

Nuevo Puente Pumarejo sobre el río Magdalena en Colombia. Estudio de sensibilidad multivariable del proceso constructivo del tramo atirantado

New Pumarejo Bridge over Magdalena river in Colombia. Multivariable sensitivity analysis of the cable stayed stretch's erection process

Francisco Millanes Mato^a, Miguel Ortega Cornejo^b, Jokin Ugarte González^c, Alberto Suz Maroto^d

^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

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 (dovelas fuera del rango de peso y longitud habitual; construcción evolutiva) 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.

ABSTRACT

The New Pumarejo Bridge 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 process (segments above the usual length and weight ranges; evolutionary construction) motivated the study of the bridge's sensitivity to variations on its main parameters during the erection phases.

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 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.

1.1 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 pylon 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 pylon y separados 9.20 m en transversal, y en 4 topes longitudinales y transversales (2 por lado). Del pylon 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).

1.2 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,

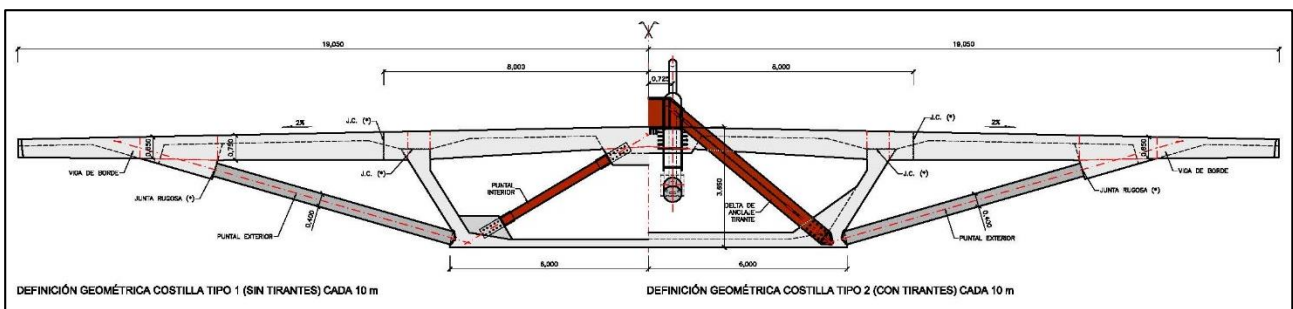


Figura 1. Sección transversal del tablero por costilla sin tirante (izquierda) y por costilla con tirante (derecha)

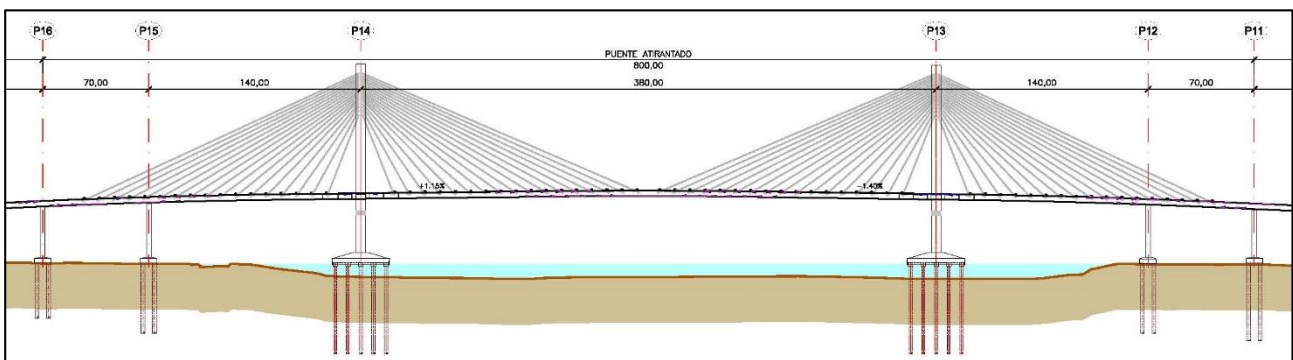


Figura 2. Alzado del tramo atirantado del Nuevo Puente Pumarejo sobre el río Magdalena

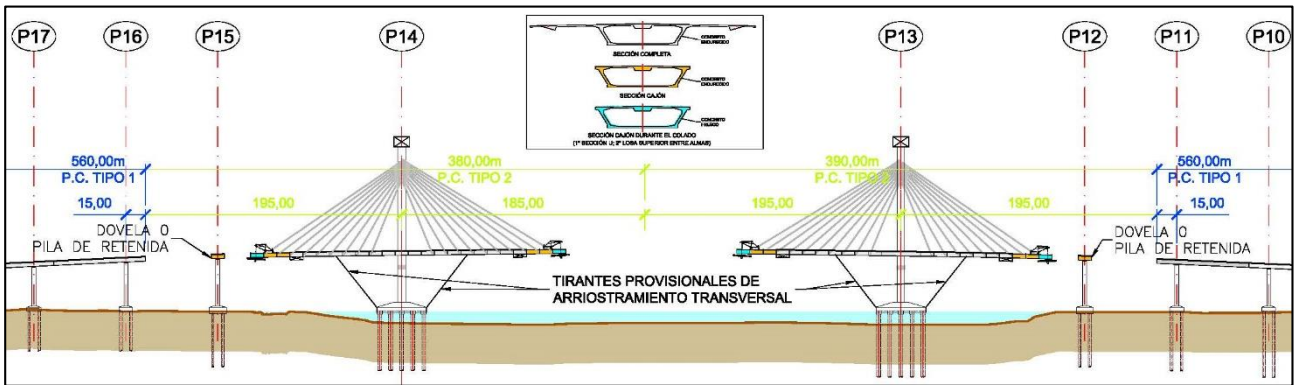


Figura 3. Alzado del tramo atirantado del Nuevo Puente Pumarejo sobre el río Magdalena durante su construcción

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

1.3 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 esta 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 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.

2 Definición del estudio de sensibilidad

2.1 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 [2], [3] y experiencia previa en procesos constructivos similares.



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

El valor nominal de todas las variables descritas a continuación se evaluó según la normativa de referencia del proyecto [4], complementándola en aquellos aspectos específicos mediante la bibliografía especializada necesario [5]....

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...

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, sobreepesores debidos a la fluidez del hormigón).

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...

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.

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.

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.

2.2 Definición del rango de variación de las variables de estudio

2.2.1. Análisis estadístico del rango de variación probable de cada variable

Algunas de las variables descritas en el apartado anterior tienen una difícil evaluación estadística de su variabilidad (ancho eficaz de la sección, fuerzas de tesado en los tirantes...). Su variabilidad depende de las tolerancias habituales de los medios de puesta en obra (gatos de tesado), o interesa conocer la influencia de un error grosero en su cuantificación (qué sucede si el ancho eficaz es igual al bruto). Sin embargo, otras variables permiten un análisis estadístico más preciso que logra acotar su rango de variación mediante un análisis razonado.

Peso propio: Se llevó a cabo un análisis estadístico basado en el modelo probabilístico propuesto por el “*Joint Commitee on Structural Safety*” [6]. Este modelo analiza tanto la variabilidad de la densidad del hormigón como la del volumen vertido debido a holguras del encofrado. El estudio de la densidad se basa en analizarla como una variable independiente con una distribución normal, con una desviación típica del 4%. El valor nominal se definió en 25.3 kN/m³ (basado en una densidad del hormigón en masa de 23.15 kN/m³ [4] y una cuantía media

aproximada de acero de refuerzo en el tablero de 315 kg/m^3 ¹.

El volumen de la sección también se trata como una variable normal. El valor medio viene dado por el volumen real de la sección en estudio ($19.23 \text{ m}^3/\text{m}$ para la sección tipo del tramo atirantado, espesor medio para todas las tablas de 0.268 m , “e”) y la desviación típica se obtiene a partir de otra variable normal relacionada con “e”, que da un valor característico superior de 10.07 mm (3.75% de “e”) y por lo tanto de $0.72 \text{ m}^3/\text{m}$ para el volumen de la sección. Combinando las 2 variables independientes anteriores sabiendo que el peso de la sección es el producto de las dos, el peso de la sección puede definirse como una tercera variable normal con un valor medio de 486.52 kN/m y una desviación típica de 26.66 kN/m . De dicha forma se obtuvieron los pesos de la sección con una fiabilidad superior al 95% de ser y de no ser superadas (límites característicos superiores e inferiores del peso de la sección): 442.53 kN/m y 530.51 kN/m respectivamente (variabilidad de $\pm 9\%$ respecto al valor nominal).

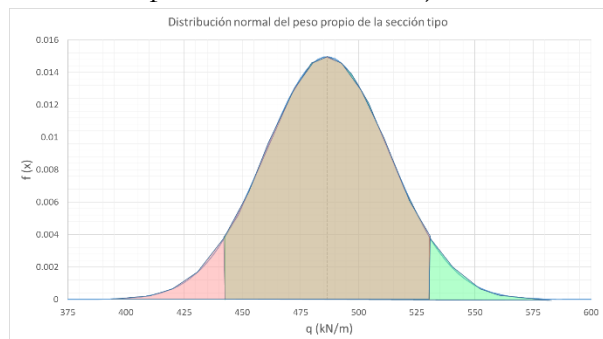


Figura 5. Func. de dens. del peso de la sección tipo del tramo atirantado (modelo JCSS)

Módulo de elasticidad del hormigón:

Esta variable se estudió desde dos aproximaciones diferentes. Por un lado se analizó mediante el modelo probabilístico propuesto por [6], que en este caso propone un acercamiento más complejo. Sin entrar en el detalle del proceso, inicialmente fue necesario el estudio estadístico de la resistencia a compresión

simple del hormigón (valor nominal: 50 MPa), dada por una serie de variables con distribución log-normal ($f_{cij} = f_{co}^{\lambda} \cdot Y_{1ij}$). Tomando los valores característicos superior e inferior de las variables involucradas se definió una nueva variable agregada, que permitió obtener los valores característicos de la resistencia a compresión simple del hormigón (44.24 MPa y 56.24 MPa , variabilidad de $\pm 12\%$). A partir de dichos valores característicos, se definieron 2 distribuciones log-normales para el módulo de elasticidad secante del hormigón ($E_{cij} = 9780 \cdot f_{cij}^{1/3} \cdot Y_{3ij}$) con las que se definió una nueva variable agregada, de la que se obtuvieron los valores característicos del módulo de elasticidad secante del hormigón: 27100 MPa y 46650 MPa . El valor medio de la función definida era 36029 MPa ($Y_{3ij}=1.00$), obteniendo una variabilidad aproximada de $\pm 30\%$ (Figura 6).

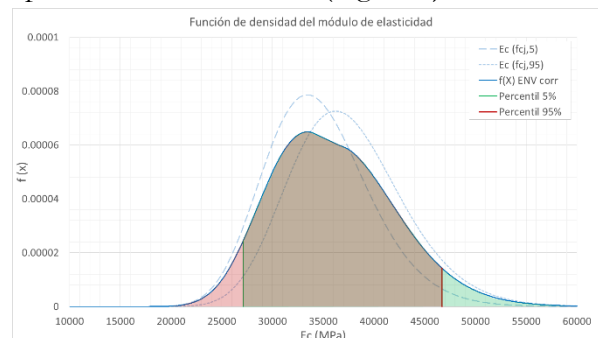


Figura 6. Función de dens. de E_c (modelo JCSS)

Por otro lado, se disponía de 29 muestras del hormigón del tablero de los viaductos de acceso que, a priori, debía ser idéntico al del tablero del tramo atirantado. Los datos se ajustaron a la función de distribución de una variable normal (Figura 7).

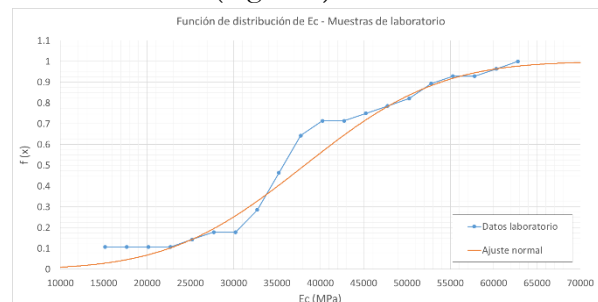


Figura 7. Func. de distrib. de E_c (datos de campo)

¹ Para el análisis del proceso constructivo, a cada dovela y a cada subelemento de la misma se le asignó

densidad equivalente específica en función de su cuantía de armado.

La distribución obtenida, daba un valor medio de 38192 MPa y una desviación típica de 12231.64 MPa, lo que proporcionaba unos valores característicos de 18071.23 MPa y 58313.31 MPa (variabilidad de +/- 50%). Como puede observarse, el módulo de elasticidad de las probetas ensayadas tenía una dispersión altísima, claramente superior a la analizada mediante el marco del JCSS.

Para acotar dicha dispersión y reducir el rango de variación de la variable, se tuvo en cuenta que el hormigón se iba a disponer en puestas sucesivas cuya repetición reduciría la dispersión. En estos casos la desviación típica media puede obtenerse como $\sigma_{media} = \sigma/\sqrt{n}$, siendo “n” el número de puestas. Se consideró que un valor de “n” medio de 9 daría valores razonables para el comportamiento en deformaciones del conjunto del tablero (17 dovelas), obteniendo una nueva distribución con la misma media y sendos valores característicos sup. e inf. de 31485 MPa y 44900 MPa, reduciendo la variabilidad al +/- 20% (Figura 8).

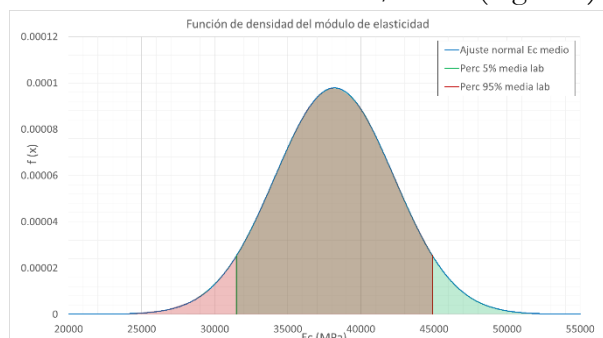


Figura 8. Func. de dens. de Ec (datos de campo corregidos para tener en cuenta el n° de puestas)

Coefficientes de fluencia y retracción:

Los parámetros reológicos se analizaron a partir del modelo propuesto por el *Código Modelo 2010* [5], que ajusta los coeficientes de fluencia y retracción a sendas variables normales. Para las condiciones de humedad, velocidad de adquisición de resistencia del cemento y geometría del tablero, el valor medio del coeficiente de fluencia fue de 1.54 y su desviación típica 0.317. Para la retracción, su valor medio fue de $3.66 \cdot 10^{-4}$, y su desviación típica de $0.539 \cdot 10^{-4}$. Ello aportaba valores

característicos inferiores y superiores de 1.02 y 2.06 para el coeficiente de fluencia (variabilidad de +/-35), y de $2.77 \cdot 10^{-4}$ y $4.54 \cdot 10^{-4}$ para la retracción (variabilidad de +/-25). En el caso del coeficiente de fluencia, resulta interesante observar que, de las normativas internacionales más importantes ([4,5,8]), la *AASHTO LRFD 2012* aporta valores claramente más bajos que el resto, cercanos al percentil del 5% del modelo propuesto por el *Código Modelo 2010* (Figura 9).

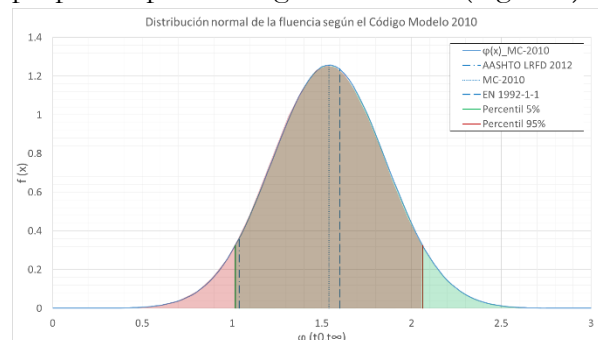


Figura 9. Func. de dens. del coef. de fluencia y valores nom. definidos en [4,5,8] (modelo MC2010)

2.2.2. Análisis del rango de variación en las variables no analizadas estadísticamente

En cuanto al resto de variables analizadas en el estudio de sensibilidad, de la mayoría sólo se buscaba acotar la importancia de un error de importancia en su cuantificación. Así, el estudio de la variabilidad del ancho eficaz de las secciones del tablero y la pérdida de rigidez por fisuración se limitó a variaciones extremas en el sentido más probable: ancho eficaz igual a la totalidad de la sección; ausencia completa de fisuración en cualquier fase del proceso constructivo.

En cuanto a la variación de la fuerza de tesado de los tirantes respecto a su valor nominal, el documento [9] habla de una precisión habitual de los gatos del entorno del 2% de la fuerza de tesado. El resto de referencias bibliográficas ([10,11]), hablan de desviaciones por cordón y no por tirante.

2.2.3. Definición del rango de variación

En base a lo comentado en los puntos anteriores, a continuación se describen las variaciones consideradas para cada parámetro analizado:

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

Fuerzas de tesado en los tirantes: Se consideró una variabilidad de +/-5% respecto a su valor teórico definido en planos (modelos 3.1 y 3.2).

Influencia de la pérdida de rigidez por fisuración: Se estudió el comportamiento del puente ante la ausencia total de fisuración en todas las fases de construcción (modelo 5).

Influencia del ancho eficaz considerado para el 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).

Efectos reológicos: 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).

3 Resultados del estudio de sensibilidad

El análisis del comportamiento del puente ante la variación de sus parámetros principales, permitió conocer la sensibilidad de la estructura ante diferentes escenarios probables y entender mejor el funcionamiento del puente durante su construcción:

Se observó que las diferentes **variaciones de la rigidez del tablero** (variación del módulo de elasticidad del hormigón, del ancho eficaz del tablero y de la pérdida de rigidez por fisuración del tablero) provocaban

consecuencias similares. Sólo en el último caso su distribución no uniforme a lo largo del tablero (la fisuración sólo afectaba a zonas muy concretas en fases muy concretas) hacía que el comportamiento del tablero ante una ausencia total de fisuración no fuera completamente extrapolable a un incremento general del módulo de elasticidad o del ancho eficaz siendo, eso sí, muy similar a un aumento local en la zona afectada. Las variaciones de rigidez del tablero afectaban principalmente al comportamiento en deformaciones y muy poco al comportamiento en esfuerzos. Un aumento de la rigidez del tablero provocaba que ante la ausencia de correcciones éste quedase más bajo de lo previsto, mientras que una reducción de la rigidez provocaba que quedase más alto. Ello se debía a que la fuerza en los tirantes se introducía en una configuración más flexible que el peso propio, lo que hacía que las deformaciones acumuladas fueran ascendentes (la fuerza en los tirantes se introducía de una vez con las 3 dovelas de punta en sección cajón y, aunque 2/3 del peso de la sección se introdujeran en la misma configuración, 1/3 del peso de la sección, las alas, se introducía 3 fases después con la sección completa y varias dovelas más ejecutadas). Las consecuencias de una variación de rigidez en el tablero por cualquiera de los motivos anteriormente expuestos eran por tanto, prácticamente nulas en los pilonos y fácilmente identificables en el tablero (apreciables mediante un adecuado control de deformaciones). Dado que no afectaban a esfuerzos, una vez detectadas podían corregirse exclusivamente mediante el ajuste de las contraflechas del tablero.

Las **variaciones de rigidez de los pilonos** (variación del módulo de elasticidad del hormigón), afectaban muy poco al comportamiento del tablero. Sí tenían una cierta influencia en el comportamiento en esfuerzos de los pilonos, dado que las deformaciones reológicas impuestas producidas tras el cierre del tablero provocaban esfuerzos proporcionales a la rigidez de los pilonos. Por lo tanto, cuanto más

rígidos fueran los pilonos, más esfuerzos soportaban. Se observó que el aumento de esfuerzos provocado por el incremento máximo esperado del módulo de elasticidad del hormigón de los pilonos no provocaba fisuración en la base del pilono. La variación de la rigidez de los pilonos tenía cierta influencia también en su deformación longitudinal, si bien cuantitativamente la variación no resultaba significativa. Por lo tanto, la construcción del puente era más o menos independiente de esta variable, y su variación no afectaba ni a las contraflechas del tablero ni a las fuerzas de tesado (teniendo una afección controlada a los esfuerzos de la base de los pilonos).

La influencia de la **variación de los efectos reológicos** durante la construcción era pequeña: a partir de una cierta distancia del frente de avance, los esfuerzos en el tablero eran muy reducidos y la construcción simétrica conseguía que también lo fueran en los pilonos. Sin embargo, una vez cerrado el tablero la vinculación longitudinal del tablero en los pilonos hacía que una variación de los parámetros reológicos afectara a todo el conjunto: un aumento de la reología aumentaba la deformación impuesta hacia la suspensión de los pilonos a la altura del tablero y provocaba un descenso del centro de vano del vano principal. Los esfuerzos de compatibilidad provocaban un aumento de los momentos longitudinales en la base de los pilonos (tendientes a traccionar la cara de retenida) y de los momentos flectores positivos en el centro de vano del vano principal. El proceso constructivo contemplaba 2 fases de retesado de los tirantes: una al final de la construcción y otra al cabo de una serie de años de la apertura al tráfico. La influencia de la reología en el tablero podía regularse mediante el ajuste conveniente de estos 2 retesados. No podía actuarse sobre su influencia en la base de los pilonos, sin embargo no llegaba a fisurar la base de los pilonos en ninguno de los escenarios analizados.

Las variaciones de peso del tablero y de la fuerza de tesado de los tirantes eran los dos parámetros fundamentales tanto desde el punto de vista deformacional como desde el punto de vista resistente del puente. Durante la construcción, las variaciones críticas resultaban la reducción del peso del tablero y el aumento de la fuerza de tesado. Su influencia provocaba el aumento de las tensiones en la cara inferior del tablero, cara más solicitada debido a la predominancia de los momentos flectores positivos en las dovelas más cercanas al frente de avance (la instalación y tesado de los tirantes se producía faltando el peso de las alas de la sección). Por lo tanto, la variación de cualquiera de estas 2 variables en el sentido indicado sobre todo, pero también en el contrario, debían ser debidamente identificadas y corregidas. El efecto de la variación de cualquiera de las 2 variables en deformaciones era muy importante, por lo que resultaban desviaciones fácilmente identificables mediante un adecuado control de las deformaciones del tablero (también se disponía de otra serie de variables de control, tensiones en el tablero, esfuerzos en la base de los pilonos..., ver [7]). Una vez identificada una determinada desviación, su corrección difería si se trataba de una variación de la fuerza de tesado o del peso de la dovela. En el primer caso debían tomarse medidas tendentes a asegurar un correcto control de la fuerza de tesado de los gatos, más allá de los controles habituales. En el segundo caso, además de tomar medidas para reducir la desviación de peso en dovelas futuras, si la desviación resultaba persistente debían modificarse tanto las contraflechas del tablero como las fuerzas de tesado de los tirantes para conseguir la distribución de esfuerzos y la rasante deseada con la nueva configuración de peso. Debía tenerse en cuenta que si la desviación de peso resultaba al alza, las fuerzas de cargas permanentes definitivas en los tirantes aumentarían, lo que podía provocar la necesidad de aumentar el número de cordones por tirante una vez se concluyera la construcción del tablero

(no había problemas de tensiones en los tirantes durante la construcción en los escenarios planteados).

En la Tabla 1 se aprecia la sensibilidad del puente a las variaciones planteadas. En ella a la variable que más afecta a un determinado parámetro del puente se le asigna un valor de 100, asignando valores proporcionales al resto de variables.

Tabla 1. Resumen cualitativo del análisis (azul: variación mínima; rojo: variación máxima)

	uz cv vano principal (mm)	ux punta mástil (mm)	$\Delta\sigma_{t\text{máx}}/f_p u$	$\Delta\sigma_{\text{tab máx}}$	$\Delta\sigma_{\text{pil máx}}$
ES 1.1 (+20% Ectab)	29	-28	-8	23	-44
ES 1.2 (-20% Ectab)	-43	39	11	-28	63
ES 1.3 (+20% Ecpil)	2	70	-1	1	97
ES 1.4 (-20% Ecpil)	-2	-100	1	-2	-100
ES 2.1 (+10% qtab)	100	80	33	-96	-8
ES 2.2 (-10% qtab)	-100	-80	-33	100	8
ES 3.1 (+5% Ftes)	-56	-42	100	85	-8
ES 3.2 (-5% Ftes)	56	42	-100	-85	8
ES 5 (NO fis)	53	3	-5	80	1
ES 6 (be total)	56	-30	-12	30	-38
ES 7.1 (+35% Reol)	11	64	-5	-8	84
ES 7.2 (-35% Reol)	14	-64	5	9	-99
ES 7.3 (ciclo tipo x2)	17	-38	-7	-7	-58

4 Propuesta del sistema de control de la construcción

Conocidos los resultados del estudio de sensibilidad, se determinaron aquellos parámetros del puente que más influencia tenían en su construcción: peso del tablero y fuerzas de tesado. El modelo de control propuesto analizaba la combinación lineal de estos factores que provocaba que una determinada “variable a controlar” del puente (tensiones longitudinales en el tablero en cualquier fase de construcción y desviación de las deformaciones verticales del tablero respecto a la rasante al final de la

construcción) superase un valor preestablecido. Se establecieron 3 valores umbral para las “variables a controlar” en función de la importancia que tenía su superación, definiendo 3 combinaciones lineales de los parámetros fundamentales que conseguían alcanzar el mencionado valor de la “variable a controlar”: se les denominó combinación de aviso, de alerta y de parada.

Definidas éstas, se estableció como “variable de control” la deformación vertical del tablero. De esta manera, en cada fase de construcción podía determinarse una deformada diferente del tablero en función de qué combinación se utilizara (la de aviso, la de alerta o la de parada), lo que permitía definir curvas de deformación del tablero de aviso, de alerta o de parada. Si la deformada del tablero se situaba por debajo de una determinada curva, podía asegurarse que la desviación de los parámetros del puente no era tal que se superaran los valores umbral de las “variables a controlar” previamente establecidos (ni la tensión en el tablero en ninguna de las fases de construcción, ni la desviación de la deformada vertical del tablero al final del proceso constructivo superarían un determinado valor umbral).

En función de la curva que se superara, se establecieron diferentes niveles de actuación: Superación de la **curva de aviso**: Asociada a desviaciones puntuales leves, debían estudiarse las causas del desvío y corregir las contraflechas de futuras dovelas de forma acorde.

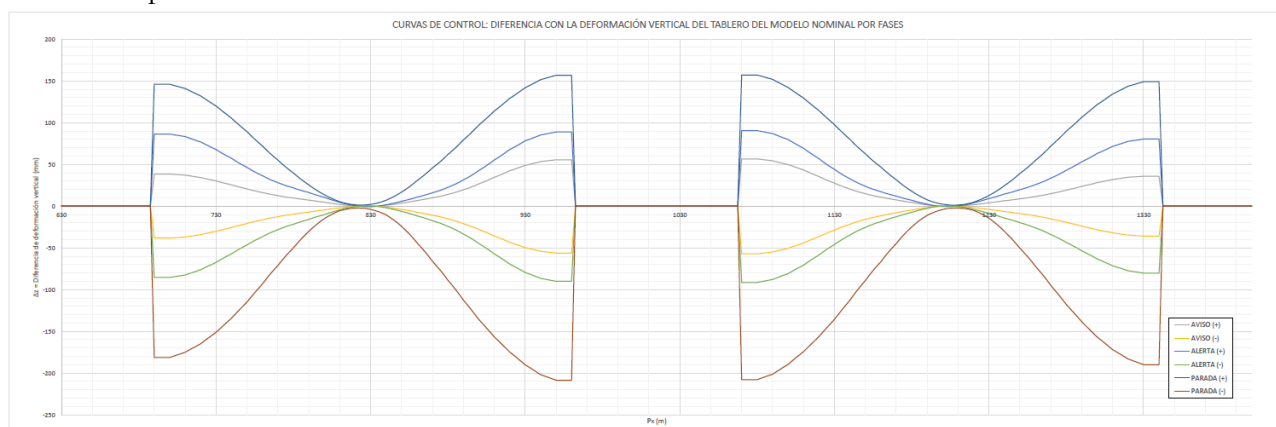


Figura 10. Curvas de control del tablero desarrolladas en el Estudio de Sensibilidad

Superación de la **curva de alerta**: Asociada a desviaciones sistemáticas leves, debían estudiarse las causas del desvío y corregir tanto las fuerzas de tesado como las contraflechas de futuras dovelas de forma acorde.

Superación de la **curva de parada**: Asociada a errores sistemáticos de importancia moderada o a errores puntuales graves. Conducía a la parada automática de la ejecución y se activaba un protocolo de detección de errores no controlados. Tras la identificación y subsanación de la causa del desvío, se tomaban las medidas oportunas para evitar su repetición en el futuro y se determinaban las medidas paliativas pertinentes, además de ajustar tanto las contraflechas del tablero como las fuerzas de tesado de forma acorde.

5 Conclusiones

El estudio de sensibilidad de la construcción del tramo atirantado del Nuevo Puente Pumarejo permitió identificar los parámetros del puente que más afectaban en su construcción y cuantificar su influencia. Ello hizo posible conocer perfectamente antes de comenzar su construcción la naturaleza y rango de las desviaciones más probables, su importancia y las medidas correctoras que reducían o anulaban su efecto.

Por último, la definición de un sistema de control basado en curvas de control de diferentes grados de importancia (aviso, alerta y parada), permitió afrontar la construcción con un protocolo claro de actuación frente a las desviaciones más probables, evitando parar innecesariamente la obra (con un plazo muy ajustado). Durante la obra fue habitual situarse en valores inferiores a la curva de aviso, superándola sólo ocasionalmente y nunca alcanzando la curva de parada. Tal y como se indica con más detalle en [7], en consecuencia la medida más habitual fue la corrección de contraflechas de futuras dovelas, ajustando las

fuerzas de tesado tan sólo en una ocasión. Los ajustes necesarios se realizaron sin necesidad de parar la obra en ningún momento.

6 Referencias

- [1] F. Millanes, et al. Nuevo Puente de Pumarejo en Barranquilla (Colombia). Aspectos relevantes de su proceso constructivo, VIII Congreso de ACHE, Santander, 2020
- [2] I. Duque, A. Aparicio, Influencia de los errores de ejecución en el estado tensional de los puentes atirantados construidos por voladizos sucesivos.
- [3] 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
- [4] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, AASHTO, 2012
- [5] Model Code, FIB(CEB-FIP), 2010
- [6] Probabilistic Model Code, Joint Committee on Structural Safety (JCSS), 2000
- [7] F. Millanes, Nuevo Puente Pumarejo sobre el río Magdalena en Colombia. Seguimiento y control del proceso constructivo del tramo atirantado, VIII Congreso de ACHE, Santander, 2020
- [8] Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, Comité Européen de Normalisation (CEN), 2004
- [9] Cable Stays. Recommendations of French interministerial commission on prestressing, Service d'études techniques des routes et autoroutes (SETRA), 2002
- [10] Recommendations for stay cable, testing and installation 5th edition, Post-Tensioning Institute (PTI), 2007
- [11] Manual de tirantes, Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE), 2007