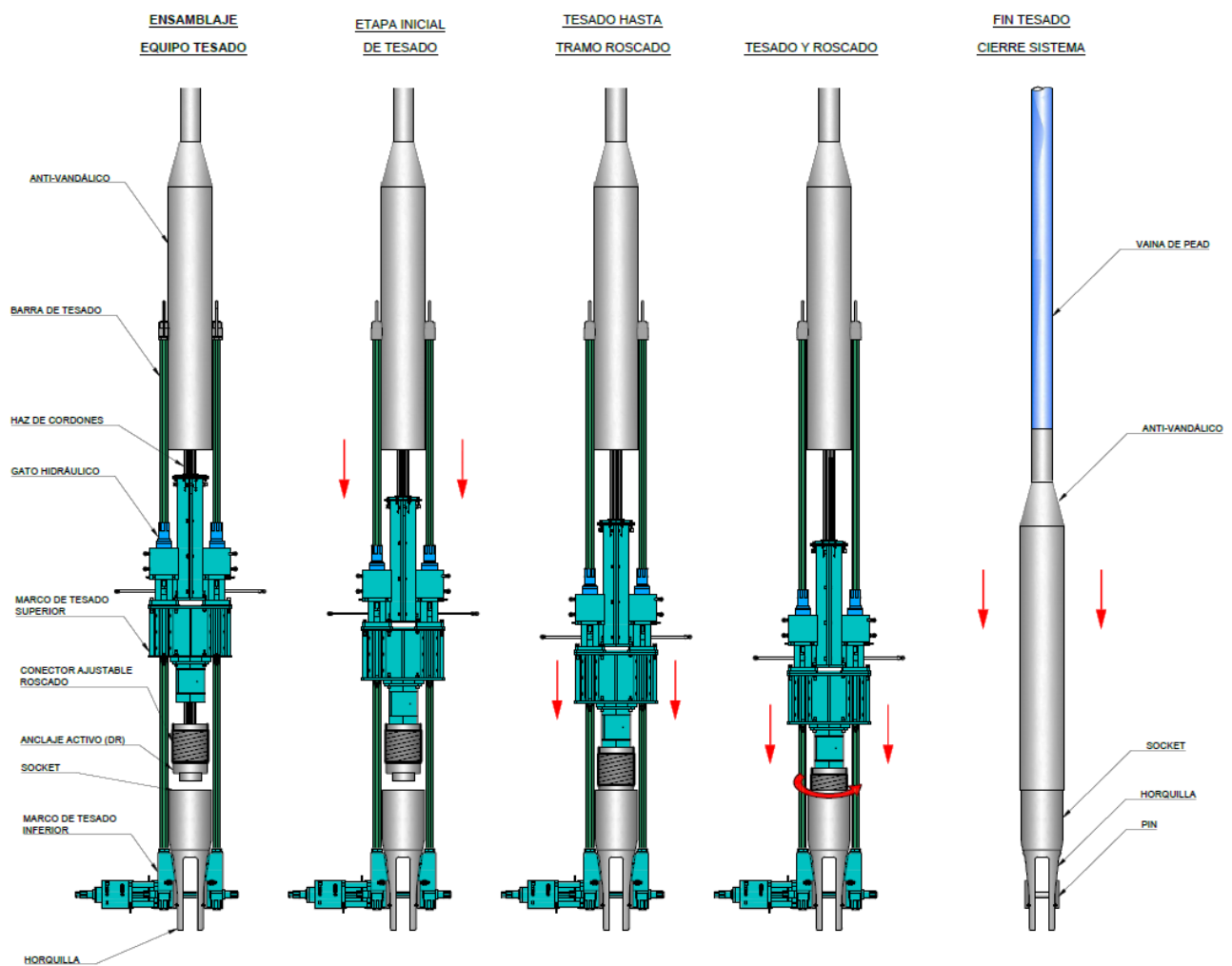


Figura 11. Secuencia de tesado mediante barras y gatos

La secuencia de tesado se ejecutó en 5 breves pasos:

- Ensamblaje del equipo: posicionamiento del equipo de tesado y conjunto de barras y gatos.
- Etapa inicial de tesado: aplicación de la carga.
- Etapa de tesado hasta tramo roscado: empuje del anclaje mediante escalones de carga definidos para aproximar las dos roscas.
- Etapa de tesado y roscado: mantener la presión de carga y roscar el conector ajustable dentro del socket hasta bloquear el anclaje en la posición alcanzada. Repetir esta etapa tantas veces sea necesaria.
- Fin de tesado y cierre del sistema: desmantelamiento de todo el equipo de tesado y descenso del tubo antivandálico hasta cubrir por completo el lado activo.

4. Medición de fuerzas mediante el equipo Vibratest VSL

El procedimiento estándar de pesaje de cordones, mediante gato mono-cordón o multi-cordón, era imposible llevarlo a cabo dado que los tirantes ya están totalmente preensamblados e inyectados, sin posibilidad de acceder a los cordones individuales. Por ello, la medición de fuerzas en los tirantes se debería realizar por medio un conjunto de barras y gatos acoplados al tirante, de forma idéntica a como se realiza el tesado descrito en la sección 3.3.

VSL incorporó un equipo de medición indirecta de fuerzas Vibratest como elemento principal de monitorización de fuerza en los tirantes, en las diferentes etapas durante su construcción.

Este equipo ha sido empleado de forma satisfactoria en multitud de proyectos de gran envergadura durante los últimos 10 años, p.ej: Queensferry Crossing (Reino Unido), Mersey Gateway Bridge (Reino Unido), Anjikhad Bridge (India) o Nipigon River Bridge (Canadá), entre otros.

4.1 Descripción del equipo Vibratest

El Vibratest de VSL consta de componentes de hardware y software diseñados a medida que incluyen acelerómetros, un sistema de adquisición de datos de muestreo de alta frecuencia y un robusto ordenador con una interfaz gráfica de usuario.

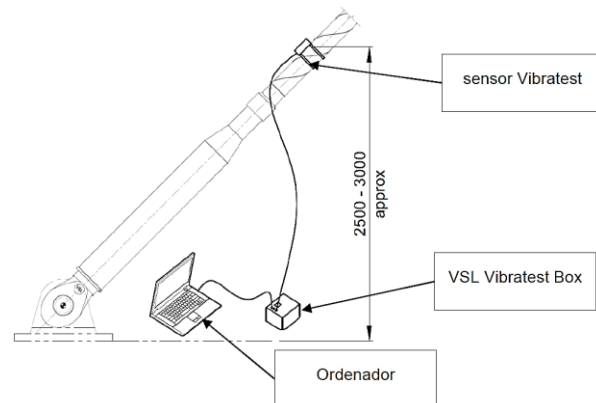


Figura 12. Configuración típica de medición.

El sistema permite realizar procesamiento y análisis de datos automáticos bajo demanda. Los sensores están alojados en una carcasa robusta y totalmente encapsulada, unida al tirante a cierta distancia del anclaje. Todas las demás piezas electrónicas están integradas en un maletín resistente para transporte, que incluye las baterías para un despliegue completamente flexible durante las campañas de medición.

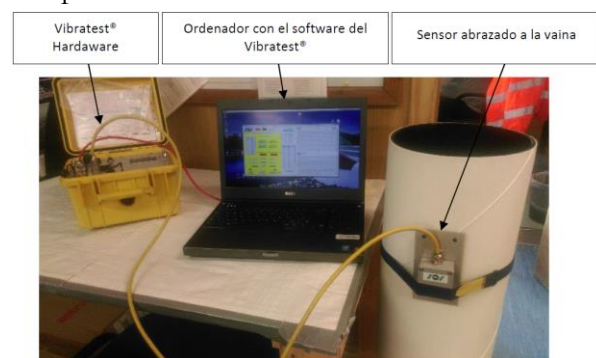


Figura 13. Equipo de medición Vibratest.

4.2 Generalidades técnicas para la medición de la tensión

La necesidad del alto número de verificaciones, requeridas para la monitorización y seguimiento, precisaba de una herramienta mucho más ágil y

dinámica que permitiera reducir de forma notoria el tiempo empleado en dicha actividad.

El número de mediciones parciales durante construcción fue de 53, mientras que en la verificación final se realizó a los 108 tirantes. Por tanto, se efectuaron más de 160 mediciones de fuerza por medio del equipo Vibratest en la totalidad del proyecto.

4.3 Medición y proceso de cálculo

La tensión del tirante deriva del espectro de vibración del tirante en condiciones ambientales de excitación:

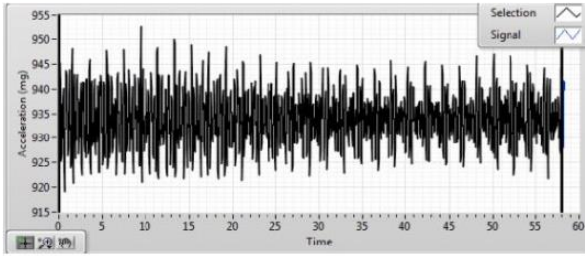


Figura 14. Aceleración del tirante bajo condiciones ambientales.

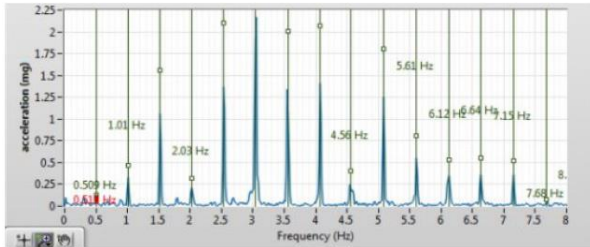


Figura 15. Potencia de la densidad espectral de la aceleración del tirante para análisis espectrales.

El comportamiento dinámico del tirante depende de sus parámetros mecánicos, como la rigidez a flexión, la longitud libre, la masa distribuida, la fuerza y la flecha del tirante. Por lo tanto, sus frecuencias naturales dependen también de sus características y, en particular, de su fuerza. Esta dependencia se formula tal que:

$$f_n = f_0 \left(\frac{1}{\pi} \sqrt{\varepsilon^2 k_n^4 + k_n^2} \right) \quad (1)$$

Con las longitudes de onda modales kn se definen las soluciones de la ecuación característica modal:

$$\Psi(k_n, \varepsilon^2, \lambda^2) = 0 \quad (2)$$

Dónde:

- $f_0 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{m}}$ frecuencia fundamental de la cuerda
- λ^2 parámetro que modela el efecto de la catenaria
- $\varepsilon = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{EI}{T}}$ parámetro que modela el efecto de la rigidez a flexión
- $k_n(\varepsilon, \lambda^2)$ enésima (n) longitud de onda, función de n y el parámetro λ^2 y ε
- Ψ función característica modal
- T tensión del tirante
- L longitud libre del tirante
- m masa distribuida del tirante

Así, el conocimiento de las frecuencias naturales del tirante sirve para deducir su tensión, resolviendo el problema inverso.

4.4 Precisión del equipo Vibratest

La precisión de las mediciones de Vibratest es de $\pm 2.3\%$ para los modos 1 a 6.

Por último, presentar una comparativa de resultados dónde se realizó la medición de fuerza en los tirantes por medio del gato múltiple y el Vibratest. A continuación, las desviaciones entre los valores obtenidos:

Tabla 1. Comparativa de desviaciones (%) entre pesaje con gato múltiple y Vibratest.

Proyecto	Tipo tirante	Desviación fuerza comparativa gato múltiple y Vibratest (%)
Queensferry Crossing (Reino Unido)	Cordones paralelos (PSS)	-1.9 / -0.4
Anjikhad Bridge (India)	Cordones paralelos (PSS)	-2.1 / +1.8
Kessock Bridge (Reino Unido)	Cable cerrado (locked-coil)	+1.3 / +2.0

5. Conclusiones

El sistema VSL MSI2000 se instaló en el viaducto Hernani-Astigarraga. Un conjunto atirantado que había sido originalmente concebido para estructuras articuladas ligeras, como pasarelas o puentes arco de dimensiones pequeñas. De este modo, queda demostrada su aplicación en la tipología de estructuras pesadas y rígidas cumpliendo con el mismo rendimiento que los sistemas de tirantes convencionales.

El proceso de pre-ensamblaje del tirante facilita lograr grandes ratios de producción en cadena. Una vez terminados, éstos pueden ser acopiados sobre el tablero para su pronta instalación.

Si bien es verdad que la operación de tesado involucra el ensamblaje de un marco metálico formado por barras y gatos, el conjunto horquilla orejeta permite una alineación sencilla del tirante con los equipos de tesado, garantizando ese grado de movimiento en el plano del tirante para facilitar la operación.

Por último, destacar la implementación de métodos de medición indirecta de fuerzas (Vibratest de VSL), que permitió agilizar el proceso de verificación de fuerzas, llegando a realizar hasta 160 mediciones durante toda la obra.

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, siendo la primera estructura atirantada dentro de la Red Ferroviaria de Alta Velocidad para España. En especial a la UTE Hernani-Astigarraga Sacyr Construcción y Arenas & Asociados 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 30, 2005.
- [2] Post-Tensioning Institute (PTI), Recommendations for Stay Cable Design, Testing and Installation, PTI DC45.1-18, 2018.