

Diseño conceptual y proyecto del nuevo puente del Quisi en Benissa, Alicante

Conceptual and detail design of the new Quisi Bridge in Benissa, Alicante

Manuel Sánchez-Solís Rabadán^a, Altea Cámara Aguilera^b, Fernando Ibáñez

Climente^c y Salvador Monleón Cremades^d.

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Degree of Freedom. Ingeniero. m.sanchez@dofengineers.com

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Degree of Freedom. Ingeniera. a.camara@dofengineers.com

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Degree of Freedom. Director Técnico. f.ibanez@dofengineers.com

^d Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Valencia. Catedrático Dep. Mecánica Medios

Continuos. smonleon@mes.upv.es

RESUMEN

El nuevo puente del Quisi se sitúa sobre el barranco de Santa Ana en el término municipal de Benissa. Se diseña como cruce alternativo del barranco para la vía ferroviaria que actualmente discurre sobre una estructura metálica en celosía, recientemente rehabilitada, cuyo origen es de principios de siglo XX (1915). La nueva estructura es una viga cajón de hormigón postesado de 370 metros de longitud repartidos en ocho vanos (35+6x50+35) y 8 metros de ancho, con un único punto fijo frente acciones longitudinales situado en el estribo del lado Dénia.

ABSTRACT

The new bridge on the ravine of Quisi is located downstream of the existing Santa Ana bridge in the municipality of Benissa. It is designed as an alternative crossing of the ravine for the railway line that currently crosses on a recently refurbished steel truss structure, which dates back to the beginning of the XX century (1915). The new structure is a post-tensioned concrete box girder 370 metres long divided into eight spans (35+6x50+35) and 8 metres wide, with a single fixed point for longitudinal actions located on the abutment on the Dénia side.

PALABRAS CLAVE: puente, cajón, postesado, ferrocarril.

KEYWORDS: bridge, box girder, post-tensioning, railway

1. Introducción

Durante los últimos cinco años se han desarrollado varios proyectos de renovación de la red ferroviaria histórica española en la provincia de Alicante. Estas líneas, que se construyeron a principios del siglo XX, son ahora propiedad de FGV (Ferrocarrils de la Generalitat Valenciana), la Conselleria de

Ferrocarriles. La renovación de la línea 9 está terminada y continúa su modernización y ampliación.

El nuevo viaducto sobre el barranco del Quisi se sitúa aguas abajo del puente existente de Santa Ana construido a principios del siglo XX (1915).



Figura 1. Viaductos nuevo y antiguo

La estructura del puente original de celosía metálica ha sido recientemente rehabilitada, permitiendo el paso del ferrocarril unos años más.

El Viaducto de Santa Ana (Figura 2) es una estructura de celosía de acero que ha superado su vida útil de diseño (100 años) con un proyecto original basado en comprobaciones estructurales puramente estáticas. Es por tanto necesario evaluar su vida remanente en función del estado límite de fatiga, lo que implica severas restricciones en cuanto a los valores límite de tensiones que se alcanzan en cada una de las barras que forman el entramado metálico del Viaducto de Santa Ana, así como sus conexiones.

Esta evaluación implicaría que un elevado número de barras podrían estar en una situación probable de sobrepasar los límites de fatiga del acero. Es importante destacar que una de las recomendaciones habituales para aumentar la vida a fatiga de las estructuras de acero es reducir el nivel de carga, aunque en este caso concreto se verá incrementado, como consecuencia del mayor peso del nuevo tren adquirido por FGV.

El fallo por fatiga es un fallo de tipo frágil. Debido a que el Viaducto de Santa Ana es estructuralmente sólo ligeramente hiperestático, en caso de fallo repentino de algunos elementos del mismo vano, el colapso de la estructura podría producirse rápidamente.

Dado el valor histórico, patrimonial, arquitectónico y sentimental del puente, se plantea su conservación y posible uso como vía verde, siendo el nuevo puente del Quisi la estructura por la que pasarán los nuevos vehículos de la línea ferroviaria.

El nuevo puente se diseña en el marco de un contrato de estudio de alternativas, anteproyecto y proyecto constructivo para la circulación de las nuevas unidades móviles duales (diésel-eléctricas) adquiridas por FGV sobre el barranco del Quisi en una variante de trazado independiente al actual Viaducto de Santa Ana (Figura 1).



Figura 2. Prueba de carga del viaducto de Santa Ana existente

En este contexto, además de las limitaciones técnicas y presupuestarias, el equipo de diseño es consciente de la importancia de encontrar una correlación entre ambas estructuras para dotar de valor añadido a ambas construcciones civiles, que necesariamente coexisten en el emplazamiento.

2 Estudio de alternativas

2.1 Alternativa 0

En primera instancia, se plantea la posibilidad de mantener en uso la estructura existente con los nuevos vehículos, sin embargo, la rehabilitación realizada recientemente no cumple con la nueva hipótesis de carga para el tren de la serie 5000, aspecto que, unido a la incertidumbre respecto a los parámetros de fatiga de la estructura actual, supone un nivel de riesgo ante un posible fallo estructural. Por ello, esta alternativa fue descartada previamente.

Alternativamente, se propone la sustitución del tablero y las pilas del actual Viaducto de Santa Ana por nuevos elementos de similar configuración en su aspecto visual. Sin embargo, en las reuniones mantenidas entre la Gerencia y Dirección de FGV, el Alcalde y representantes de la Corporación Municipal de Benissa, se decidió descartar esta alternativa, manteniendo el actual Viaducto de Santa Ana por el valor histórico de la estructura.

2.2 Alternativas para un nuevo puente

El resto de las alternativas se basan en diferentes propuestas y trazados para la nueva estructura. Como conclusión de esta fase, se escogen y proponen a FGV cinco alternativas entre varias más, cumpliendo un equilibrio entre presupuesto e impacto en el paisaje y sobre la estructura histórica existente. La Figura 3 muestra cada una de ellas en planta sobre la vía férrea actual. La longitud total para cada alternativa es de: 582m, 692m, 656m, 1200m y 600m, respectivamente.

En todos los casos se evalúan dos tipologías de puente: cajón de hormigón postesado y sección mixta con perfiles tubulares de acero.

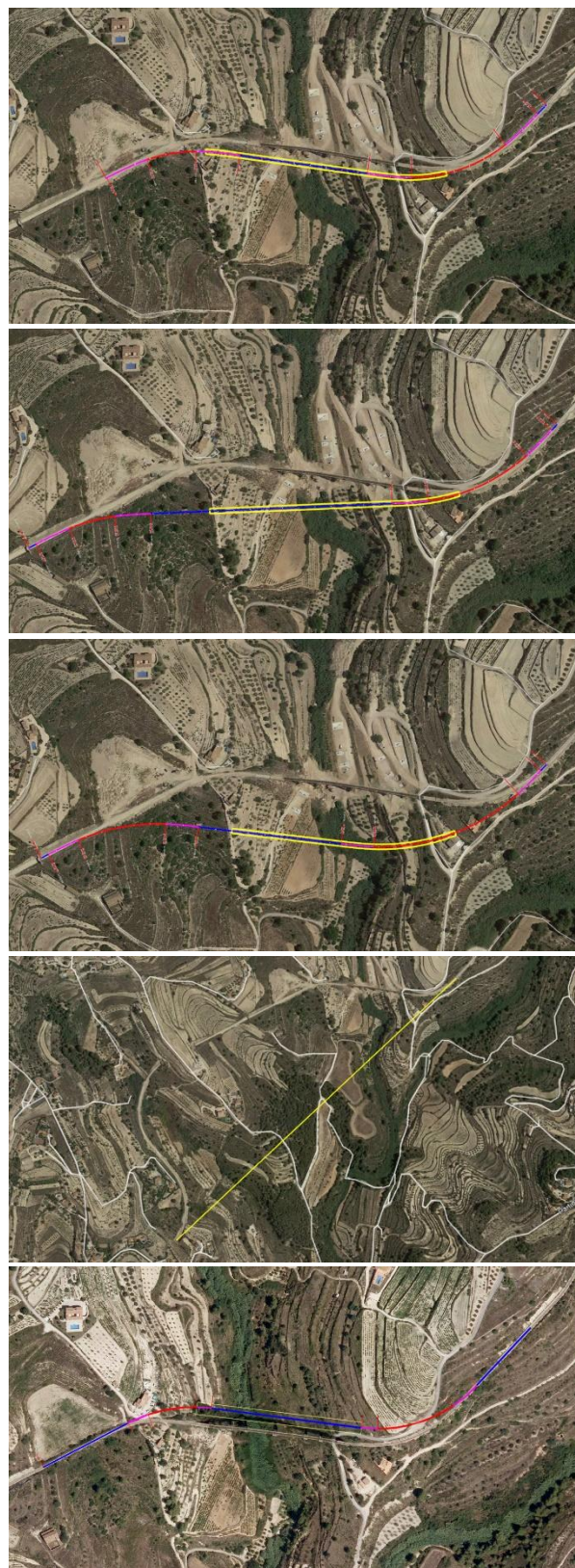


Figura 3. Alternativas 1 a 5

2.3 Solución final

La solución final consensuada entre todas las disciplinas se basa en la segunda alternativa, resultando un cajón de hormigón postesado de

370 metros de longitud dividido en ocho vanos ($35+6\times 50+35$) y 8 metros de ancho (Figura 4), con un único punto fijo frente acciones longitudinales situado en el estribo del lado Dénia. La longitud total del puente se incrementa respecto al estudio de alternativas ya que los tres primeros vanos se concibieron previamente como relleno sobre el terreno, sin embargo, los estudios geotécnicos recomendaron prolongar el tablero en dirección a Alicante.

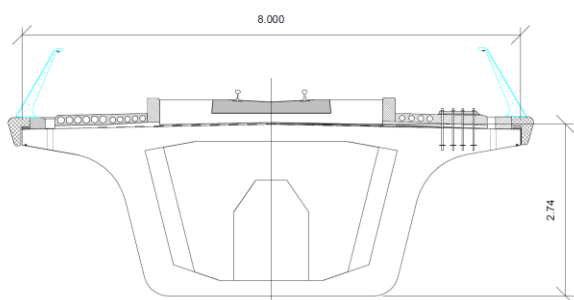


Figura 4. Sección del puente

Atendiendo a criterios técnicos, la decisión por esta tipología se basa en los dos aspectos siguientes:

1) Simbólicamente, la línea férrea se traslada al siglo XXI, por lo que los usuarios notarán el avance técnico al cruzar cualquiera de los dos puentes. El diálogo es ineludible y se optó por establecerlo a partir de dos materiales, una tipología: la viga.

2) Para el nuevo puente se utilizan formas suaves y curvas de hormigón, lo que permite la distinción de ambas estructuras en lugar de crear una competencia entre ellas. Estas geometrías se pueden apreciar en las esquinas del tablero continuo y los perfiles ovalados de los estribos, así como en los capiteles de las pilas, lo que resulta en una estética completamente diferente a los elementos lineales y delgados de la celosía metálica existente.

3 Descripción de la estructura

El tablero es el elemento principal del puente y por ello se dedica especial atención a optimizar

las dimensiones para que se ajusten tanto a los requerimientos arquitectónicos como estructurales.

La viga cajón, de 2.74 metros de canto, tiene una esbeltez de $1/18$, una relación muy adecuada para puentes ferroviarios. El ancho de la losa superior es suficiente para albergar toda la superestructura y sus equipos asociados. El espesor de la losa superior es variable, con un mínimo de 25 - 30 cm para resistir los momentos flectores transversales. La sección se cierra en la losa inferior hasta un ancho de 3.5 m, con una transición suave para adaptarse a las formas. El espesor de las almas, 50 cm, es el mínimo suficiente para poder albergar los tendones de pretensado.

El siguiente punto crítico del esquema estructural es el sistema resistente horizontal ya que las fuerzas horizontales como la fuerza de frenado son de gran magnitud. Además, el tablero es muy macizo, lo que supone una imposición restrictiva para una zona sísmica como la de la ubicación del proyecto. Se decide por simplicidad constructiva, ubicar el punto fijo en el estribo 2 por ser la cimentación en la que el nivel de roca es más somero. En el resto de las pilas y en el estribo 1 se utilizan apoyos tipo POT para liberar el desplazamiento longitudinal. El desplazamiento transversal se restringe en todos los elementos para limitar la flexibilidad del propio tablero.

Las pilas 1, 2 y 3 se encuentran en una zona más elevada y por lo tanto son más cortas, de 7.15 m de altura. Las pilas 4, 5, 6 y 7 se localizan sobre el barranco y tienen alturas variables entre 17.40 y 32.60 m.

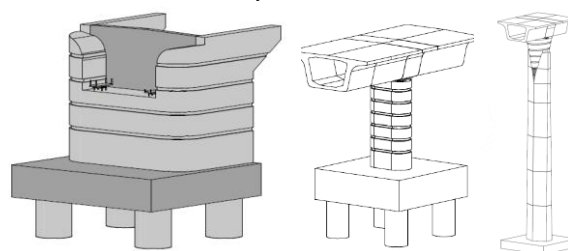


Figura 5. Figuras 3D del estribo 1, pila 1 y pila 5.

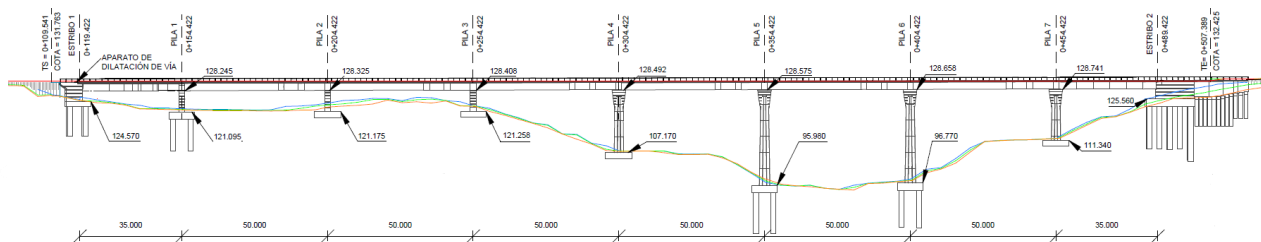


Figura 6. Alzado del viaducto

En cuanto a los estribos, el estribo 2 hace la función de punto fijo tanto en situación definitiva como durante el proceso constructivo, comenzando la construcción del tablero por este extremo y bloqueando el tablero al estribo mediante un sistema de barras postesadas y neoprenos intermedios tras el endurecimiento del hormigón de este tramo. Las barras cruzan tanto el diafragma de apoyo del tablero como el muro frontal del estribo, lo que permite precomprimir los neoprenos zunchados localizados en esa interfaz. Se comprueba que para la máxima acción de sismo longitudinal, dichos neoprenos quedan en estado comprimido.

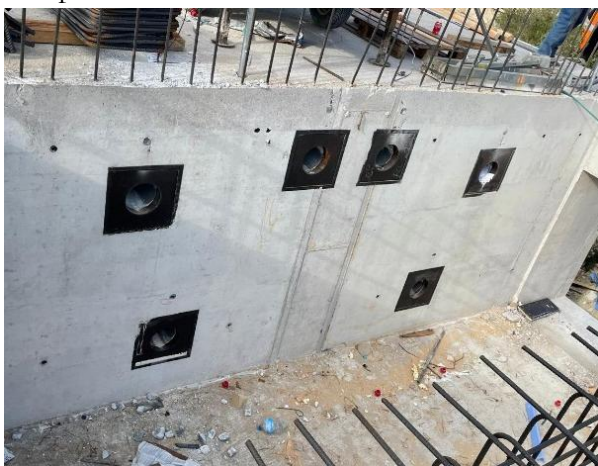


Figura 7. Cámara de tesado del Estribo 2 en construcción

La cimentación se realiza en roca madre o sobre pozo de cimentación con zapatas directas en pilas 2, 3, 4 y sobre pilotes donde la roca es más profunda (estribo 1, pilas 1, 5 y 6) y donde la magnitud y combinación de las cargas lo requieran (estribo 2).

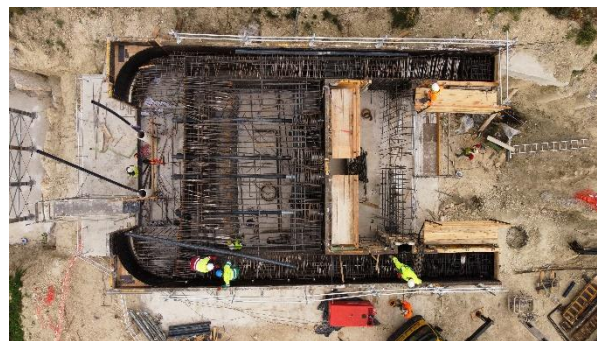


Figura 8. Armado del estribo 2

4 Secuencia constructiva

Debido a la longitud del tablero (370 m), resulta inviable ejecutarlo en una sola fase. Se define una construcción en ocho fases, con el frente de avance desde el lado de Dénia hacia Alicante. La distancia de la junta constructiva es de $\frac{1}{4}$ de la luz respecto a las pilas (12,5 m), un compromiso entre el $\frac{1}{5}$ constructivo y el $\frac{1}{3}$ teórico que equipara la ley de momentos flectores con la teórica de una única ejecución. Al ser los primeros vanos de altura reducida, se utiliza un encofrado apoyado directamente sobre el terreno. En los tramos con mayor altura sobre el terreno se utilizan cimbras aporticadas (desde la pila 3 al estribo 2), mientras que en el tramo del estribo 1 a la pila 3 por ser de altura más reducida se utiliza cimbra cuajada. En la Figura 10 se observa un tramo de cimbra aporticada durante la ejecución. En cada fase de ejecución del tablero, se cuelga el encofrado en el frente de la fase anterior con el objetivo de mejorar los acabados de la junta, hacer compatibles las deformaciones entre fases y reducir el número de torres necesarias. Dicho cuelgue genera un incremento de momento negativo sobre pila que se recoge mediante una familia adicional de postesado de corta longitud.

La Figura 9 describe las diferentes fases de la secuencia constructiva.

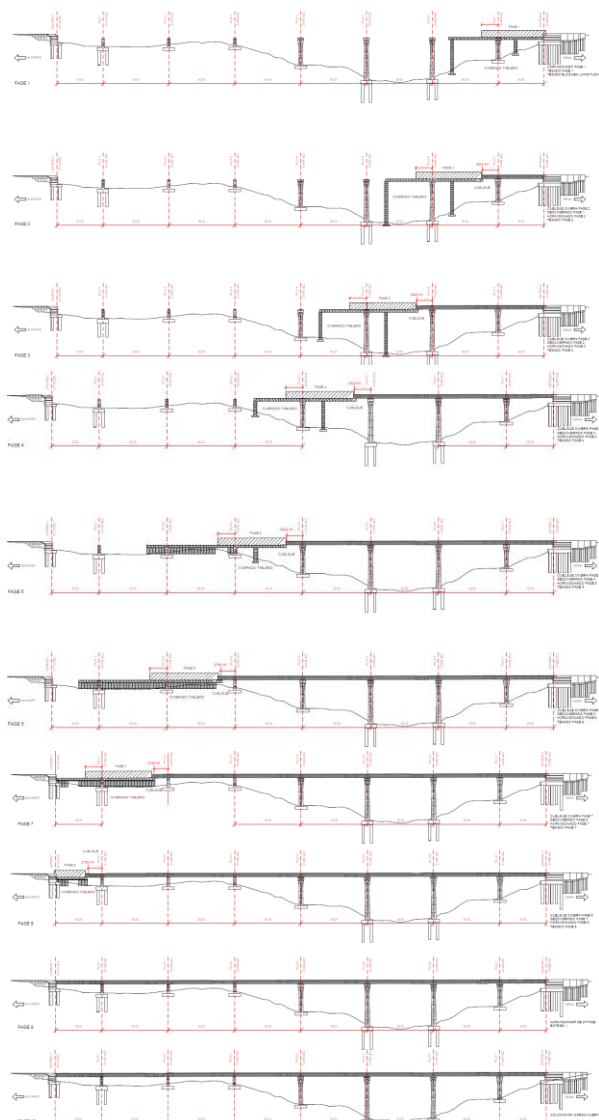


Figura 9. Construcción del puente



Figura 10. Imagen de la ejecución del tablero en la zona del barranco

5 Análisis estructural

Se verifica el pretensado para cada fase de construcción. Tres cables en cada alma suman 27900mm^2 de acero Y1860S7. La disposición de los cables se optimiza en función de la geometría en planta y alzado de la sección transversal y la posición de la junta de construcción (Figura 11), por un lado, y en función del control de tensiones para estados límite de servicio, por otro lado. Una vez verificada la viga cajón de hormigón postesado, se implementa un modelo de elementos finitos detallado considerando los diferentes elementos de soporte.

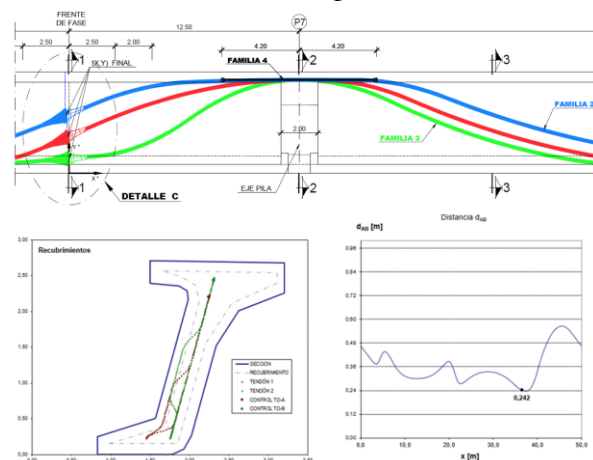


Figura 11. Verificación del pretensado

5.1 Modelo de elementos finitos

Para el análisis del sistema estructural primario, se ha implementado un modelo de elementos finitos basado en elementos tipo “frame” para el tablero (Figura 12). Se utilizan elementos de enlace no lineales para diferentes valores de fricción en función de los apoyos POT con un rango de rozamiento del 1% al 3% de la carga vertical. El objetivo de este modelo es evaluar el comportamiento global de la estructura para los diferentes casos de carga, incluyendo el análisis del espectro de respuesta que se basa en una aceleración básica de 0.15 g obtenida a partir del nuevo mapa de sismicidad proporcionado por el IGN [1] en 2015 que proporciona valores

superiores a los incluidos en el código español de análisis sísmico de puentes, NCSP-07 [2].

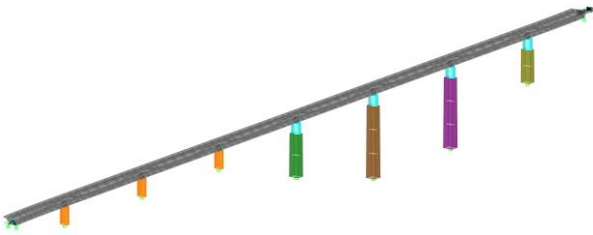


Figura 12. Modelo de EF global

Este modelo se utiliza para el diseño de las pilas y sus cimentaciones. El tablero también se verifica para los estados límite ELU y ELS. Con respecto a los estribos, se implementan modelos de EF no lineales locales adicionales con elementos tipo lámina para permitir una evaluación adecuada de las tensiones en el terreno y para el diseño de los muros y losas de hormigón.

En ambos casos se desarrollan unos modelos locales de bielas y tirantes para analizar algunas situaciones específicas.

5.2 Interacción carril-estructura

Una situación de diseño importante que debe analizarse adecuadamente en los puentes ferroviarios es la interacción carril-estructura. La normativa española IAPF [3] define una serie de límites de tensiones y deformaciones en el carril en función de una rigidez específica con comportamiento elástico multilíneal para la conexión entre el carril y la estructura. Por este motivo, el análisis debe ser no lineal. El objetivo principal de este estudio es determinar si es necesaria o no una junta de dilatación. También se requiere modelar los carriles con la longitud suficiente a cada lado para permitir dilataciones libres (longitud de respiración). Para este caso, la longitud adicional requerida es de 325 metros a cada lado.

Las cargas de diseño para este análisis son la temperatura, la fluencia y la retracción combinadas con la carga viva del tráfico. La conclusión de este estudio es que es necesaria una junta de dilatación (Figuras 13 y 14). Se decide ubicarla en el estribo de Alicante. El

modelo sin junta de dilatación (Figura 13) mostró una tensión de compresión en los carriles superior a 72 MPa (límite según la norma).

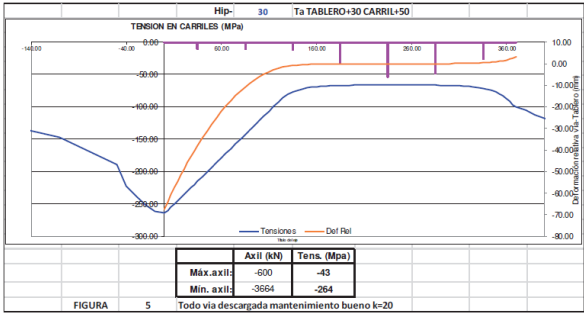


Figura 13. Tensiones sin junta de dilatación

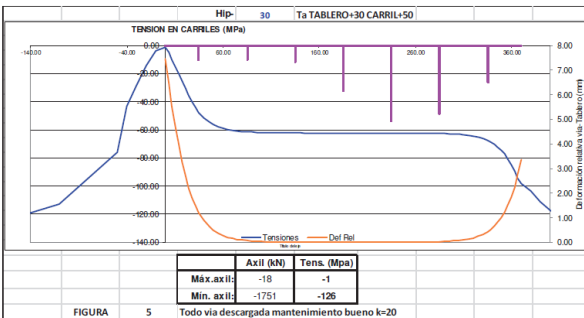


Figura 14. Tensiones con junta de dilatación

5.3 Diseño de servicio

La norma IAPF [3] establece límites para flechas, rotaciones y vibraciones para permitir un nivel adecuado de confort para los usuarios del ferrocarril. La principal conclusión, como era de esperar, es que el cajón de hormigón postesado es muy rígido tanto para acciones verticales como horizontales. El nivel de confort es de alta calidad para la velocidad de diseño. Estos resultados se validan también con el análisis de la prueba de carga realizada sobre el puente, en la que se obtienen desplazamientos verticales máximos de 3 mm.

Tabla 1. Registros de flechas en la prueba de carga.

Posición 1 (EST-1)			
Punto	f_0 (mm)	f_{10} (mm)	Flecha remanente (mm)
CV1	-0,90	-1,00	-0,10
Posición 2 (EST-2)			
CV2	-1,00	-1,00	0,00
Posición 3 (EST-3)			
CV2	-2,60	-2,70	0,00
Posición 7 (EST-4)			
CV4	-2,90	-3,00	0,10
Posición 8 (EST-5)			
CV5	-0,90	-0,90	0,00
Posición 15 (EST-6)			
CV8	-1,00	-1,00	0,00



Figura 15. Ejecución de la prueba de carga

6 Dirección de Obra

En el contrato de Dirección de Obra se realizaron labores de control de ejecución y asistencia técnica a las modificaciones del proyecto original y a las modificaciones no previstas, entre otras tareas. Destaca la asistencia relativa al postesado como la evaluación de la resistencia de la sección tras rotura de algunos torones, la justificación de los efectos del desplazamiento de algunas vainas y la justificación de la discrepancia entre los valores teóricos de alargamiento del postesado y los reales, siendo de gran utilidad la medición de los alargamientos complementarios para el sistema concreto utilizado en este viaducto. Todo ello queda respaldado técnicamente por un modelo de cálculo de contraste que permitía comprobar la analogía de los resultados realizado por los Servicios Técnicos de FCC.



Figura 16. Tesado de armadura activa

7 Conclusiones

El puente del Quisi ha sido diseñado por Degree of Freedom con la colaboración de A-Ingenia y la UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALENCIA, un equipo con gran experiencia en el diseño de puentes. Las formas de todos los elementos estructurales y equipamientos están cuidadosamente diseñadas para satisfacer tanto los requisitos arquitectónicos como los estructurales. Es muy importante para la población de Benissa (Alicante) mantener el valor histórico del puente de Santa Ana. El equipo de diseño es consciente de la importancia de encontrar una correlación de las estructuras para potenciar ambas construcciones civiles, que se encuentran necesariamente próximas una de otra.

La Dirección de Obra fue llevada por un equipo multidisciplinar formado por las empresas Degree of Freedom, A-Ingenia e Ingecid.

Referencias

- [1] Instituto Geográfico Nacional (IGN), 2015. *Mapa general de la sismicidad en la Península Ibérica*. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.
- [2] Dirección general del Instituto Geográfico Nacional (2007). *Norma de Construcción Sismorresistente: Puentes (NCSP-07)*. Ministerio de Fomento.
- [3] Dirección general de Ferrocarriles (2010). *Instrucción de acciones a considerar en puentes de ferrocarril (LAPF)*. Ministerio de Fomento.

Agradecimientos

A todo el equipo de la UTE encargada de la redacción del proyecto, así como la Dirección de Obra, le gustaría dar su agradecimiento especial a FGV por la confianza depositada en todas las etapas del proyecto.

Es preciso reconocer la buena labor de FCC, tanto el equipo en obra que hizo realidad la estructura, como los Servicios Técnicos que aportaron su experiencia y buen hacer.