

# Control remoto del montaje del puente atirantado Nanay

*Remote control of the assembly of the Nanay cable-stayed bridge*

Diego Aita Santos<sup>a</sup>, David Sanz Cid<sup>b</sup>, Peter Tanner<sup>c</sup>

<sup>a</sup> MSc Project Management - Ingeniero de Obras Públicas. Cesma Ingenieros, S.L. [peru@cesmaing.com](mailto:peru@cesmaing.com)

<sup>b</sup> Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Cesma Ingenieros, S.L. [cesma@cesmaing.com](mailto:cesma@cesmaing.com)

<sup>c</sup> MSc ETH, Zürich; Doctor Ingeniero de Caminos. Cesma Ingenieros, S.L. [cesma@cesmaing.com](mailto:cesma@cesmaing.com)

## RESUMEN

Debido a la flexibilidad de los puentes atirantados, todo el proceso de previsión y comprobación de la geometría y de las fuerzas en los tirantes en cada fase de su montaje, así como el planteamiento de los ajustes necesarios resulta laborioso y requiere unos análisis continuos para todas las situaciones previsibles. A efectos de control, es necesario disponer de un modelo estructural que permita reproducir, con precisión, la situación en obra. Durante el montaje del puente Nanay, el control de los datos obtenidos en obra se realizó a 8500 km de la Amazonía peruana, lo que permitió definir sin demorar el proceso las oportunas medidas correctivas para las siguientes etapas, aprovechando la diferencia horaria.

## ABSTRACT

Due to the deformability of cable-stayed bridges, the entire process of predicting and verifying the geometry and forces on the stays at each stage of their assembly, as well as planning the necessary adjustments, is laborious and requires continuous analysis for all relevant situations. For control purposes, a structural model is needed that allows the situation on site to be accurately reproduced. During the assembly of the Nanay Bridge, the verification of the data obtained on site was carried out at 8,500 km from the Peruvian Amazon region, which made it possible to take advantage of the time difference to determine the appropriate corrective measures for the following phases without delaying the process.

**PALABRAS CLAVE:** puente atirantado, montaje, ajuste geométrico, fuerzas, mediciones, modelo, tolerancias.

**KEYWORDS:** cable-stayed bridge, assembly, geometric adjustment, forces, surveys, model, tolerances.

## 1. Introducción

El control geométrico de los puentes atirantados es un problema complejo, debido a la magnitud de las deformaciones, que se producen durante el proceso constructivo, en comparación con las precisiones requeridas. La presencia de los tirantes implica la ventaja de que permiten modificar la geometría para ajustarla a las tolerancias previstas. No obstante, todo el proceso de previsión de la geometría en cada fase, su comprobación y el planteamiento e

implementación de los ajustes necesarios es un proceso laborioso que requiere unos análisis continuos para todas las situaciones previsibles, teniendo en cuenta todas las variables relevantes. En términos generales, el montaje y la puesta en carga de la estructura y de los tirantes se puede realizar de dos maneras:

- Ajuste de las fuerzas en los tirantes y control de la geometría;

- Ajuste de la geometría y control de las fuerzas en los tirantes.

El segundo de estos procedimientos resulta más adecuado para estructuras flexibles, como es el caso del puente Nanay, objeto del presente artículo. Adicionalmente al ajuste de la geometría y el control de las fuerzas en los tirantes, los manuales internacionales sobre la instalación de los sistemas atirantados [1 - 3] también recomiendan controlar que los alargamientos de los tirantes se encuentren dentro de los límites previstos.

Para poder realizar el montaje de un puente atirantado con todas las garantías, es necesario disponer de un modelo estructural que permita reproducir, con unas desviaciones mínimas, la situación en obra. Por ejemplo, si a este modelo se le aplican las mismas cargas de la obra, incluidas las fuerzas en los tirantes, las deformaciones calculadas tienen que coincidir, en cada fase, con los valores determinados en obra. En los casos en los que las desviaciones entre, por un lado, las deformaciones medidas o las fuerzas aplicadas en obra y, por otro lado, los correspondientes valores previstos según el modelo resulten excesivas, es necesario averiguar las causas, por ejemplo, realizando mediciones alternativas, revisando el modelo de cálculo, etc. Solo cuando los parámetros determinados en la obra coincidan con los obtenidos mediante el modelo, es posible continuar el montaje definiendo, en su caso, las medidas correctivas a adoptar en las siguientes fases para conseguir que, en su estado final, el puente cumpla los requisitos de seguridad estructural según la norma en vigor (por ejemplo [4]) y alcance la geometría requerida. En el caso de que no se consiguiera esta coincidencia entre las mediciones en la obra y las previsiones en los cálculos, resultaría incierta cualquier extrapolación, basada en el mismo modelo, sobre las prestaciones de la estructura en cualquier fase posterior, incluido para el puente terminado.

El montaje del puente atirantado Nanay y, por tanto, el control de que la geometría de la estructura y las fuerzas en los tirantes se encontraran dentro de las tolerancias establecidas, particularmente en el estado final pero también en todas las etapas intermedias, fue responsabilidad del taller metálico. El contratista principal, a su vez, realizó un control independiente de todo el proceso, tarea que encargó a Cesma Ingenieros y que es objeto del presente artículo.

El apartado 2 contiene una descripción de la obra, en particular del puente atirantado. El proceso constructivo de este último es objeto del apartado 3, mientras que el plan de control geométrico y de las fuerzas en los tirantes se resume en el apartado 4. El modelo de cálculo empleado para la obtención de los valores teóricos de los parámetros de control se describe en el apartado 5. El análisis de los datos tomados en obra para el seguimiento del montaje se aborda en el apartado 6. El estado final del puente, una vez finalizada su construcción, es objeto del apartado 7. De todo este proceso se extraen, finalmente, algunas conclusiones.

## 2. El puente

El puente Nanay está ubicado en las proximidades de la ciudad de Iquitos, capital de la región de Loreto en Perú, cerca de la confluencia del río Nanay con el Amazonas. La estructura principal del puente es atirantada, con una longitud total de 423.5 m que se divide en un tramo central de 241.5 m y dos tramos laterales de 91 m cada uno. Este puente es parte de una infraestructura mucho más amplia, con unos accesos en cada orilla del río, formados por dos viaductos con tableros de sección mixta y una longitud total de aproximadamente 1860 m (Figura 1).

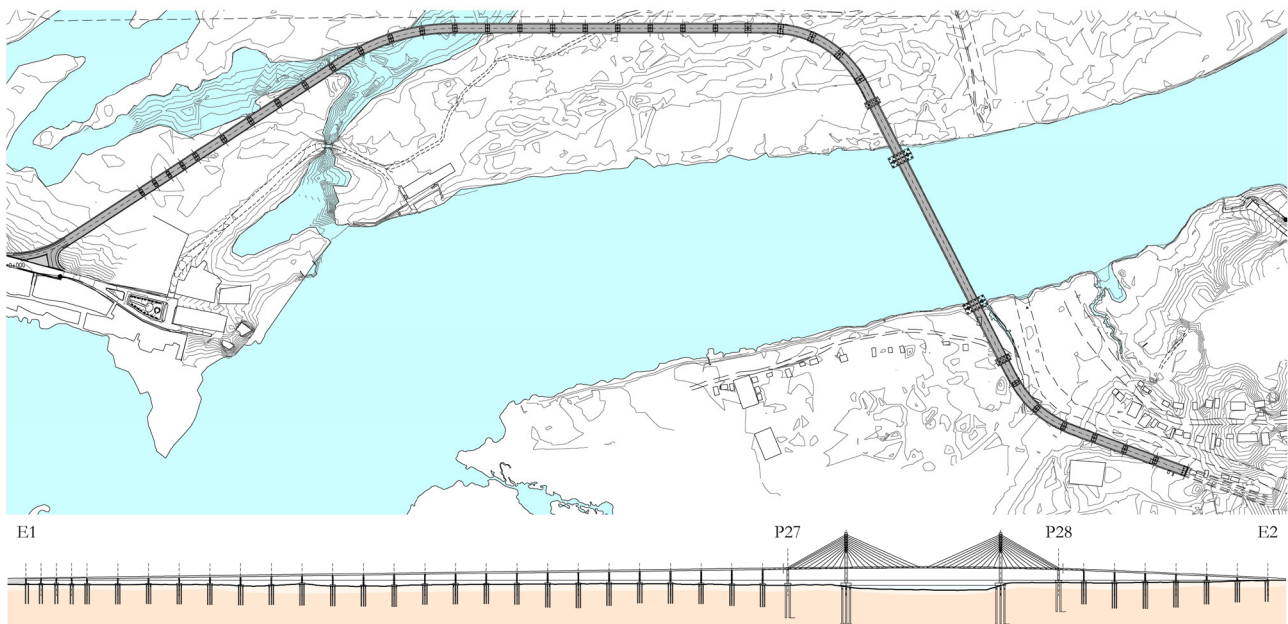


Figura 1. Planta y alzado del puente sobre el río Nanay y de los viaductos de acceso.

Los pilonos o torres del puente presentan una geometría clásica en H, con una altura de alrededor de 80 m (Figura 2). Los tirantes que sostienen el tablero están dispuestos en dos planos, en forma de abanico, con 11 tirantes por cada fuste en el vano principal y 11 tirantes de retenida, por lo que el número total es de 44 tirantes por pilono (Figura 3). Los tirantes de retenida extremos, dispuestos en grupos de 4 cables paralelos entre ellos, transmiten las cargas a través de unos apoyos fijos, antilevantamiento, a las correspondientes pilas, P27 y P28. En los pilonos, T1 y T2, los apoyos del tablero son de tipo multidireccional, transmitiendo las cargas a sendas vigas riostra entre los fustes.

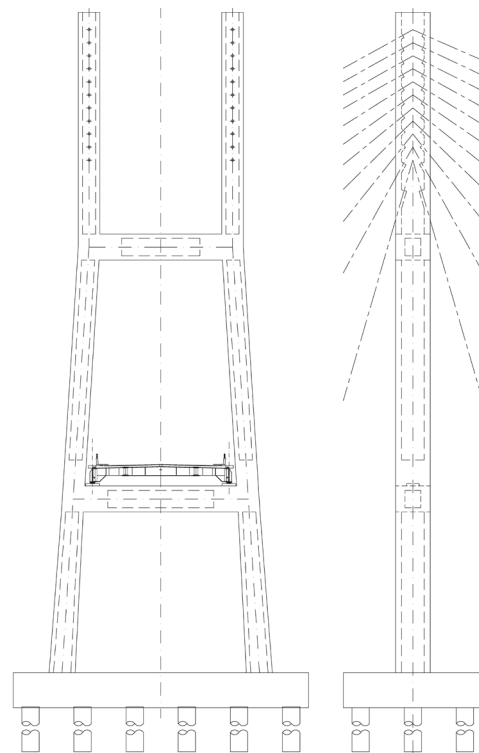


Figura 2. Alzados frontal y lateral de un pilono.

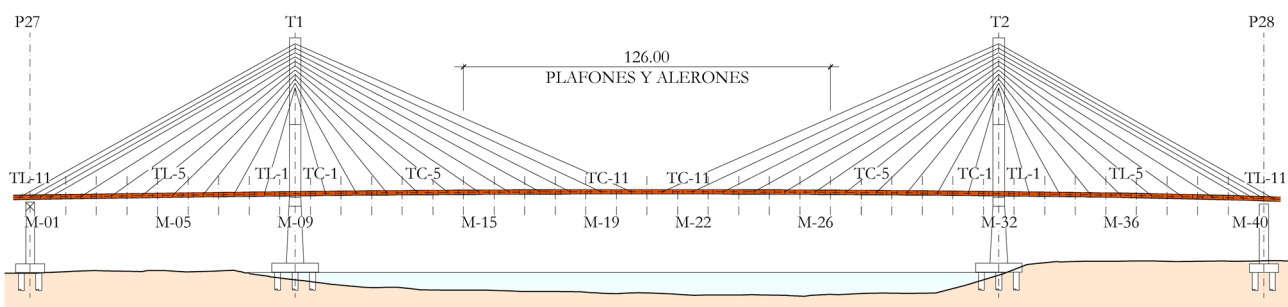
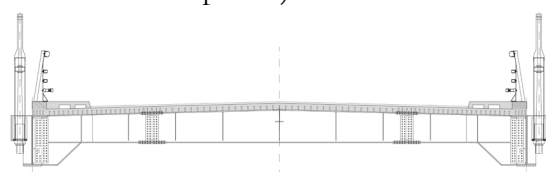


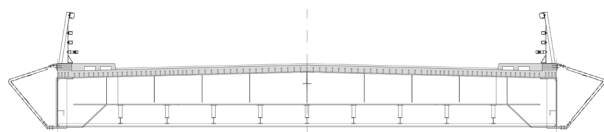
Figura 3. Alzado del puente atirantado sobre el río Nanay (P: pila; T: pilono o torre; M: dovela o módulo del tablero; TC: tirante en vano central; TL: tirante en vano lateral).

El tablero mixto está constituido por un entramado de dos vigas laterales con sección en doble T y alma llena, vigas transversales con el mismo tipo de sección abierta, separadas 3.5 m y unidas entre ellas mediante un perfil longitudinal central, situado en el eje del tablero (Figura 4). Todas las uniones entre estos elementos, ejecutadas en obra, son atornilladas. La sección de hormigón está constituida por losas prefabricadas apoyadas en la estructura de acero, con la que se conecta mediante hormigón in situ a través de conectadores. El canto del tablero es de 2.5 m, aproximadamente, mientras que su ancho es de 15.7 m.

Con el fin de asegurar la estabilidad aeroelástica de la estructura, la sección tipo del tablero se modificó aerodinámicamente en la parte central del vano principal. En un tramo de 126 m de longitud (Figura 3), se colocaron unos elementos denominados alerones y plafones (Figura 5). Para evitar una posible alteración de las propiedades dinámicas del puente, el peso adicional de estos elementos debía ser el mínimo posible, motivo por el que se fabricaron de FRP (Fibre-reinforced plastic).



**Figura 4. Sección transversal del tablero del puente atirantado.**

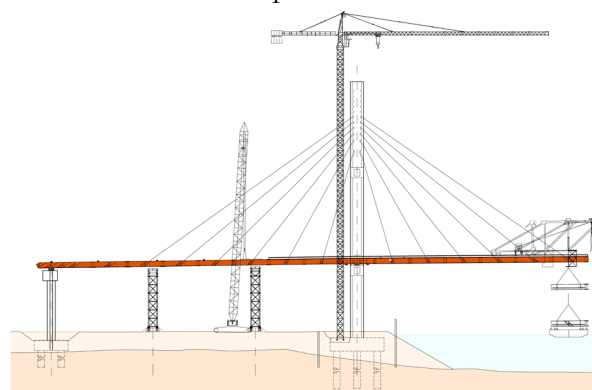


**Figura 5. Disposición de alerones y plafones en el tramo central del tablero.**

### 3. Proceso constructivo

El proceso constructivo previsto por la misma empresa que también fabricó la estructura metálica estaba basado en la idea de finalizar las dos mitades del puente atirantado, incluidos los acabados, antes de proceder al cierre del sistema en el centro del vano principal. Finalmente, con

el fin de facilitar los ajustes geométricos que pudieran resultar necesarios, se optó por el cierre de la estructura metálica antes de la ejecución de la losa de hormigón, convirtiendo el tablero en una estructura mixta. A estos efectos, considerando cualquiera de las dos mitades del puente, una vez construidos los elementos verticales, el vano lateral se instaló mediante grúa sobre los apoyos definitivos en torre y pila, así como dos apoyos auxiliares sobre sendas torres provisionales. A continuación, el avance por voladizos sucesivos del vano principal se realizó elevando las dovelas desde una barcaza mediante un Derrick que avanzó sobre el tablero evolutivo (Figura 6). Para la instalación de los tirantes correspondientes, se empleó una grúa adosada a uno de los fustes del pilono.



**Figura 6. Montaje del vano lateral del tablero mediante grúa sobre apoyos definitivos y auxiliares, y del vano principal por voladizos sucesivos.**

La secuencia del montaje seguido se describe a continuación. El procedimiento fue equivalente en ambas torres. A efectos descriptivos se emplea la nomenclatura de los elementos de la torre T1 (Figura 3):

1. Construcción de las torres y pilas.
2. Montaje y colocación sobre apoyos definitivos y auxiliares de las dovelas M-1 a M-9.
3. Colocación de la dovela M-10 mediante grúa, conexión y finalización.
4. Posicionamiento del Derrick sobre módulo M-10.
5. Montaje y tesado de los tirantes TL-1.
6. Avance del Derrick sobre el módulo M-10 hasta posición de colocación de tirantes.
7. Montaje y tesado de los tirantes TC-1.

8. Avance del Derrick hasta posición de izado de dovela e izado de dovela M-11.
9. Conexión y finalización de la dovela.
10. Montaje y tesado de los tirantes TL-2.
11. Avance del Derrick sobre el módulo M-11 hasta posición de colocación de tirantes.
12. Montaje y tesado de los tirantes TC-2.
13. Avance del Derrick hasta posición de izado de dovela e izado de dovela M-12.
14. Conexión y finalización de la dovela.
15. Montaje y tesado de los tirantes TL-3.
16. Avance del Derrick sobre el módulo M-12 hasta posición de colocación de tirantes.
17. Montaje y tesado de los tirantes TC-3.
18. Repetición de las fases 13 a 17 para la instalación de módulo M-13, tirantes TL-4 y TC-4.
19. Desmontaje del apoyo provisional PP2.
20. Repetición de las fases 13 a 17 para la instalación del módulo M-14, tirantes TL-5 y TC-5.
21. Repetición de las fases 13 a 17 para la instalación del módulo M-15, tirantes TL-6 y TC-6.
22. Colocación de losas prefabricadas en módulo M-6.
23. Desmontaje del apoyo provisional PP1.
24. Repetición de las fases 13 a 17 para la instalación del módulo M-16, tirantes TL-7 y TC-7.
25. Colocación de losas prefabricadas en módulo M-5.
26. Repetición de las fases 13 a 17 para la instalación de los módulos M-17 a M-20, tirantes TL/TC-8 a TL/TC-11.

## 4. Plan de control

### 4.1 Generalidades

Para el control independiente del proceso de montaje del puente atirantado se estableció un plan específico. Este contenía la definición de los parámetros a controlar, las condiciones específicas para las cuales se determinaron los valores esperados de aquellos, así como los límites admisibles, máximos y mínimos, para las desviaciones de estos valores, tanto en las diferentes fases del montaje del puente como en su estado final. Los cálculos alternativos

efectuados a tales efectos permitieron identificar algunos problemas relacionados con el proceso de montaje inicialmente planteado (apartado 3) y formular las recomendaciones correspondientes para su mejora.

### 4.2 Parámetros

Los parámetros de control establecidos se referían al peso propio de las dovelas del tablero, la geometría tanto del tablero como de los pilonos, así como las fuerzas de tesado de los tirantes. A su vez, fueron objeto de control todas las condiciones específicas (apartado 4.3), consideradas en la determinación de los valores esperados de los siguientes parámetros:

- Pesaje de cada dovela, en su caso con los plafones y alerones ya instalados (apartado 2), antes de cargarlas en la barcaza para su izado posterior con el Derrick.
- Determinación, a diario antes de las 7 horas de la mañana (apartado 4.3), de la posición de todos los puntos de control en el tablero, situados en la arista exterior del ala inferior de las vigas laterales, en las secciones de los tirantes y de las uniones entre dovelas, respectivamente.
- Determinación, a diario antes de las 7 h de la mañana (apartado 4.3), de la posición de la coronación, las vigas riostras y la cimentación de las pilas y los pilonos.
- Medición de las fuerzas en los tirantes y de los desplazamientos de sus anclajes durante la fase de tesado.
- Medición de las fuerzas en todos los tirantes al finalizar cada una de las fases del montaje (apartado 3).

### 4.3 Condiciones

Los valores esperados de los parámetros geométricos y de las fuerzas de control se determinaron mediante un modelo de cálculo independiente (apartado 5), para unas condiciones específicas. El cumplimiento de estas condiciones resultó fundamental, ya que la posible contravención de cualquiera de ellas podría haber conllevado unas discrepancias

inexplicadas entre los valores esperados y medidos de los parámetros de control, conduciendo a unas decisiones sesgadas en cuanto a las medidas de corrección a adoptar en las siguientes fases del montaje. Viceversa, en caso de un incumplimiento de cualquiera de las condiciones en cuestión, los valores esperados de los parámetros de control se tenían que ajustar en consecuencia.

Concretamente, las condiciones específicas consideradas englobaron las siguientes:

- Correspondencia entre la geometría nominal y la real de los elementos construidos antes del inicio del montaje del tablero. A efectos de control, se realizó un replanteo exhaustivo de las pilas, los pilonos y todas las dovelas del tablero antes de proceder a su puesta en obra.
- Estricto cumplimiento de la secuencia constructiva según el proceso previsto (apartado 3).
- Coincidencia del peso propio y de la posición del centro de gravedad de las dovelas reales con las previsiones correspondientes. Para este control se realizó el pesaje de las dovelas (apartado 4.2), así como el replanteo arriba mencionado.
- Correspondencia entre la intensidad y la posición de las cargas de construcción actuando sobre el sistema durante las distintas fases del montaje y las previstas.
- Eliminación de los efectos térmicos en el ajuste geométrico de las dovelas en altura y la comprobación de las fuerzas en los tirantes. Para evitar la posible influencia de los gradientes térmicos, las citadas operaciones se realizaron en obra antes de las 7 horas de la mañana y para captar correctamente la influencia de la temperatura media, los análisis se efectuaron para la temperatura media del aire en el lugar de ubicación de la obra, a la citada hora del día, durante los meses previstos para el montaje del tramo atirantado.
- Eliminación de los efectos del viento en el ajuste geométrico de las dovelas y la comprobación de las fuerzas en los tirantes, realizando estas operaciones únicamente en situaciones de viento en calma.

## 4.4 Tolerancias

### 4.4.1. Montaje

La Tabla 1 contiene un resumen de los límites admisibles para las desviaciones entre los valores esperados y los medidos en obra de los parámetros de control, durante la construcción del puente. Estas tolerancias están basadas en experiencias prácticas, disponibles en la literatura especializada (por ejemplo [5]), así como en recomendaciones y normas internacionales.

**Tabla 1. Límites admisibles,  $\Delta_{max}$ , para las desviaciones entre valores esperados y medidos en obra durante el montaje.**

| Parámetro                              | $\Delta_{max}$     | Referencias;<br>Observaciones |
|----------------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Peso dovelas                           | -/+ 2%             |                               |
| Posición relativa vigas principales    | 40 mm              | Sentido vertical              |
| Puntos de control tablero (vertical)   | - 0 mm<br>+ 40 mm  | [5];<br>“+” por encima        |
| Puntos de control tablero (horizontal) | - 80 mm<br>+ 80 mm | [5]                           |
| Puntos de control pilono (horizontal)  | - 5 mm<br>+ 5 mm   | Sentido longitudinal          |
| Fuerza tirantes                        | -/+ 5%             | [2]                           |
| Lector fuerza tesado                   | -/+ 2.5%           | [2]; Resolución               |

El cumplimiento de las tolerancias establecidas permitió garantizar que el puente en su estado final alcanzara la rasante teórica, dentro de las tolerancias establecidas en el apartado siguiente, y que los elementos principales de la estructura portante cumplieran los requisitos de seguridad estructural, de acuerdo con la normativa relevante [4].

### 4.4.2. Estado final

En su estado final, el puente forma el soporte de una carretera, por lo que la funcionalidad de la obra, así como la seguridad y el confort de los usuarios dependen de la regularidad superficial del tablero. Ésta se caracteriza por las desviaciones de una determinada superficie respecto a una superficie teórica [6], en cuanto a las dimensiones que afectan a la dinámica del vehículo, la facilidad de manejo, las cargas

dinámicas o el drenaje (por ejemplo: el perfil longitudinal, perfil transversal, etc.). Convencionalmente se cuantifica mediante el denominado índice IRI (International Roughness Index). De acuerdo con todo lo anterior, las tolerancias geométricas que deben cumplir las estructuras en su estado final dependen del tipo de uso de la obra y, en el caso del puente Nanay, se definieron en términos del IRI, en concordancia con las normas relevantes sobre los sistemas vehículo – pavimento [6].

Por otro lado, la rasante final de un puente atirantado depende de su peso propio, las cargas permanentes, las fuerzas de tesado de los cables y los efectos reológicos, como la retracción y la fluencia. Por ello, aparte de un criterio para la deformación vertical máxima en función de las cargas variables, a menudo, se establecen límites de deformación vertical para las acciones permanentes, incluidos los efectos reológicos, con objeto de asegurar una adecuada regularidad superficial en el puente, tanto a tiempo cero como infinito. No obstante, debido a que en el caso del puente Nanay la deformación diferida resultó muy reducida, los valores límite de este tipo fueron de menor importancia.

#### **4.5 Recomendaciones**

Según los cálculos alternativos efectuados para la determinación de los valores teóricos (valores esperados) de los parámetros de control independiente, los tirantes de las dovelas centrales del vano principal mostraban una eficacia limitada. Eso ocurría, aproximadamente, a partir de los tirantes TC-6 en adelante, debido a su inclinación y longitud, traduciéndose en un comportamiento marcadamente no lineal. Las importantes variaciones de la geometría del tablero para incrementos poco significativos de las fuerzas de tesado de los cables fueron uno de los motivos que originaron el cambio del proceso constructivo inicialmente previsto (apartado 3). También motivaron una serie de recomendaciones adicionales, incluyendo:

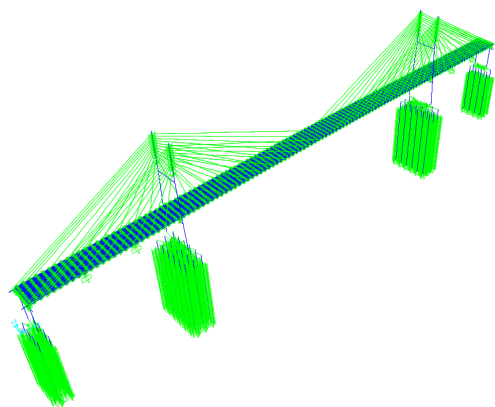
- la definición de un protocolo de actuación para los casos en los que las desviaciones entre los valores medidos y los previstos superaran las tolerancias establecidas (por ejemplo, realización de mediciones alternativas, evaluación de la rigidez de todos los elementos del puente, ensayos, etc.);
- la definición de comprobaciones adicionales de la geometría, basadas en parámetros locales, cuya dependencia de las cargas aplicadas fuera limitada (por ejemplo, ángulos relativos en alzado y en planta);
- el establecimiento de pautas para las medidas de corrección a adoptar en las siguientes etapas del montaje, en función de los resultados obtenidos en los controles efectuados (por ejemplo, ajuste de las fuerzas de tesado en los siguientes tirantes a instalar, retesado de los tirantes ya instalados, corrección angular entre dovelas, etc.);
- la previsión de medidas para los posibles casos en los que el ciclo de montaje e instalación de una dovela no se pudiera finalizar dentro del horario previsto.

Todas estas recomendaciones estaban destinadas a la empresa encargada del montaje del puente. Su objetivo consistía en contribuir a que todo el proceso se desarrollara respetando las tolerancias establecidas, alcanzando en todo momento los niveles de fiabilidad estructural requeridos [4].

#### **5. Modelo de cálculo**

Los análisis estructurales del montaje del puente atirantado se realizaron mediante un modelo que permitió reproducir todo el proceso evolutivo seguido en la obra (apartado 3), teniendo en cuenta los aspectos relevantes, incluidos los efectos no lineales. La Figura 7 representa el modelo tridimensional de la estructura completa, constituido por elementos barra con seis grados de libertad por nudo, elaborado con el programa SAP2000. Se trata de un programa de elementos finitos que determina desplazamientos, esfuerzos y tensiones en una estructura, resultantes de las condiciones de contorno

impuestas y de las fuerzas aplicadas. Realiza análisis estático o dinámico, lineal o no lineal, en dos o tres dimensiones. Resuelve problemas no lineales, tanto en geometría (efecto P-delta, problemas de rozamiento y despegue), como en materiales (plasticidad).

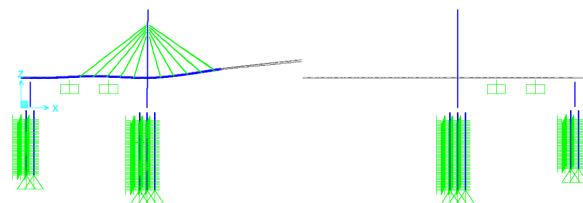


**Figura 7. Modelo de cálculo tridimensional de la estructura completa.**

Las vigas principales y secundarias del tablero se modelaron como elementos tipo “frame”, en su centro de gravedad, mientras que para los tirantes se emplearon elementos no lineales tipo “cable”. Para la losa de hormigón se optó por un emparrillado de elementos tipo “frame”, unidos a las vigas mediante “links” rígidos, compatibilizando los desplazamientos y giros entre los puntos de conexión. Para los apoyos permanentes se dispusieron “links” con una rigidez igual a 500,000 kN/m para los grados de libertad restringidos y cero para los libres. Las torres auxiliares se modelaron con elementos no lineales tipo “gap” que solo transmiten compresiones, permitiendo el levantamiento del tablero a lo largo del proceso de montaje. En sentido vertical, estas torres se consideraron cuasirrígidas, coaccionando también los movimientos transversales del tablero. En los pilotes de las cimentaciones profundas se dispusieron muelles horizontales, con las rigideces dependiendo de la profundidad, de acuerdo con la información geotécnica disponible. Finalmente, las cargas y las fuerzas en los tirantes se aplicaron con sus valores

nominales o los valores medidos en obra, según disponibilidad.

Para el análisis no lineal del proceso evolutivo de la construcción del puente se añadieron las distintas partes de la estructura según la secuencia descrita en el apartado 3. Inicialmente, se modelaron las mitades del puente sin conectar como “guide objects”. Los objetos guía tienen la misma geometría que el objeto real, pero sin rigidez, sin masa, sin cargas y sin efectos diferidos en el tiempo. La estructura guía se deforma con el modelo de la estructura real, en función de los movimientos en el borde de conexión entre ambas, siendo la deformada de la guía tangente a la curva deformada resultante de la estructura real que ya existe. De esta manera, se aseguró que las nuevas dovelas introducidas en cada fase tuvieran continuidad con la deformada del sistema ya existente. La Figura 8 representa una fase tipo donde puede observarse que los desplazamiento y giros relativos en la sección frontera de la estructura real que ya existe y la estructura guía son nulos.



**Figura 8. Análisis no lineal del sistema evolutivo utilizando objetos guía.**

## 6. Análisis

Los datos de control se analizaron y verificaron tan pronto como fueron transmitidos desde la obra, después de la finalización de las distintas fases del montaje del puente. Para algunos parámetros, se observaron desviaciones importantes entre los valores medidos y los teóricos, según el proyecto de montaje. Por ejemplo, en los vanos laterales de ambos pilonos, la rasante del tablero se encontraba por encima de la posición prevista, mientras que en el vano central se encontraba por debajo, alcanzando

una diferencia máxima de 323 mm en la punta del voladizo del pilono T1, después del montaje del módulo M-16. También las fuerzas en los tirantes se desviaron de los valores indicados en el proyecto de montaje. En términos porcentuales, las diferencias variaban en la medida en que las fuerzas en los tirantes aumentaban o disminuían en las fases sucesivas del montaje. Las mayores desviaciones se observaron en ambos pilonos para el tirante TC-3, superando las fuerzas medidas en algunas fases a los valores teóricos correspondientes en más del 50%.

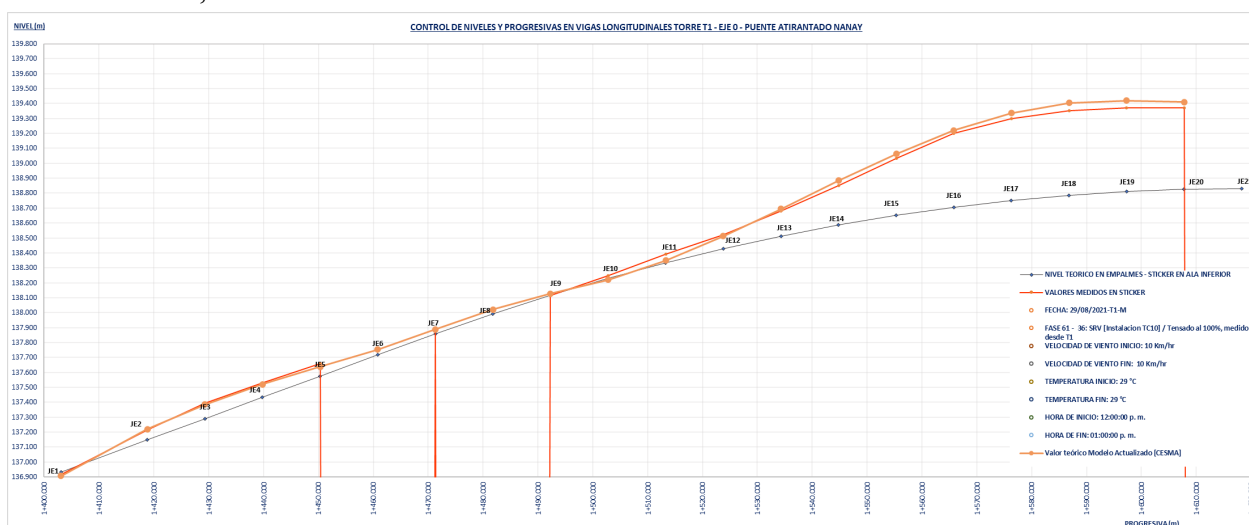
Con el fin de detectar, en la medida de lo posible, la causa o las causas de las anteriores diferencias, se realizaron unos análisis independientes de los del proyecto de montaje, utilizando el modelo descrito en el apartado 5. Se investigaron diferentes hipótesis, tales como las posibles variaciones de la rigidez del tablero o del módulo de elasticidad del hormigón, los efectos térmicos, el bloqueo de un apoyo provisional, las posibles desviaciones en los ángulos relativos entre las primeras dovelas, la aplicación de cargas imprevistas sobre el tablero, incluida la posible colocación prematura de las losas prefabricadas en el módulo M-6, o un posible giro de los pilonos. Según los resultados obtenidos, considerándolas de forma aislada, ninguna de las mencionadas hipótesis permitió explicar, simultáneamente, las desviaciones observadas en

las deformaciones del tablero y de los pilonos, así como en las fuerzas de los tirantes. Se concluyó que estas desviaciones se debían a un conjunto de causas. En el caso de la rasante del tablero del vano central, sólo unos ángulos relativos entre las primeras dovelas diferentes a los teóricos permitían explicar la geometría determinada en obra.

Con el fin de reproducir, lo más fielmente posible, el estado real de la estructura, se recalculó todo el proceso evolutivo de su montaje, actualizando el modelo alternativo (apartado 5) con los valores medidos en obra de aquellos parámetros para los que se habían detectado diferencias con los correspondientes valores nominales según el proyecto de montaje:

- fuerzas de tesado de los tirantes;
- peso propio de las dovelas;
- peso del Derrick;
- ángulo de  $-0.25^\circ$  con respecto a la tangente nominal en la salida del tablero.

En general, los resultados obtenidos mostraron una buena correlación entre los cálculos y las mediciones en obra, tanto en cuanto a las deformaciones como las fuerzas en los tirantes. A título de ejemplo, la Figura 9 representa la comparación entre las mediciones y los cálculos mediante el modelo alternativo ajustado para la posición de los puntos de control en el tablero del pilono T1, después de la instalación de los tirantes TC-10.



**Figura 9. Posición de los puntos de control en el tablero del pilono T1, después de la instalación de los tirantes TC-10: comparación de los valores medidos en obra con los obtenidos mediante el modelo alternativo ajustado.**

## 7. Estado final

Una vez finalizado el montaje del puente la rasante del tablero correspondía a la requerida, con unas desviaciones aceptables. Además, se verificó que los elementos principales del sistema portante, incluidos los tirantes en los que las fuerzas medidas durante el montaje habían superado a las teóricas según el proyecto de montaje (apartado 6), cumplieran los requisitos de fiabilidad estructural de acuerdo con la normativa vigente [4]. Para las verificaciones se empleó el modelo alternativo ajustado, anteriormente descrito. Efectivamente, las comparaciones de los resultados del recálculo del proceso evolutivo de la construcción del puente con las mediciones en obra permitieron validar este modelo (apartado 6), por lo que fue apto para la adopción de decisiones sobre las prestaciones futuras de la obra.

## 8. Conclusiones

Por muy sofisticado que sea el modelo empleado a efectos de control del proceso de montaje de los puentes atirantados, la calidad de los resultados numéricos obtenidos depende en primer lugar de los datos de entrada. Para evitar ajustes equivocados durante el proceso de montaje, debido a unas discrepancias inexplicadas entre los valores calculados y medidos de los parámetros de control, la información adquirida en obra y transmitida a los técnicos responsables del seguimiento del proceso debe ser precisa y completa. En este contexto, resulta importante que se comuniquen también los datos atípicos, en el caso de que se registren. Sólo si se logra explicar, de manera inequívoca, las diferencias entre las mediciones en obra y los cálculos, es posible culminar el montaje de un puente atirantado, de modo que cumpla los requisitos de fiabilidad estructural y alcance la geometría requerida.

Con el fin de determinar las fuerzas de tesado en los tirantes para la construcción de los puentes atirantados, en la práctica se parte frecuentemente de la situación definitiva del sistema, desmontándolo virtualmente mediante un cálculo hacia atrás. Los análisis efectuados en relación con el montaje del puente sobre el río Nanay pusieron de manifiesto que este método sólo produce resultados satisfactorios en el caso de los puentes con un comportamiento cuasi lineal. En los puentes con un marcado comportamiento no lineal, este método sólo sirve para una aproximación inicial de las fuerzas de tesado. En estos casos, es necesario proceder a una segunda fase del análisis, realizando un cálculo evolutivo, según el proceso constructivo previsto, que permita ajustar las fuerzas de tesado iniciales al comportamiento real no lineal de la estructura.

### *Agradecimientos*

Se agradece la excelente colaboración con el Ministerio de Transportes y Comunicaciones - Provías Nacional, con el Consorcio Puentes de Loreto (Mota Engil Perú, Incot, Cosapi) y con Cimolai durante la construcción del puente.

### *Referencias*

- [1] PTI DC45.1-18. Recommendations for Stay Cable Design, Testing and Installation. 2018.
- [2] FIB Bulletin n°30. Recommendations for the Acceptance of stay cable systems using prestressing steel.
- [3] Setra/CIP. Recommendations of French Interministerial Commission on Prestressing.
- [4] AASHTO. LRFD - Bridge Design Specification. 2017.
- [5] Navarro, J. y Lucas. C., Control geométrico del tramo atirantado del Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz, Hormigón y Acero. 67 (2016) 143-158.
- [6] ASTM. E867-06 – Standard Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems. 2006.