

ANÁLISIS Y SEGUIMIENTO DE LA EJECUCIÓN DEL NUEVO PUENTE PUMAREJO

Francisco Millanes Mato

Presidente y CEO IDEAM

francisco.millanes@ideam.es

Madrid, España

Miguel Ortega Cornejo

Director de Ingeniería de IDEAM

miguel.ortega@ideam.es

Madrid, España

Fernando Ruano Parra

Jefe de proyecto en IDEAM

fernando.ruando@ideam.es

Madrid, España

Jokin Ugarte González

Jefe de proyecto en IDEAM

jokin.ugarte@ideam.es

Madrid, España

Resumen

El Nuevo Puente Pumarejo sobre el río Magdalena en Barranquilla, Colombia, constituye uno de los puentes más relevantes construidos en Sudamérica en los últimos años. El puente principal tiene una longitud total de 2173 m sin juntas intermedias, repartidos en sendos viaductos de acceso de 618 y 755 m, y un tramo central atirantado de 800 m con un vano principal de 380 m de luz (record de Colombia). Los viaductos de acceso se resuelven mediante vanos tipo de 70 m ejecutados mediante autocimbra (primera realización en Colombia), mientras que el tramo atirantado se ejecuta por avance en voladizo simétrico desde los pilonos con dovelas de 10 m (muy por encima del rango habitual). La sección tiene 3.65 m de canto constante y ancho variable, alcanzando los 38.1 m en todo el tramo central. Ello lo convierte en el puente más ancho del mundo en su tipología (cajón de hormigón con atirantamiento central).

La complejidad del proceso constructivo y la cantidad de operaciones simultáneas a controlar propició la realización de un estudio de sensibilidad del proceso constructivo del tramo atirantado frente a variaciones en sus parámetros principales (peso, fuerzas en los tirantes...), que permitió prever las desviaciones que pudieran producirse en obra y preestablecer unos mecanismos de control y de corrección adecuados de las fuerzas de tesado de los tirantes y de las contraflechas del tablero. La aplicación del sistema de seguimiento y control previsto condujo a unos resultados excelentes, que facilitaron las labores de ejecución evitando costosas paradas en la construcción, y que permitieron conseguir la rasante y el estado de esfuerzos deseado en el puente.

Este artículo profundiza en el estudio de sensibilidad realizado, así como en el sistema de seguimiento y control desarrollado y aplicado con éxito en la ejecución del Nuevo Puente Pumarejo.

Palabras Clave: Puente atirantado, voladizos sucesivos, estudio de sensibilidad, construcción evolutiva, cajón postesado

Keywords: Cable-stayed bridge; free cantilevering; parametric study, evolutionary construction, post-tensioned box girder

Abstract

The New Pumarejo Bridge over Magdalena River in Barranquilla, Colombia, is one of the most relevant bridges built over the past few years in South America. The bridge has a total length of 2173 m without expansion joints, divided in two access viaducts, 618 and 755 m long, and a cable-stayed central stretch of 800 m with a main 380 m long span (Colombia's record). The access viaducts have 70 m long typical spans built by a movable scaffolding system (first realization in Colombia), whilst the cable-stayed stretch is built by free cantilevering from the pylons with 10 m long "in-situ" segments (well above the usual range). 3.65 m high, the cross section has a variable width that reaches 38.1 m in all the central stretch, what makes it the widest bridge in its typology (concrete box girder with central cable-stays).

The complexity of the construction process and the difficulty to control the high quantity of simultaneous operations, led to the realization of a parametric study to analyze the influence of the variation of the main parameters of the cable-stayed bridge on its structural response during construction (weight, forces on cables...). This permitted foreseen the possible deviations that could arise during construction, pre-establishing the control and correction system to vary the cable tensioning forces and the segment precamber accordingly. The implementation of the planned control system during construction led to some excellent results, facilitating the construction process (preventing from costly stops), and achieving the desired longitudinal slope and effort distribution.

This paper describes the realized parametric study, as well as the developed and successfully implemented control system in the construction of the New Pumarejo Bridge.

Introducción

El Nuevo Puente Pumarejo ha sido descrito en otros artículos y comunicaciones, por lo que en este apartado se describen de forma exclusiva las características que hacen del proceso constructivo del tramo atirantado un proceso singular y de enorme complejidad técnica, que llevó a IDEAM a plantear al Consorcio SES liderado por SACYR la conveniencia de realizar un estudio de sensibilidad del puente a variaciones en el valor nominal de sus parámetros principales.

Breve descripción tramo atirantado

El tramo atirantado tiene 800 m distribuidos en 5 vanos de 100+140+380+140+100 m y un ancho de 38.1 m. El tablero está compuesto por un cajón de hormigón pretensado de 3.65 m de canto (L/104.1), de 16 m de ancho superior y 12 m de ancho inferior, y unos voladizos de 11.05 m soportados por jabalcones prefabricados dispuestos cada 5 m (Figura 1). El sistema de atirantamiento en semi-abanico se compone de 17 parejas de tirantes dispuestas en 2 planos verticales paralelos separados 1.45 m entre sí, que se anclan en el eje del tablero cada 10 m en longitudinal. El pilono es central. Tiene cerca de 35 m de altura desde la cimentación hasta el tablero, que se apoya en él en 2 apoyos verticales situados en el eje del pilono y separados 9.20 m en transversal, y en 4 topes longitudinales y transversales (2 por lado). Del pilono bajo tablero nace un mástil de casi 90 m, que atraviesa el tablero en su eje y asciende 85 m por encima de él (Figura 2).

Breve descripción del proceso constructivo del tramo atirantado

El tablero del tramo atirantado se ejecuta mediante 4 carros de avance en voladizo para construir por avance en voladizos simétricos 185/195 m a cada lado del eje de los pilonos P13 y P14. En los lados de retenida, el proceso de avance en voladizo no sólo debía llegar a los viaductos de acceso, sino entroncar y superar la dovela 0 de las pilas de retenida, situadas a 140 m del eje de los pilonos. Hacia el lado de suspensión, el avance en voladizo finalizaba con la ejecución de la dovela de cierre de 10 m mediante el carro del lado del pilono P13.

El importante ancho de la sección y la relativa elevada separación entre tirantes, combinadas con las exigencias de plazo acabaron por definir el avance en voladizo únicamente de la sección cajón mediante la utilización de dovelas “in-situ” de 10 m de longitud, completando la sección 3 dovelas por detrás mediante otros 4 carros de alas que disponían los jabalcones prefabricados y ejecutaban las alas de la sección. Las dovelas cajón de 10 m permitían salvar de una sola vez la distancia entre tirantes, lo que permitió realizar la construcción en sección armada, utilizando acero activo sólo como pretensado de continuidad en centro de vano del vano principal y en la zona de unión con los viaductos de acceso.

Como contrapartida, tanto la longitud como el peso de las dovelas se situaba fuera del rango habitual en este tipo de

Figura 1. Sección transversal del tablero por costilla sin tirante (izquierda) y por costilla con tirante (derecha)

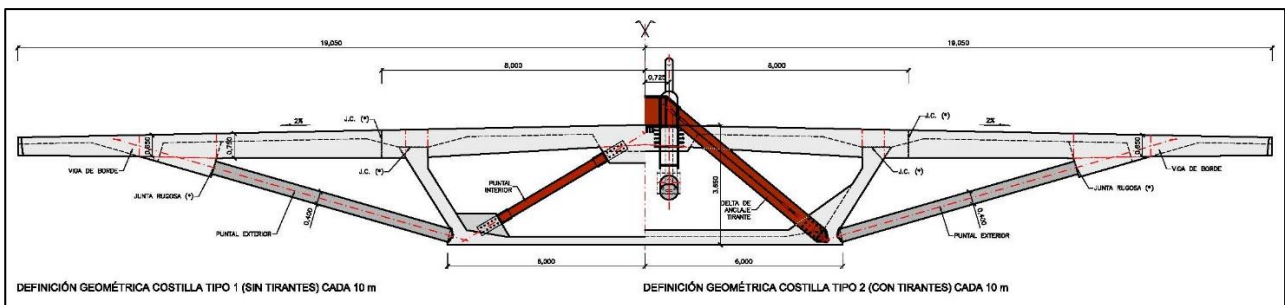
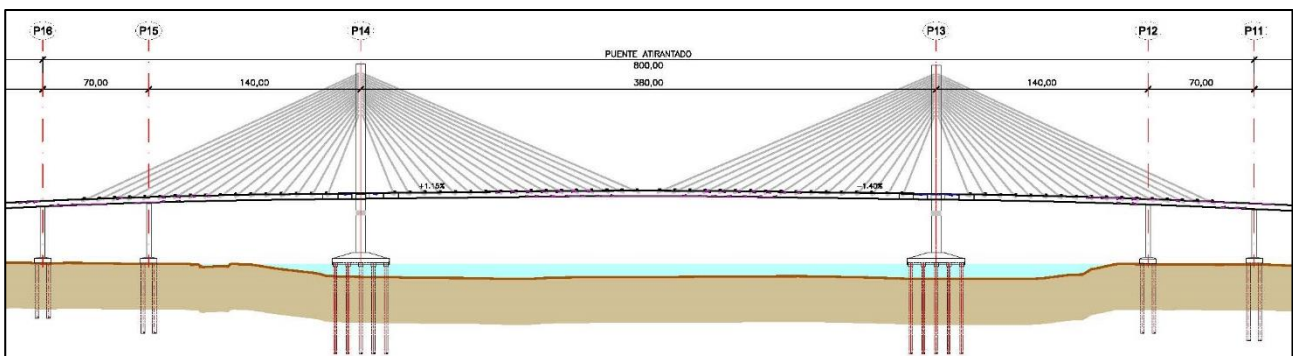
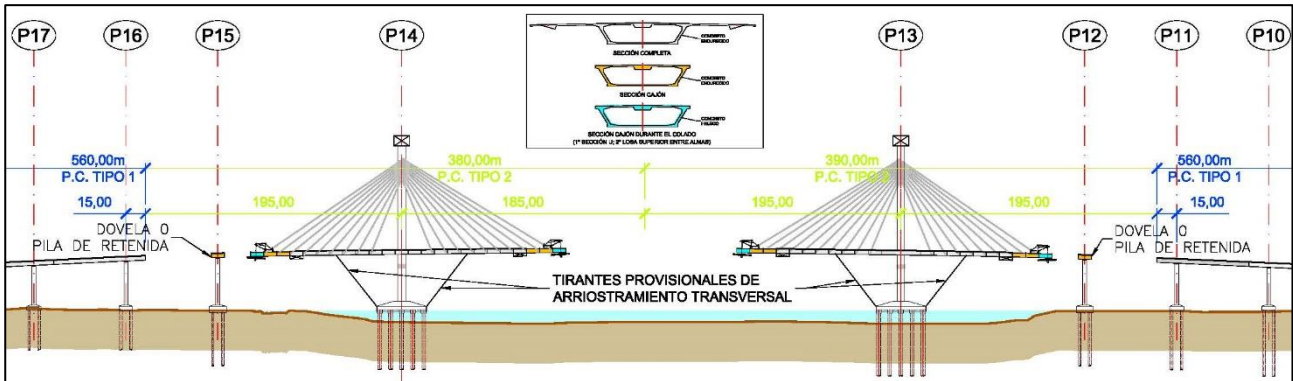


Figura 2. Alzado del tramo atirantado del Nuevo Puente Pumarejo sobre el río Magdalena



Millanes et al: Análisis y seguimiento de la ejecución del Nuevo Puente Pumarejo

Figura 3. Alzado del tramo atirantado del Nuevo Puente Pumarejo sobre el río Magdalena durante su construcción



estructuras: las dovelas más pesadas llegaban a las 535 t, mientras que la dovela tipo tenía un peso de 390-400 t (Figura 3).

Importancia del estudio de sensibilidad

Por lo tanto, a los ya de por sí complejos procesos de avance en voladizo de puentes atirantados de hormigón, se le añadían 3 retos: peso y longitud de la sección, fuera del rango habitual en este tipo de construcciones, que introducía en la sección esfuerzos muy por encima de los de servicio; construcción evolutiva

de la sección, que, además de introducir una incertidumbre adicional en cuanto al comportamiento de los fenómenos reológicos en el tablero y a la redistribución de los esfuerzos en el tiempo a nivel seccional, variaba la altura del centro de gravedad de la sección a medida que avanzaba la obra; ausencia de pretensado durante la construcción, que obligaba a un control estricto de la fisuración durante la construcción, a tener en cuenta las pérdidas de rigidez del tablero en caso de que ésta se diera, y a realizar un diseño del proceso constructivo que permitiera su cierre a medida que avanzara la construcción del tablero.

Estos retos, unidos a la importancia de un exhaustivo control de

Figura 4. Vista de los carros de avance por voladizos sucesivos y los carros de alas 3 dovelas por detrás



deformaciones durante la construcción que asegurara una rasante adecuada, motivaron la conveniencia de realizar un estudio de sensibilidad del puente durante su construcción, que analizara la variación de las diferentes variables (deformaciones y esfuerzos), frente a desviaciones predeterminadas en los principales parámetros del puente.

Definición del estudio de sensibilidad

Definición de las variables principales de estudio

Las variables principales que gobernaban el comportamiento del Nuevo Puente Pumarejo durante la ejecución del tramo atirantado se definieron a priori en base a literatura específica y experiencia previa en procesos constructivos similares.

El valor nominal de todas las variables descritas a continuación se evaluó según la normativa de referencia del proyecto, AASHTO LRFD 2012, complementándola en aquellos aspectos específicos mediante la bibliografía especializada necesaria.

Módulo de deformación del hormigón: Es uno de los parámetros más variables de las características nominales del hormigón, pudiendo verse afectado notablemente por la naturaleza del árido empleado en la mezcla, las proporciones de los diferentes componentes empleados... Se consideró una variabilidad de +/-20% respecto a su valor nominal, independiente en tablero (modelos 1.1 y 1.2) y pilonos (modelos 1.3 y 1.4).

Peso del tablero: Se trata de uno de los parámetros más sensibles en la ejecución del tramo atirantado. La variación respecto a su valor nominal puede deberse a variaciones en la densidad del hormigón armado (mala estimación de la cuantía de acero, proporción diferente a la habitual de los diferentes componentes de la mezcla...), o a variaciones en el volumen de hormigón vertido respecto al teórico (holguras en los encofrados, sobreespesores debidos a la fluidez del hormigón).

Millanes et al: Análisis y seguimiento de la ejecución del Nuevo Punte Pumarejo

Se consideró una variabilidad de +/-10% respecto a su valor nominal (modelos 2.1 y 2.2).

Fuerzas de tesado en los tirantes: Junto con el peso del tablero es uno de los parámetros más sensibles en la ejecución del tramo atirantado. La variación respecto a su valor nominal puede producirse debido a errores de medida, de calibración de los gatos etc... Se consideró una variabilidad de +/-5% respecto a su valor teórico definido en planos (modelos 3.1 y 3.2).

Efectos reológicos: Aunque su influencia en el comportamiento resistente del puente no es demasiado elevada, sí lo es en el comportamiento deformacional. Asimismo, la incertidumbre asociada a su caracterización es una de las más elevadas dentro de los parámetros aquí descritos. Su variabilidad se consideró de dos formas diferentes, mediante la variación de los parámetros reológicos en un +/-35% respecto al valor nominal definido mediante el Código Modelo 2010 (modelos 7.1 y 7.2), y mediante la variación de la duración del ciclo tipo de ejecución de una dovela, 15 días, al doble de su periodo teórico (modelo 7.3).

Fisuración del hormigón: Esperada en alguna de las fases en alguna zona del tablero debido a la construcción en sección armada (antes del cierre de la estructura se esperaba que toda la fisuración se encontrara cerrada, como así fue), depende de otras variables con un alto grado de incertidumbre como la resistencia del hormigón, y otros parámetros y fenómenos de difícil cuantificación (tension-stiffening...), por lo que es un fenómeno con un alto grado de incertidumbre. Se estudió el comportamiento del puente ante la ausencia total de fisuración en todas las fases de construcción (modelo 5).

Ancho eficaz de las losas superior e inferior: Dada la complejidad del fenómeno y las simplificaciones que se asumen en su cuantificación se trata de una variable con una alta incertidumbre. En un proceso constructivo de estas características debe añadirse la incertidumbre asociada a la evolución constante del nivel de esfuerzos en el tablero, que hace que el ancho eficaz de cada sección pueda variar a lo largo de las diferentes fases de construcción del tablero. Se estudió el comportamiento del puente en el caso de que el ancho eficaz del tablero fuera superior al considerado, tendente a la totalidad de la sección real (modelo 6).

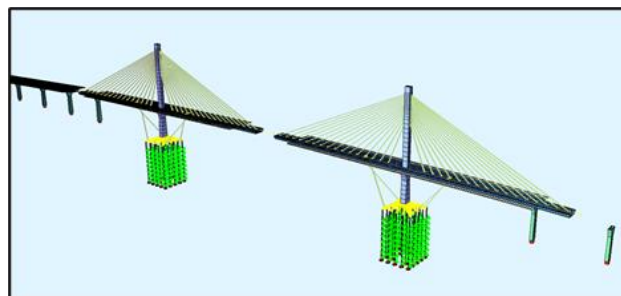
La variabilidad considerada fue el fruto de un análisis estadístico riguroso que se basó en definir los percentiles del 5 y del 95% de cada uno de los parámetros analizados, en base a funciones de probabilidad definidas en la literatura especializada. Una descripción más exhaustiva del proceso llevado a cabo puede consultarse en la bibliografía de este artículo.

Filosofía de seguimiento y control de la construcción del tramo atirantado

Modelo nominal y datos de partida para la construcción

El modelo de seguimiento de la construcción del tramo atirantado del Nuevo Punte Pumarejo sobre el río Magdalena partió del modelo nominal realizado para el estudio de sensibilidad, 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 5). La definición de las contraflechas y de las fuerzas de tesado se explica en mayor detalle en otros artículos escritos por los autores, y que pueden consultarse en la bibliografía de este artículo

Figura 5. Modelo de seguimiento. Fase anterior al colado de la sección parcial en U de la dovela DS-17



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 7), 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 7. Vista lateral del puente durante su construcción)



Deformación vertical del tablero: Ha sido la variable de control más importante durante la construcción del tramo atirantado.

Millanes et al: Análisis y seguimiento de la ejecución del Nuevo Puente Pumarejo

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) 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 8).

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 puente (figura 9) 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

Figura 8. 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

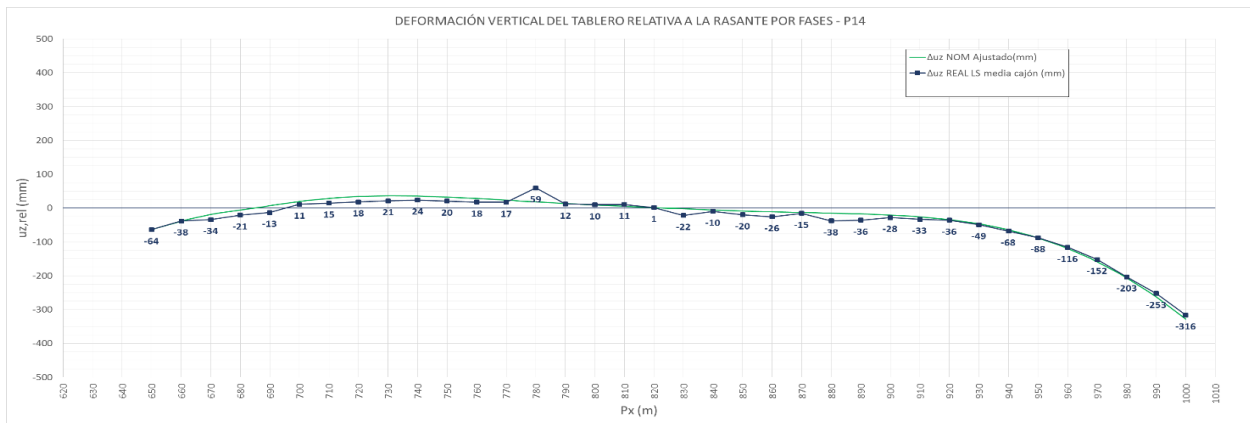
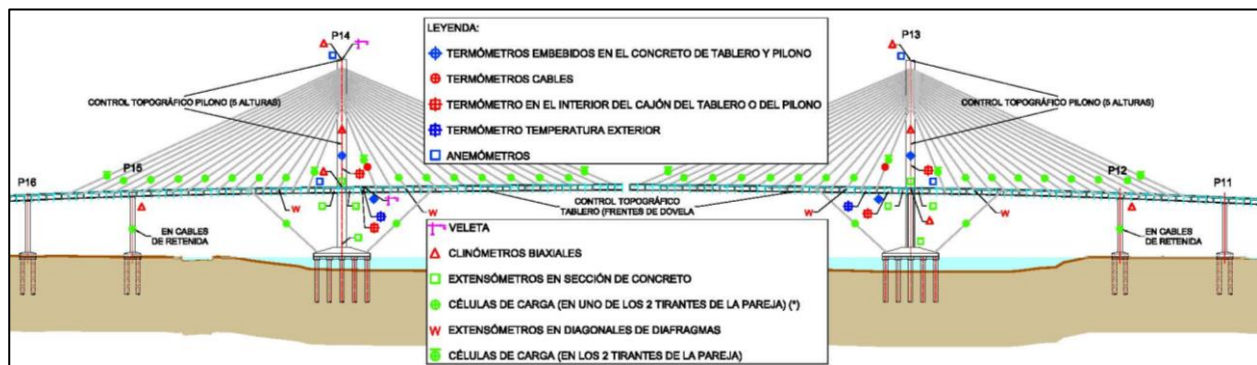


Figura 9. Esquema de disposición de instrumentación y toma de datos en la construcción del tramo atirantado)



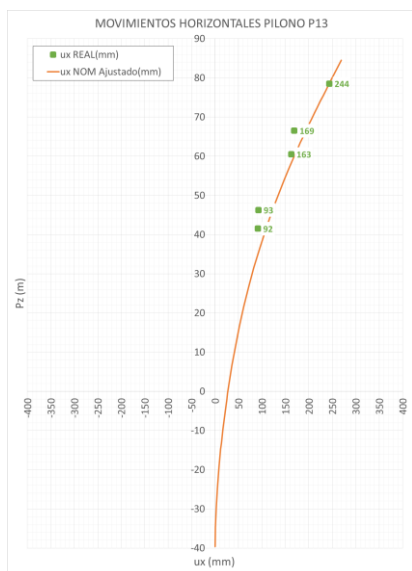
Millanes et al: Análisis y seguimiento de la ejecución del Nuevo Puente Pumarejo

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...).

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. Esta medición continua fue especialmente útil durante las operaciones de cierre.

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 (figura 10).

Figura 10. Comparación de las deformaciones longitudinales absolutas del pilono P13 tras el cierre contra el viaducto de acceso de la margen dch



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), comprobando o aportando nueva información a las conclusiones obtenidas mediante el estudio de la deformación vertical del tablero.

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 9). 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 11) 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, identificando la causa de una determinada desviación y aplicando los ajustes pertinentes en el modelo de seguimiento.

Figura 11. 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)



Peso de las dovelas: Debido a la importancia de este parámetro, se desarrolló un protocolo de control mediante el cual el Consorcio SES registraba los siguientes datos de todos los subelementos que componían una 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 (figura 9) 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. Los más importantes de entre éstos fueron el giro en los pilonos y la temperatura en el tablero y en los pilonos.

Labor de ajuste del modelo de seguimiento

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, 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 12).

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.

Figura 12. Vista aérea del puente en construcción



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 otros artículos escritos por los autores y que pueden consultarse en la bibliografía de este artículo, 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, obteniendo un valor medio superior al determinado por la normativa de referencia (38192 MPa frente a 33941 MPa definido por la AASHTO LRFD 2012, 37277 MPa definido por el

Eurocódigo 2, 35995 MPa definido por el Modelo Code 2010) 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 la AASHTO o por el Modelo Code (diferencia del 11 y del 6% respectivamente). Por otro lado, es probable que el ancho eficaz movilizado fuera algo menor al contabilizado.

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).

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 pilono 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: 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.

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. 13). 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). La realización previa de un Estudio de Sensibilidad del comportamiento del puente a variaciones en sus parámetros fundamentales fue clave para tener un control

absoluto del comportamiento real del puente durante las fases de construcción, permitiendo la continua adaptación del modelo a la situación real del puente. Todo ello derivó en un resultado excelente, inaugurando el puente en diciembre de 2019 ante la presencia de las más altas autoridades del país.

Figura 13. Vista aérea tras la ejecución de la dovela de cierre



Referencias

- AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, AASHTO, 2012
- Cable Stays. Recommendations of French interministerial commission on prestressing, Service d'études techniques des routes et autoroutes (SETRA), 2002
- Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, Comité Européen de Normalisation (CEN), 2004
- F. Millanes, et al. Nuevo Puente de Pumarejo en Barranquilla (Colombia). Aspectos relevantes de su proceso constructivo, VIII Congreso de ACHE, Santander, 2020
- 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
- F. Millanes, et al. Nuevo Puente Pumarejo sobre el río Magdalena en Colombia. Seguimiento y control del proceso constructivo del tramo atirantado, VIII Congreso de ACHE, Santander, 2020
- I. Duque, A. Aparicio, Influencia de los errores de ejecución en el estado tensional de los puentes atirantados construidos por voladizos sucesivos.
- L. Carrillo, Análisis teórico de la variación aleatoria de los esfuerzos de montaje de los cables en los puentes atirantados, Tesis Doctoral UPM, Madrid, 2015
- Manual de tirantes, Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE), 2007
- Model Code, FIB(CEB-FIP), 2010
- Probabilistic Model Code, Joint Committee on Structural Safety (JCSS), 2000
- Recommendations for stay cable, testing and installation 5th edition, Post-Tensioning Institute (PTI), 2007