

Nuevo Puente de Pumarejo sobre el río Magdalena en Barranquilla (Colombia). Seguimiento y control del proceso constructivo del tramo atirantado

New Pumarejo Bridge over Magdalena river in Barranquilla (Colombia). Monitoring and control of the erection process of the cable stayed stretch

Francisco Millanes Mato^a, Miguel Ortega Cornejo^b, Jokin Ugarte González^c, Alberto Suz Maroto^d, Rüdiger Spengler^e, David Ruiz^f

^a Doctor Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Presidente. IDEAM, S.A. francisco.millanes@ideam.es

^b Máster Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Director de Ingeniería. IDEAM, S.A. miguel.ortega@ideam.es

^c Máster Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe de Proyectos. IDEAM, S.A. jokin.ugarte@ideam.es

^d Máster Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. IDEAM, S.A. alberto.suz@ideam.es

^e Ingeniero Civil. Universidad RWTH Alemania. Responsable depart. de Estructuras Obra Civil en SACYR rspengler@sacyr.com

^f Ingeniero Civil, Espec. en estructuras. Universidad Nac. de Colombia. Espec. estructural Consorcio SES. dmelo@consorcioses.com

RESUMEN

El Nuevo Puente Pumarejo sobre el río Magdalena tiene un tramo central atirantado con un vano principal de 380 m de luz y un ancho de 38.1 m. La construcción del tramo atirantado se llevó a cabo por avance en voladizos sucesivos de la sección cajón, con dovelas de 10 m de longitud y 400 t de peso tipo, completada mediante un carro de alas 3 dovelas por detrás. La complejidad del proceso constructivo motivó el desarrollo de un estudio que analizara la sensibilidad del puente a variaciones en el valor de sus parámetros principales durante las fases de construcción. Este artículo describe el seguimiento de todas esas fases y los ajustes necesarios realizados durante la obra.

ABSTRACT

The New Pumarejo Bridge over Magdalena River has a cable-stayed central stretch with a 380 m long main span and 38.1 m wide. The erection of the cable-stayed stretch was carried out by the free cantilevering of the central box girder, with cast in place segments 10 m long and 400 t weight, and completed by a cantilever machine 3 segments behind. The complexity of the erection motivated the study of the bridge's sensitivity to variations on its main parameters during the erection phases. This article describes the monitoring of all these phases and the necessary adjustments made during the work

PALABRAS CLAVE: puente atirantado, voladizos sucesivos, estudio de sensibilidad, construcción evolutiva.

KEYWORDS: cable-stayed bridge, free cantilevering, sensitivity analysis, evolutionary construction.

1. Introducción

El Nuevo Puente Pumarejo ha sido descrito en otros artículos y comunicaciones [1], por lo que este artículo describe la metodología empleada

por IDEAM para el seguimiento de la construcción del tramo central atirantado.

2. Filosofía de seguimiento y control de la construcción del tramo atirantado

2.1 Modelo nominal y datos de partida para la construcción

2.1.1. Introducción

El modelo de seguimiento de la construcción del tramo atirantado del Nuevo Puente Pumarejo sobre el río Magdalena partió del modelo nominal realizado para el estudio de sensibilidad [2], y de las fuerzas de tesado de los tirantes y contraflechas en él definidos. A partir de él, el modelo se fue ajustando de forma sucesiva para adaptarlo al comportamiento real del puente durante su construcción (Figura 1).

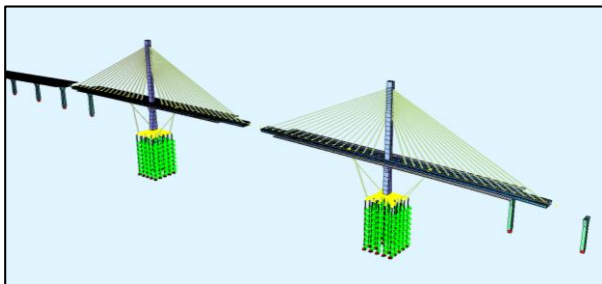


Figura 1. Modelo de seguimiento. Fase anterior al colado de la sección parcial en U de la dovela DS-17

En este apartado se describen las características principales del modelo nominal y se analizan los principales resultados que se extraían primero de él y después de los sucesivos modelos de seguimiento, para definir el proceso de construcción del tramo atirantado del puente.

2.1.2. Secuencia de operaciones y movimiento de cargas

El modelo nominal trató de reflejar la realidad de la construcción de la forma más fiel posible, estudiando todas y cada una de las operaciones a llevar a cabo durante el proceso constructivo del tramo atirantado (incluyendo la disposición de la ferralla de las diferentes secciones parciales de una dovela, su hormigonado evolutivo etc...). La distribución de pesos del tablero también se ponderó estrictamente, teniendo en cuenta las diferentes cuantías de armado en cada una de las

zonas del tablero y de las diferentes secciones parciales de una dovela mediante la variación de su densidad equivalente (por ejemplo las dovelas de retenida tenían una densidad mayor que las de suspensión; la sección parcial en U mayor que la de la losa superior entre almas, y ésta que las alas etc...). El peso final de los medios auxiliares se ajustó respecto al valor considerado en proyecto en función de la información proporcionada por el suministrador (Construgomes) y por la obra (Consortio SES), y se tuvieron en cuenta todos los acopios y elementos auxiliares presentes en cada momento en el tablero en función de las operaciones específicas requeridas por la obra.

Todo ello culminó con la definición de un documento consensuado con el Consortio SES en el que se definían todas las cuestiones anteriores y la secuencia concreta de operaciones a seguir para la ejecución del tramo atirantado (incluyendo la posición y peso de acopios, medios auxiliares...). El control del cumplimiento estricto de dicha secuencia fue uno de los aspectos clave de las labores de seguimiento de la construcción, modificándose sólo de forma consensuada, tras un análisis previo y la modificación pertinente del modelo de seguimiento.

2.1.3. Contraflechas

Se definieron tanto contraflechas verticales en los pilonos, como verticales y longitudinales en el tablero.

Las contraflechas verticales del pilono contrarrestaban el descenso de la zona de anclaje de los tirantes en el mástil por acortamiento elástico (a medida que se fuera añadiendo el peso de nuevas dovelas) y por efectos reológicos (fluencia y retracción de los pilonos). El diseño del proceso constructivo permitió que los pilonos quedaran prácticamente verticales al final del proceso constructivo. Este hecho y las dificultades constructivas para dar contraflechas longitudinales a los pilonos hicieron que los pilonos se construyeran verticales. Es importante señalar que, dado que la ejecución del tablero se comenzó antes de la finalización del

mástil, el momento de ajuste de los encofrados del mástil tuvo que limitarse a las fases en las que el tablero se encontrara en posición de equilibrio. De otra forma, el mástil hubiera arrastrado la deformación longitudinal del pilono debida al desequilibrio del tablero.

Las contraflechas longitudinales del tablero también pretendían contrarrestar el acortamiento elástico producido por la componente horizontal de los tirantes y por los procesos reológicos presentes en el tablero (muy similares a los de los pilonos; (“ Δx_i ” en la Figura 2). Las contraflechas verticales anulaban la deformada vertical debida a la construcción. Las fuerzas objetivo de los tirantes bajo cargas permanentes se definieron para conseguir una ley de viga continua apoyada en los tirantes. Sin embargo, la construcción evolutiva de la sección en la que la fuerza en los tirantes se introducía en una configuración más flexible que el peso de parte de la sección (las alas, ver [2]), hacía que el tablero tendiera a tener una deformada hacia arriba que debía contrarrestarse mediante contraflechas.

Las contraflechas verticales del tablero se definieron para cada uno de los frentes de dovela en la fase inmediatamente anterior al hormigonado de la sección parcial en U de la dovela correspondiente. A esta contraflecha se añadían posteriormente las contraflechas por deformabilidad del carro de avance por voladizos sucesivos y el sistema de encofrado, responsabilidad de la empresa suministradora (Construgomes).

Las contraflechas se definieron de forma absoluta (“ $z_{abs\ PUNTA,i}$ ”, ver Figura 2), en contraposición a una definición relativa (“ Δz_i ” en la Figura 2), lo que tenía algunas ventajas pero también varios inconvenientes.

Como principal ventaja, la posición de cada una de las dovelas era independiente de las desviaciones producidas en las dovelas anteriores, y en el momento de su colocación se encontraba exactamente en la posición teórica prevista para llegar a la cota de rasante al final del proceso constructivo. La desviación acumulada en cada devela dependía por tanto únicamente de los errores cometidos en el momento de su ejecución y de las desviaciones producidas después de dicho momento. La principal contrapartida resultaba la sensibilidad a las diferencias entre las condiciones del modelo teórico y la realidad, en concreto, a las acciones climáticas y a las diferencias en la situación de las cargas sobre el tablero (por ejemplo, la presencia de un camión cerca del frente de avance que provocara un descenso de la punta de la dovela “i” de “X” cm, provocaría que, tras disponer la punta de la dovela “i” a la cota “ $z_{abs\ PUNTA,i}$ ” y eliminar el camión de dicha posición, la punta de la dovela “i” quedara a la cota “ $z_{abs\ PUNTA,i} + X$ ”).

Para minimizar este riesgo se definió una secuencia estricta de operaciones que tenía en cuenta todos los medios auxiliares y acopios presentes en el tablero en cada fase, consensuada con el Consorcio SES, y se definió un protocolo estricto de definición de la posición de la dovela

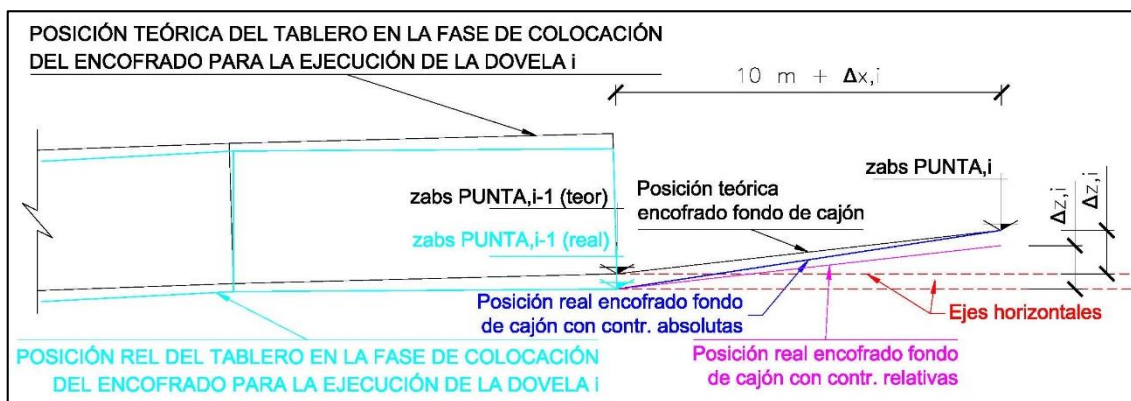


Figura 2. Esquema de disposición de contraflechas (desviaciones exageradas para facilitar su comprensión)

“i” antes del hormigonado de la sección parcial en U (hora de medida, condiciones de viento...). La ejecución de las alas 3 dovelas por detrás del frente de avance obligó a definir también contraflechas para las alas. Tras una evaluación minuciosa de las ventajas e inconvenientes de esta decisión de forma conjunta con la obra, decidió definirse las contraflechas de las alas también de forma absoluta (siguiendo el mismo método descrito para las contraflechas de las dovelas cajón), en contraposición a una definición relativa respecto a la posición del cajón previamente ejecutado. Ello permitió reducir las desviaciones de las alas respecto a las desviaciones del cajón (de nuevo, sólo dependían de los errores en su posicionamiento y de las desviaciones posteriores a su ejecución, no de las anteriores), mejorar el ajuste a la rasante y por lo tanto minimizar los sobreespesores de pavimento a disponer, pero hizo el posicionamiento de las alas sensible a los efectos transitorios comentados anteriormente. Como efecto adicional, en caso de que el cajón presentara alguna desviación respecto a su posición teórica en la fase de ejecución de las alas y éstas consiguieran corregirlo mediante la disposición de contraflechas absolutas, se modificaba el peralte de la sección (que debería corregirse de forma posterior mediante un espesor de pavimento variable transversalmente).

2.1.4. Fuerzas de tesado

El parámetro fundamental de control del tesado de los tirantes era la fuerza al final del proceso de tesado. Sin embargo, también se definió el alargamiento correspondiente considerando la flexibilidad de la estructura, que sirvió como control adicional de la fuerza de tesado proporcionada al tirante.

La fuerza de tesado era sensible a los mismos fenómenos transitorios que afectaban a las contraflechas. Además del control de la secuencia de operaciones prevista, para independizar el tesado de los tirantes del

momento del día en el que se produjera (se trataba de una operación que duraba varias horas y que, habida cuenta de los ritmos de trabajo de la obra, no podía demorarse para ser realizada en un momento determinado del día), se definió un método de ajuste de la fuerza de los tirantes en función de una serie de parámetros térmicos del puente en el momento de finalización del tesado (temperatura uniforme del tablero y de los pilonos, gradiente vertical y longitudinal de tablero y pilonos, temperatura en los tirantes...).

2.2 Variables de control y seguimiento llevado a cabo

En este apartado se describen y analizan las variables medidas en obra durante la construcción del tramo atirantado (Figura 3), que fueron las variables de control empleadas para evaluar el ajuste del modelo de seguimiento al comportamiento real del puente. El apartado analiza las variables de control consideradas, la forma en la que se medían en obra y el procesamiento que se hacía de ellas para poder compararlas con los resultados del modelo de seguimiento.



Figura 3. Vista lateral del puente durante su construcción

Antes de analizar cada variable de forma individual, conviene describir someramente la naturaleza de los datos tomados. Las variables de control pueden clasificarse, respecto a su forma de medida, en dos grandes grupos: medidas discretas y medidas continuas. Las medidas discretas se tomaban de forma puntual en una fase constructiva determinada (generalmente al final de una operación). En este grupo se sitúan

las deformaciones verticales del tablero y las deformaciones longitudinales de los pilonos obtenidas por topografía, y los axiles de los tirantes obtenidos mediante pesajes. Las lecturas continuas en cambio, son aquellas obtenidas por la instrumentación dispuesta en la estructura a tal efecto, y aportaban información continua de la variable que medían. Esta información era post-procesada para poder asignar un valor a cada variable en cada una de las fases de construcción y disponer de datos comparables con el grupo de datos discretos mencionados anteriormente y con los resultados obtenidos del modelo de seguimiento que, inevitablemente, eran discretos (para cada fase de construcción). En este grupo se sitúan las deformaciones verticales de los carros de avance medidas mediante GPS, el axil en los tirantes medido mediante celdas de carga, el giro de los pilonos medido mediante clinómetros biaxiales, las tensiones en las armaduras de tablero y pilonos medidas mediante extensómetros, la temperatura de los diferentes elementos del puente... (Figura 4).

Deformación vertical del tablero. Ha sido la variable de control más importante durante la construcción del tramo atirantado. Su medida se realizó mediante topografía, tomando datos de todos los frentes de dovela (cada 10 m, independientemente de su distancia al frente de avance) inmediatamente después de una determinada operación (a la hora en la que ésta se produjera).

La gran densidad de puntos de medida permitió identificar patrones de deformación que con un número menor (frentes de avance) no hubieran podido detectarse: una desviación

de la deformación vertical en un punto podía explicarse por muchos motivos. Sin embargo, al disponer de la deformada completa del tablero cada 10 m, mediante la comparación con los resultados de los modelos desarrollados durante el estudio de sensibilidad de la construcción del tramo atirantado (o una combinación lineal de ellos, [2]) solía quedar patente cuál de los motivos era el que mejor describía el comportamiento del puente, y qué grado de desviación había tenido respecto a su valor nominal. Ello permitía dirigir el ajuste del modelo de seguimiento en dicho sentido.

La toma de datos en el momento de finalización de todas las operaciones permitió no sólo comparar la desviación absoluta de la deformada teórica del modelo, sino la desviación relativa de la deformación debida a una determinada operación. Este tipo de control relativo fue clave para detectar las desviaciones del comportamiento real del puente respecto al modelo de seguimiento (Figura 5).

Por otro lado, hubiera sido preferible que la toma de datos se realizara siempre a la misma hora, preferentemente a primera hora de la mañana cuando los efectos térmicos eran menores. Sin embargo, las necesidades de avance de la obra, (con un plazo muy ajustado, turnos de 24 h...), no lo permitían. Por lo tanto, se decidió tomar las medidas inmediatamente después de terminar una operación, cuando la situación real del puente era exactamente la considerada en el cálculo (antes del movimiento de medios auxiliares, acopios...), llevando un control exhaustivo de la fecha y de la hora de medida. Con la instrumentación térmica del

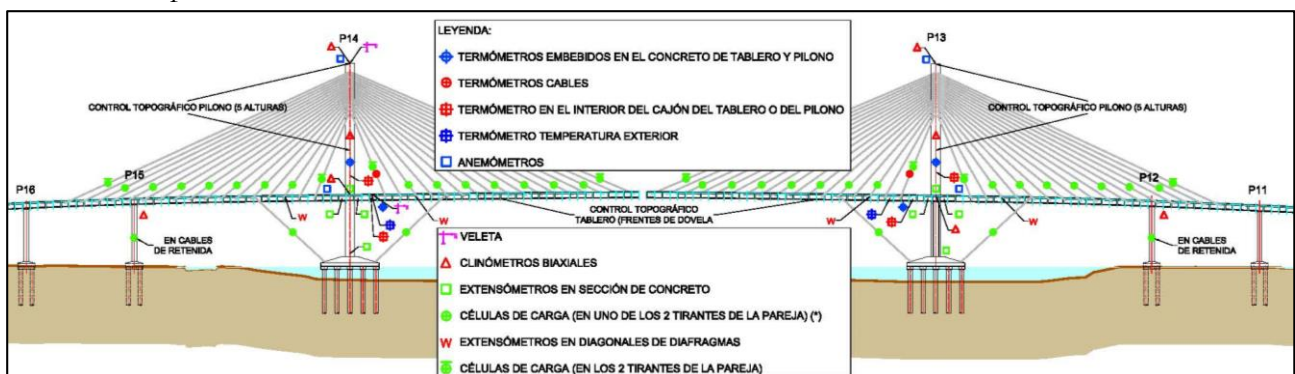


Figura 4. Esquema de disposición de instrumentación y toma de datos en la construcción del tramo atirantado

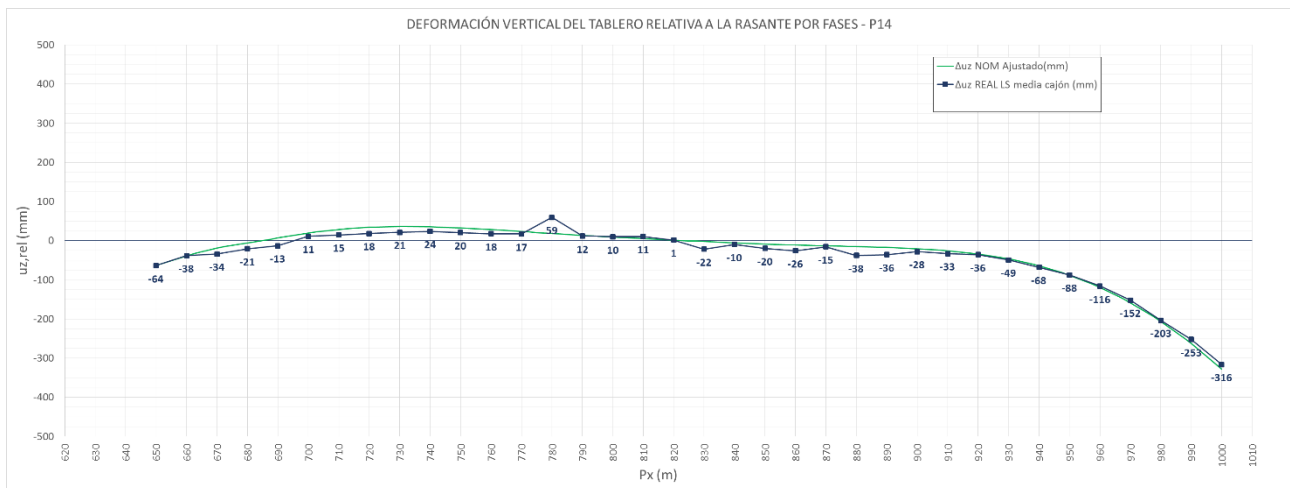


Figura 5. Comparación de las deformaciones verticales relativas del tablero medidas en obra (azul) con las obtenidas mediante el modelo de seguimiento (verde) - hormigonado de sección parcial en U de dovela DS-17

puente y modelos auxiliares desarrollados de forma específica, se simulaba la deformación relativa entre la hora real de la toma de datos y la hora de referencia (primera hora de la mañana), descontando el efecto de las acciones climáticas en la deformación relativa del puente. En caso de que la operación fuera crítica o el efecto climático fuera importante, en ocasiones fue necesario la repetición de la toma de datos a primera hora de la mañana del día siguiente. En dicho caso se desarrollaron modelos específicos para simular y descontar las diferencias que pudiera haber habido en el estado de cargas entre el final de una determinada operación y el momento de la toma de datos (movimiento de cargas...).

Por último, cabe comentar que de cada frente de dovela se tomaban un total de 7 puntos, situados en la losa superior (Figura 6). Se llevó un control estricto de los 7 ejes, lo que permitió conocer en todo momento la posición de las alas respecto al cajón, el peralte real que se estaba dejando en cada sección tanto en el cajón como en las alas, el ajuste a la rasante teórica de cada punto etc... En la dovela en ejecución también se tomaba 1 dato en la losa inferior (Figura 6), que al venir afectado por la deformabilidad del sistema carro+encofrado, permitió comprobar las contraflechas proporcionadas a los carros de avance por el suministrador (Construgomes).

La deformación vertical del tablero también contaba con una medida continua, proporcionada por sensores GPS localizados en los carros de avance, que proporcionaban la cota del frente de fase en ejecución de manera permanente. Además de la deformación vertical, estos dispositivos proporcionaban deformaciones longitudinales y transversales del tablero. Esta medición continua fue especialmente útil durante las operaciones de cierre.

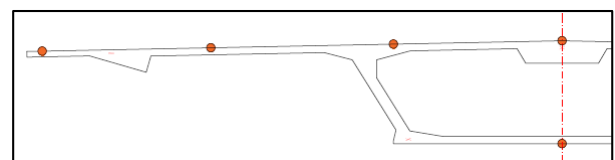


Figura 6. Toma de deformaciones verticales (simétrico respecto al eje de la sección)

Deformaciones longitudinales de los pilonos: Esta fue otra de las variables de control fundamentales. Para su modificación topográfica, se instalaron parejas de prismas en 5 alturas a lo largo de los mástiles de los pilonos. Su análisis permitía, al igual que en el caso del tablero, no sólo tener información de la desviación absoluta de los pilonos, sino disponer de la deformada relativa de los pilonos entre 2 fases, pudiendo comparar este valor con la deformación relativa de los diferentes modelos desarrollados durante el estudio de sensibilidad (o una combinación lineal de ellos, [2]), comprobando o aportando nueva información a

las conclusiones obtenidas mediante el estudio de la deformación vertical del tablero.

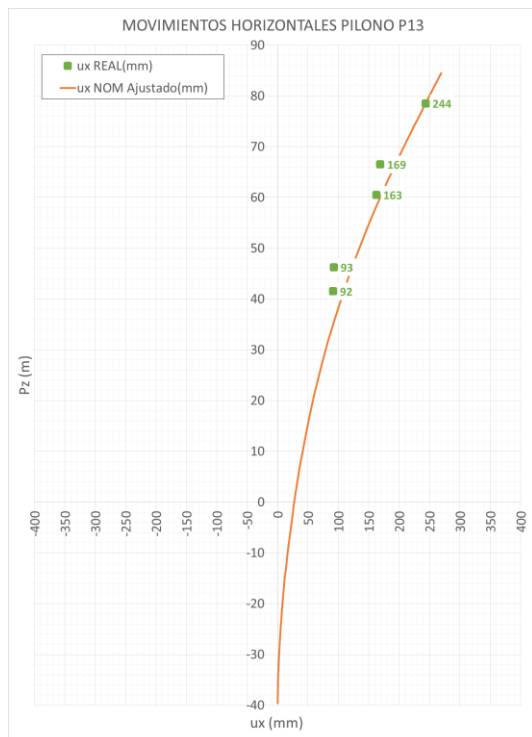


Figura 7. Comparación de las deformaciones longitudinales absolutas del pilono P13 tras el cierre contra el viaducto de acceso de la margen dch

Axil en los tirantes: La segunda variable de control en importancia tras la deformación vertical del tablero. Junto a esta variable, su estudio exhaustivo permitió evaluar el ajuste del modelo de seguimiento teórico al comportamiento real del puente de forma continua, aplicando las correcciones pertinentes en caso de detectar desviaciones.

De nuevo, esta variable contó con dos tipos de medición, una discreta, obtenida mediante pesajes realizados con gatos monotorón en determinadas fases, y otra continua, realizada mediante celdas de carga situadas en uno de los cordones de los tirantes previamente escogidos (uno de cada pareja de tirantes impares, de forma alterna; Figura 4). Los datos continuos obtenidos se procesaron (eliminando la influencia de los efectos térmicos y de las situaciones transitorias de movimiento de acopios etc...), asignando un axil a cada una de las operaciones contempladas en el modelo. Ello permitió un control continuo de la desviación absoluta del axil (Figura 8) de todos los tirantes instrumentados, así como el análisis del escalón de carga producido entre 2 fases consecutivas cualquiera considerando este escalón de carga de forma continua con la deformación vertical relativa del tablero entre esas mismas 2 fases consecutivas, podía configurarse un patrón de comportamiento del tablero fácilmente comparable con las variaciones previamente analizadas en el estudio de sensibilidad [2], identificando la causa de una determinada desviación y aplicando los ajustes pertinentes en el modelo de seguimiento.

Peso de las dovelas: Debido a la importancia de este parámetro [2], se desarrolló un protocolo de control mediante el cual el Consorcio SES registraba los siguientes datos de todos los subelementos que componían una

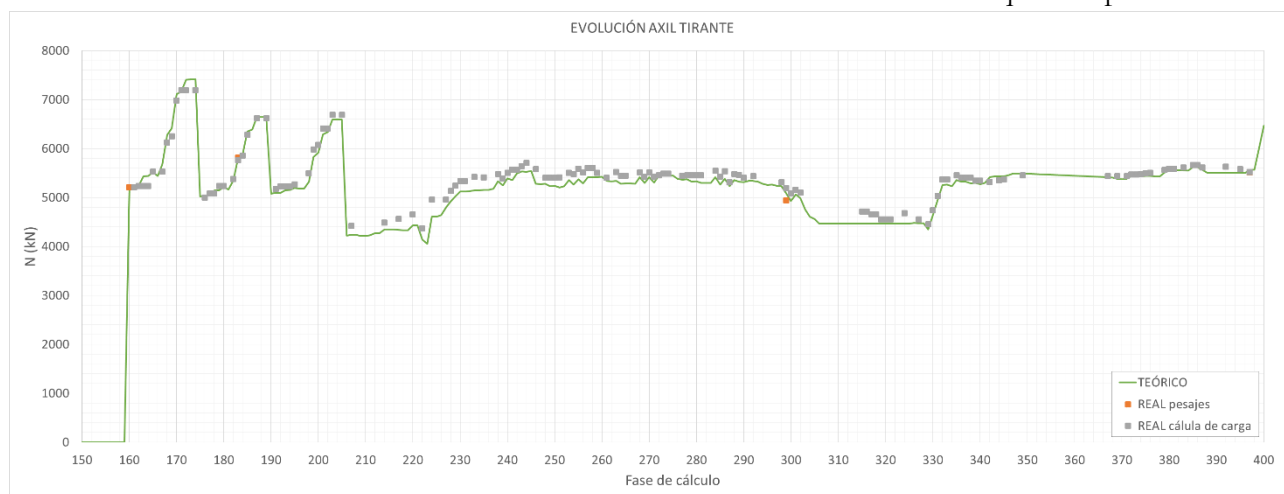


Figura 8. Evolución del axil del tirante TRO-9 sur con la construcción. Modelo de seguimiento (verde), valor de la celda de carga (gris) y pesajes realizados (naranja)

dovela: volumen de hormigón vertido, densidad del hormigón, peso de ferralla dispuesta y peso real de las deltas de anclaje. El modelo de seguimiento se actualizaba periódicamente para considerar exactamente el peso real de cada una de las dovelas.

Otras variables de control: Aunque el mayor peso en la evaluación del comportamiento del puente y la toma de decisiones las tuvieron las 4 variables anteriormente descritas, la instrumentación del puente permitió el control de otras muchas variables que fueron determinantes como variables complementarias de comprobación o para conocer algunos aspectos del comportamiento del puente menos críticos, pero pese a ello de suma importancia. A continuación se describen los más importantes:

Giros en los pilonos: controlados en 3 alturas diferentes mediante clinómetros biaxiales.

Tensiones en el tablero y en los pilonos: Los extensómetros dispuestos en las armaduras de las dovelas 1 del tablero (a +/- 20 m del eje de los pilonos) y en 3 secciones a diferentes alturas de los pilonos, permitieron evaluar la tensión en las armaduras de dichas secciones de forma continua. Su tratamiento permitió también conocer la tensión en el hormigón que rodeaba a la armadura instrumentada (fue importante además de la relación de rigideces de ambos materiales, evaluar también la redistribuciones seccionales producidas a favor de la armadura debido a los efectos reológicos), e integrando las tensiones de los diferentes extensómetros dispuestos en cada sección (10 en cada sección del tablero y 8 en cada sección del pilono) obtener los esfuerzos aplicados en cada sección. También se colocaron extensómetros en las deltas de anclaje de los tirantes 3, lo que sirvió como medida de control de la carga transmitida por los tirantes a estos elementos.

Temperatura: Se dispusieron termómetros embebidos en el hormigón, en el pilono (1 termómetro por cara en la sección situada 10 m

sobre el tablero), en el tablero (con 5 termómetros distribuidos en la losa superior y 3 en la inferior de una sección situada a 10 m del eje de los pilonos hacia suspensión), en los tirantes (con sensores en la primera pareja de tirantes de suspensión). También se evaluó la temperatura ambiente a la sombra a la altura del talero y la temperatura interior del cajón. El control térmico del tablero resultó fundamental para evaluar la incidencia de los movimientos térmicos y para el ajuste de la fuerza de tesado de los tirantes. La proyección de los movimientos térmicos del tablero durante los cierres en base a datos térmicos reales de forma anticipada, resultó clave para el diseño de las operaciones de cierre y de los elementos auxiliares necesarios.

3. Labor de ajuste del modelo de seguimiento

3.1 Introducción

La principal labor del seguimiento de la ejecución del tramo atirantado del puente consistió en la comparación de los datos de las variables de control obtenidos en obra con los resultados del modelo de seguimiento para evaluar la calidad del ajuste entre ambos. En caso de detectar desviaciones entre uno y otro, utilizando la información aportada por los modelos de estudio de diferentes parámetros principales del comportamiento del puente durante la construcción del tramo atirantado desarrollados durante el estudio de sensibilidad [2], se realizaron simulaciones orientadas a mejorar el ajuste y eliminar la desviación en la medida de lo posible. Ello permitió identificar la naturaleza de las diferencias entre el modelo de seguimiento y la realidad (que podían ser debidas a un único parámetro o, más comúnmente, debidas a la combinación de varios) y, en la mayoría de los casos cuantificarla. Hecho esto, el modelo de seguimiento se actualizaba transmitiendo los resultados al Consorcio SES (secuencia de operaciones en caso de haber variado; tablas de contraflechas de las dovelas

cajón y de las alas; fuerzas de tesado de los tirantes), encargado de implementarlos en obra.

Esta labor conducía a la redacción de partes semanales que IDEAM entregaba al Consorcio SES como resumen de todos los datos de seguimiento y control de la construcción recopilados en ese tiempo, y a informes de avance cada dovela que el Consorcio SES remitía a la Interventoría como parte del estado de avance de la construcción del tramo atirantado (Figura 9).



Figura 9. Vista aérea del puente en construcción

3.2 Principales ajustes realizados

Los principales ajustes realizados pueden resumirse en 4: modificaciones en la secuencia de operaciones de construcción; reducción de la rigidez del tablero de entorno al 20%; incremento de peso de las dovelas de en torno a +7% (lo que condujo a aumentar la fuerza de tesado de los tirantes un 3-4%); reducción de la pérdida de rigidez por fisuración del tablero (la fisuración esperada se cerró algunas fases antes de lo esperado). A continuación se analizan brevemente las características principales de cada una de ellas.

Las modificaciones de la secuencia de operaciones de construcción previamente acordadas con el Consorcio SES fueron, en general, menores. Se produjeron a petición del Consorcio SES, previo estudio de su viabilidad. Estuvieron principalmente orientadas a agilizar algunas operaciones con intención de maximizar los ritmos de producción en la medida de lo posible y, en general, tuvieron escasa relevancia desde el punto de vista global: obligaron a

modificar las contraflechas de algunas dovelas y a ajustar alguna de las fuerzas de tesado en función de las modificaciones en la posición de los medios auxiliares, pero no supusieron grandes ajustes del modelo de seguimiento.

Las diferencias en la rigidez del tablero se detectaron bastante rápido, en cuanto se hubieron dispuesto las 2 o 3 primeras dovelas con tirantes. En ese momento la longitud del tablero fue tal que permitió ver que su deformabilidad era algo mayor a la considerada en el modelo nominal (en torno al 20%), por lo que la rigidez del tablero se redujo en esta proporción en el modelo de seguimiento inmediatamente. Como se comenta en [2], una reducción de la rigidez del tablero puede deberse a un módulo de elasticidad del hormigón del tablero algo inferior al considerado, o a un ancho eficaz de las losas superior e inferior algo inferiores a las consideradas, ambas tienen un efecto equivalente sobre el tablero, por lo que son difícilmente diferenciables. En este caso, lo más probable es que se produjera una combinación de ambos factores. Por un lado, el módulo de elasticidad del hormigón se había ajustado a partir de una serie de datos empíricos [2], obteniendo un valor medio superior al determinado por la normativa de referencia (38192 MPa frente a 33941 MPa de [3], 37277 MPa [4], 35995 MPa [5]) y una dispersión importante. Es probable que el valor medio del módulo de elasticidad del hormigón del tablero se asemejara más al valor definido por [3] o por [5] (diferencia del 11 y del 6% respectivamente). Por otro lado, es probable que el ancho eficaz movilizado fuera algo menor al contabilizado. En apoyo de esta última hipótesis, al menos de forma parcial, durante los tesados de los últimos tirantes de suspensión se detectó un ligero incremento de la rigidez del tablero, probablemente debido a una mayor movilización del ancho eficaz en estas fases.

Las diferencias en los pesos de las dovelas se detectaron más o menos a la vez que las diferencias en la rigidez del tablero. Antes de modificar el modelo se desarrolló un protocolo

de comprobación en campo del peso real de la dovela, que confirmó que, según lo detectado mediante la evaluación de los resultados de las variables de control, las primeras dovelas del puente estaban teniendo ciertos incrementos de peso (aprox. 10%). Las diferencias reales obtenidas mediante el protocolo de control se introdujeron en el modelo de seguimiento, así como una proyección de desviación del peso de las siguientes dovelas. Durante este tiempo el Consorcio SES aplicó medidas de control de los espesores de tabla de las diferentes subsecciones del tablero, que consiguieron reducir la desviación de la sección respecto al valor nominal al entorno del 6-7%, valor que se mantuvo (de media) aproximadamente hasta el final de la ejecución del tramo atirantado (lo que obligó a aumentar las fuerzas de tesado en un 3-4% para contrarrestar el efecto del incremento de peso). Este fue el valor medio de desviación considerado a priori en el modelo de seguimiento, que se actualizaba con el peso real de la dovela una vez se conocía el dato.

Por último, la fisuración esperada en algunas zonas del tablero en fases muy concretas de la construcción (cara inferior de la sección en las dovelas de arranque del pylon y en las dovelas situadas en la zona de anclaje de los tirantes provisionales antiviento, producida por los momentos positivos presentes en las dovelas más cercanas al frente de avance debido a que el tesado se realizaba sin la presencia del peso de las alas, que se ejecutaban 3 dovelas por detrás) se produjo aproximadamente según lo esperado. Sin embargo, en algunas zonas su cierre se produjo algunas fases antes de lo esperado. Su detección fue sencilla debido al estudio de este parámetro en el análisis de sensibilidad [2]: equivalía a un aumento de la rigidez del tablero localizado en las zonas previamente fisuradas, que se producía algunas fases antes de lo esperado, lo que fue debidamente tenido en cuenta en el modelo de seguimiento.



Figura 10. Vista aérea tras la ejecución de la dovela de cierre

4. Conclusiones

La ejecución del tramo atirantado del Nuevo Puente Pumarejo se llevó a cabo desde la primavera-verano de 2018 hasta finales de 2019 (Fig. 10). Todo el proceso avanzó sin inconvenientes, en gran medida gracias a la colaboración y al trabajo conjunto entre el consorcio constructor (Consorcio SES) y la ingeniería que desarrolló el proyecto constructivo y el seguimiento de la ejecución (IDEAM).

Referencias

- [1] F. Millanes, M. et al. Nuevo Puente de Pumarejo en Barranquilla (Colombia). Aspectos relevantes de su proceso constructivo, VIII Congreso de ACHE, Santander, 2020
- [2] F. Millanes, et al. Nuevo Puente Pumarejo sobre el río Magdalena en Colombia. Estudio de sensibilidad multivariable del proceso constructivo del tramo atirantado, VIII Congreso de ACHE, Santander, 2020
- [3] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, AASHTO, 2012
- [4] Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, Comité Européen de Normalisation (CEN), 2004
- [5] Model Code, FIB(CEB-FIP), 2010