

Diseño de medios auxiliares para el repintado del Puente-Viaducto de Requejo (Puente de Pino)

Design of auxiliary means for the repainting of the Requejo Bridge-Viaduct (Pino Bridge)

Alejandro Castillo Linares^a, David Trujillo Montes^b, Esther Felipe Amigo^c, Iván
Lobato Raposo^d, Javier Raigón Rodríguez^e

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Granada (Granada, España). A.C.L. Diseño y Cálculo de Estructuras S.L. (Cádiz, España).

Director Gerente. acastillo@acl-estructuras.com

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. A.C.L. Diseño y Cálculo de Estructuras S.L. (Cádiz, España). Director de proyectos.

dtrujillo@acl-estructuras.com

^c Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Servicio Territorial de Movilidad y Transformación Digital de Zamora. Junta de Castilla y León. Jefa de Sección de Proyectos y Obras. esther.felipe@jcy.es

^d Ingeniero Técnico de Obras Públicas Servicio Territorial de Movilidad y Transformación Digital de Zamora. Junta de Castilla y León. Jefe de Negociado de la Sección de Proyectos y Obras. ivan.lobato@jcy.es

^e Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Construcciones ANTROJU, S.L. Jefe de obra. javier.raigon@antroju.com

RESUMEN

El Puente-Viaducto de Requejo, proyectado por José Eugenio Ribera e inaugurado en 1914, constituye un hito histórico de la ingeniería española que se ha mantenido en servicio hasta nuestros días. Recientemente se ha procedido a su repintado con objeto de prolongar su vida útil y preservar sus condiciones estructurales. Dada la limitación de peso en la estructura, para la instalación de andamios auxiliares en el puente ha sido necesario un estudio de viabilidad mediante la elaboración de un modelo de elementos finitos de la estructura y una posterior prueba de carga. En el presente artículo se describen los criterios de cálculo empleados para el diseño de los medios auxiliares.

ABSTRACT

The Requejo Bridge-Viaduct, designed by José Eugenio Ribera and inaugurated in 1914, is a historic milestone in Spanish engineering that has remained in service to this day. It has recently been repainted in order to prolong its useful life and preserve its structural conditions. Given the weight limitations of the structure, a feasibility study was necessary to install auxiliary scaffolding on the bridge by developing a finite element model of the structure and a subsequent load test. This article describes the calculation criteria used to design auxiliary means.

PALABRAS CLAVE: Puente arco, acero, reparación, repintado, corrosión, durabilidad, mantenimiento, medios auxiliares.

KEYWORDS: Arch bridge, steel, repair, repainting, corrosion, durability, maintenance, auxiliary means.



Figura 1 Vista general de Puente-Viaducto de Requejo (Puente de Pino)

1. Introducción

Recientemente se ha llevado a cabo el repintado de los perfiles metálicos del Puente-Viaducto de Requejo con el propósito de prolongar su vida útil y preservar sus condiciones estructurales.

Para la realización de estos trabajos ha sido imprescindible emplear andamios anclados tanto en el tablero como en los montantes del arco con un peso superior a las limitaciones de carga establecidas para el tráfico.

Con el objetivo de garantizar la seguridad estructural y optimizar el número de fases de andamiaje, se ha desarrollado un modelo de elementos finitos del puente para evaluar el comportamiento de la estructura bajo las nuevas condiciones de carga. Complementariamente, se llevó a cabo una prueba de carga estática equivalente al efecto de los andamios en la estructura con el fin de validar los resultados obtenidos en el modelo de cálculo elaborado.

En el presente artículo se describen los criterios y bases de cálculo empleados en la elaboración del modelo de cálculo del puente y el contraste de los resultados obtenidos en el modelo respecto a la prueba de carga. Además, dado que se dispone del Proyecto Original de la estructura, también se compararán los resultados

obtenidos en el modelo respecto a los cálculos manuales realizados por el Projectista según los medios disponibles en su época.

2. Puente-Viaducto de Requejo (Puente de Pino)

2.1 Descripción general

El Puente-Viaducto de Requejo, proyectado por el ingeniero José Eugenio Ribera en 1897 e inaugurado en 1914, representa un hito histórico en la ingeniería española de principios del siglo XX que se ha mantenido en servicio hasta nuestros días.

La estructura, también conocida como Puente de Pino, se constituye por un puente arco metálico con una longitud total de 190 m entre estribos en el que destaca un arco central de 120 metros de luz. La apariencia de la estructura se caracteriza por la ligereza de sus formas, encajando de forma perfecta en la cuenca del río Duero para comunicar a los municipios zamoranos de Pino del Oro y Villadepera.

En el momento de su construcción, el Puente-Viaducto de Requejo se erigió como el puente con la mayor luz y la mayor altura sobre el cauce en España además de destacarse como el primer arco construido en acero del país.

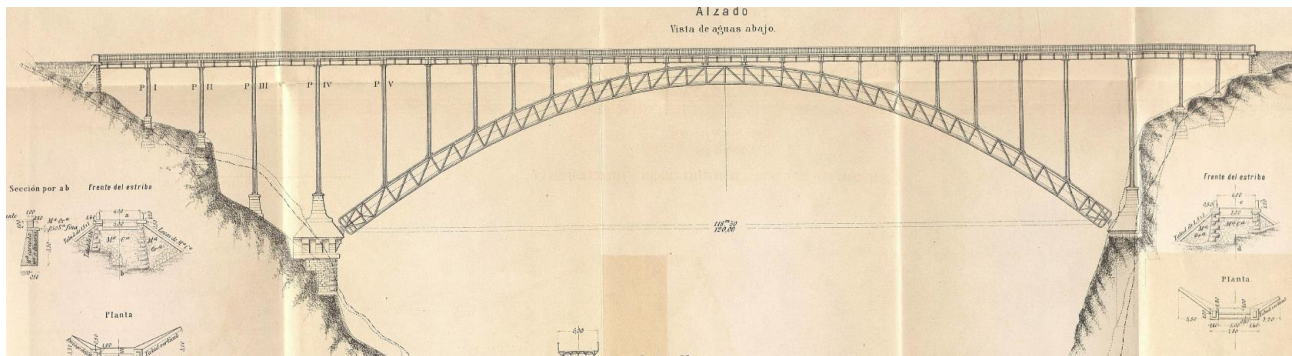


Figura 2 Alzado general de Puente-Viaducto de Requejo [1]

2.2 Descripción de la estructura

Se trata de un puente arco metálico de tipo tablero superior, con una longitud total de 190 m entre estribos que se constituye por tres tramos diferenciados: uno central principal configurado por un arco en celosía metálico y sendos tramos de aproximación en los que el tablero se apoya sobre pilas metálicas cimentadas en el terreno. El tablero en el tramo central se apoya sobre el arco mediante pilas metálicas de distinta altura que varía entre un valor máximo de 18.05 m en los extremos hasta los 0.95 m en la clave del arco.



Figura 3 Detalle de apoyo de arco en cimentación [3]

El arco descansa sobre cuatro cimentaciones de hormigón mediante apoyos de tipo articulado. Para una luz de 120 m, su flecha es de 23.42 m, lo que da lugar a un arco rebajado con una relación de 1/5 aproximadamente.

Mientras que el canto del arco es constante de 3.00 m, su sección es de anchura variable desde los apoyos, donde su ancho es de 8.30 m hasta el centro de vano, donde se reduce hasta los 4.76 m.

La sección transversal del arco, al igual que las pilas metálicas, dispone de una pendiente lateral de 1/12 para mejorar la estabilidad transversal de la estructura.

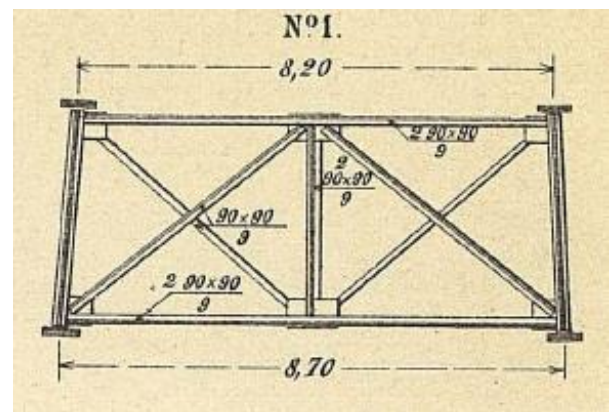


Figura 4 Sección transversal de arco en zona de apoyos [1]

Las pilas metálicas (denominadas como palizadas en Proyecto) que transmiten la carga del tablero hasta el arco, en el tramo central del puente, o hasta las cimentaciones de hormigón en los tramos de aproximación, se configuran mediante una cercha plana con montantes principales confeccionados a base de la unión de perfiles angulares y chapas arriostrados mediante pares de perfiles angulares.

El tablero, cuyo ancho total es de 6.00 m, está formado por una calzada de 4.50 m de ancho flanqueado por dos aceras voladas de 0.75

m. La actual losa de calzada se forma mediante una losa de hormigón con 0.14 m de espesor medio. Esta losa de calzada fue ejecutada en la rehabilitación realizada en el tablero del puente en el año 2013, en la que se sustituyó el relleno de macadam y capa de aglomerado originales reduciendo el peso de la plataforma de calzada en unos 400 kg/m².

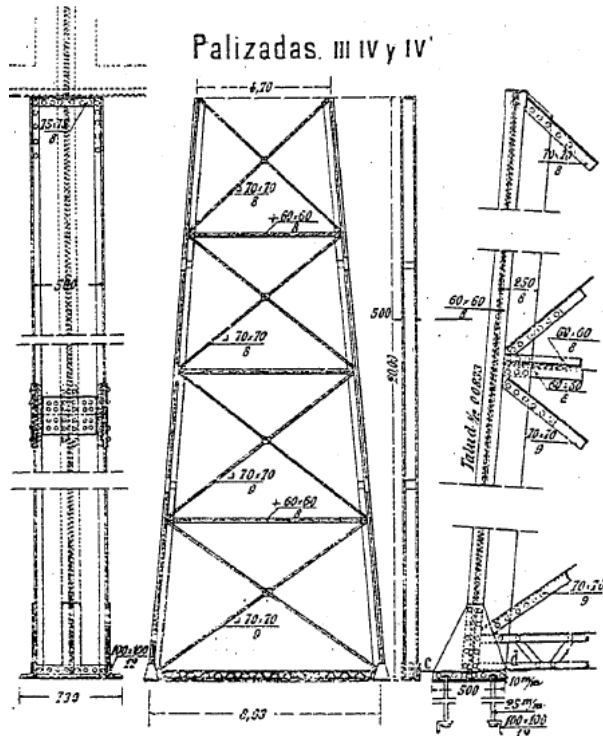


Figura 5 Detalle de palizadas II, IV y IV' [2]

No obstante, debe tenerse en cuenta que el relleno de macadam existente no fue considerado por el Proyectista en sus cálculos ya que en el artículo que escribió con motivo de la inauguración del puente [2] manifestó que este cambio fue impuesto por la Superioridad. Gracias a la ejecución de la losa de hormigón en la rehabilitación del año 2013 se consiguió una carga permanente en tablero similar a la considerada en los cálculos de Proyecto.

Estructuralmente, el tablero se define mediante dos vigas longitudinales principales con 1.05 m de canto que se apoyan sobre las palizadas con una separación de 4.70 m entre sí. Estas vigas se vinculan mediante vigas transversales dispuestas cada 2.00 m que sirven de soporte para tres vigas longitudinales interiores entre las que se disponen unas chapas

abombadas que sirven de fondo del tablero. La estructura del tablero se completa mediante un arriostramiento inferior a base de cruces de perfiles angulares y los voladizos que soportan a las aceras.

Las vigas principales del tablero también fueron objeto de la rehabilitación del tablero realizada en 2013 ya que, tras su inspección, se comprobó la existencia de una fuerte corrosión en su parte superior. Ante esta situación se procedió a la instalación de una nueva chapa superior a modo de ala y dos chapas plegadas de 8 mm que puentean el alma en su tramo superior.

Los apoyos del tablero en los estribos se formalizan mediante carritos que permiten el desplazamiento longitudinal de los apoyos.

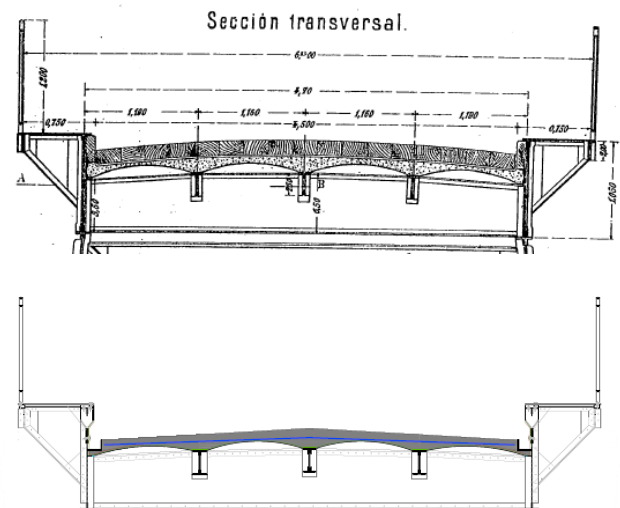


Figura 6 Sección tipo de tablero. Arriba: Tablero definido en Proyecto Original [2]. Abajo: Tablero tras rehabilitación en año 2013.

2.3 Proyecto

La Junta de Castilla y León posee el Proyecto Original del puente, firmado por José Eugenio Ribera en 1897. Este proyecto incluye numerosos detalles y cálculos que, en su mayoría, están documentados en el libro 'Grandes Viaductos', escrito por Ribera y publicado en 1897[1].

Este libro, de gran valor histórico, ofrece extensos comentarios sobre la tipología y el comportamiento estructural, los cuales siguen siendo conceptualmente válidos hoy en día a

pesar de que muchas conclusiones se basaron en análisis con los medios rudimentarios de la época y en deducciones intuitivas.

El proyecto deja patente la gran maestría de su autor, detallando meticulosamente el cálculo y definición de cada componente de la estructura metálica. Gracias a esta precisión, ha sido posible la elaboración de un modelo de elementos finitos de la estructura para el diseño de los medios auxiliares necesarios durante el repintado.

Las acciones de tráfico aplicadas en el Proyecto de la estructura consisten en una carga uniforme de 300 kg/m^2 junto con el tráfico de unos trenes de carga formados por carretas tiradas por caballos de 6 t y 9 t de peso.

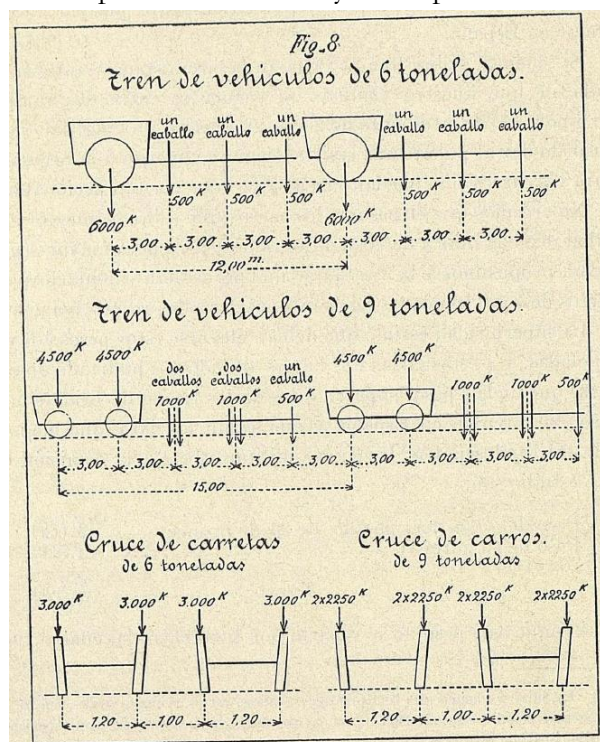


Figura 7 Tren de cargas considerados en Proyecto de estructura [1]

Aparte de la sobrecarga de tráfico se considera la acción de las cargas muertas del tablero, una variación térmica de $\pm 30^\circ$ y el empuje horizontal del viento para una hipótesis de viento extremo (270 kg/m^2) y para una hipótesis de servicio (150 kg/m^2) concomitante con el tráfico.

De acuerdo con lo indicado por el Proyectista, el acero a emplear en la construcción

del puente debería ser “acero muy dulce fabricado por el procedimiento Martin-Siemens” con límite elástico entre 20 y 26 kg/mm^2 y carga mínima de rotura de 40 kg/mm^2 . Por su parte, los roblones se definen como elementos de acero extradulce con una carga mínima de rotura de 38 kg/mm^2 y alargamiento mínimo de 28 %.

Dentro de los trabajos desarrollados para la rehabilitación del puente en el año 2013 se extrajeron muestras de acero que fueron ensayadas en laboratorio, comprobando que el acero empleado en la construcción del puente cumple, en general, con las especificaciones de Proyecto.

La obtención de esfuerzos se lleva a cabo mediante métodos gráficos y cálculos manuales. En cuanto al criterio de dimensionamiento de Proyecto, se ha limitado la tensión de trabajo del acero a valores entre 8 y 10 kg/mm^2 en los perfiles de acero y de 5 kg/mm^2 en los roblones. Se ha tenido en cuenta el efecto del pandeo en los soportes de las pilas metálicas y se ha descontado el área afectada por los agujeros para el paso de los roblones.

3. Diseño de medios auxiliares para repintado

3.1 Antecedentes

La Junta de Castilla y León, como propietaria de la estructura, ha promovido el repintado del puente mediante la licitación del Proyecto de “CONSERVACIÓN PREVENTIVA. REPINTADO DEL PUENTE PINO. SITUACIÓN: ZA-321, DE N-122 A MORALINA. TRAMO P.K. 7+300). CLAVE 4.6-ZA-10”.

Para la ejecución de los trabajos de repintado en la zona del arco, el Proyecto de repintado contempla el empleo de andamios fijados tanto en el tablero como en los montantes del propio arco. Teniendo en cuenta que la carretera que cruza el puente tiene una limitación de tráfico de 15 t, como criterio inicial

se estableció que los andamios a emplear no deberían cargar simultáneamente más de 15 t en el arco, aspecto que suponía una gran restricción para el proceso constructivo.

Ante esta situación, la empresa adjudicataria de las obras, ANTROJU SL, solicitó la colaboración de ACL DISEÑO Y CÁLCULO DE ESTRUCTURAS para la modelización del puente y el cálculo estructural del mismo con el fin de minimizar el número de fases de andamiaje, lo que suponía el empleo de unos andamios con cargas superiores a las 15 t.

3.2 Descripción del modelo de cálculo

El modelo de cálculo se ha elaborado mediante la herramienta informática SAP2000, empleando elementos tipo barra para representar la estructura metálica del puente según la geometría definida en los planos de Proyecto [1] y resto de información disponible [2,3]. Los apoyos del arco en su cimentación se han representado mediante apoyos simples sin coacción al giro mientras que los apoyos del tablero en los estribos se han modelizado mediante carritos longitudinales que tampoco tienen coacción al giro.

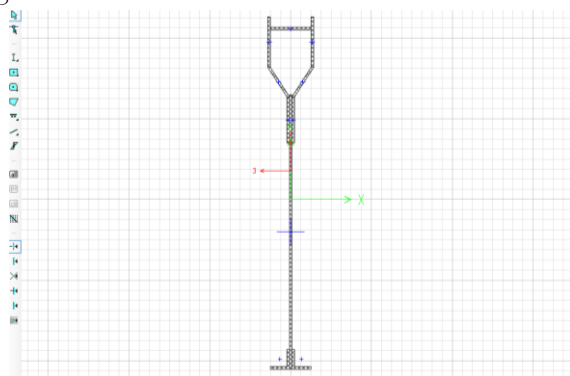


Figura 8 Ejemplo de definición de viga longitudinal de tablero con “Section Designer”

Puesto que los perfiles empleados para la construcción del puente no se corresponden con las series normalizadas actuales, la definición de su sección se ha llevado a cabo con la herramienta “Section Designer” que incorpora el software y que permite la implementación de todo tipo de sección.

3.3 Acciones de cálculo

Para la verificación de la estructura durante la instalación de los andamios se han considerado las acciones propias de la estructura según lo dispuesto en el Eurocódigo: Peso propio, cargas muertas, sobrecarga de nieve, viento y acción térmica. La acción del tráfico de vehículos no se contempla en el modelo ya que, durante el repintado, el puente ha permanecido fuera de servicio. Respecto a la acción sísmica, no se ha considerado al tratarse de una zona de baja sismicidad.

Aparte de lo anterior, se ha contemplado la sobrecarga generada por las distintas fases de andamiaje propuestas por el Contratista (ver figuras 14-16), la sobrecarga de los trabajadores y de los equipos auxiliares como carretillas elevadoras y depósitos de agua.

Respecto a las fases de andamiaje, se han modelizado todas las fases propuestas por el Contratista a lo largo del arco, incluyendo varias alternativas para determinar el número de fases de andamiaje que admite la estructura. En el cálculo final se ha contemplado una primera alternativa de 9 fases de andamiaje con un peso máximo de andamio de 33 t y una segunda alternativa de 11 fases con un peso máximo de andamio de 20 t.

3.4 Materiales

A efectos del cálculo realizado se ha considerado que el acero que constituye el puente dispone de un límite elástico de 230 MPa y una tensión de rotura de 377 MPa como valores característicos. Estos valores, que son coherentes con los criterios de Proyecto Original [1], se han establecido de acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos realizados a partir del acero del puente [3].

No se ha considerado pérdida de sección por corrosión en las secciones ya que en la información disponible a fecha de elaboración del modelo no se indicaba la existencia de este tipo de daños de forma significativa.

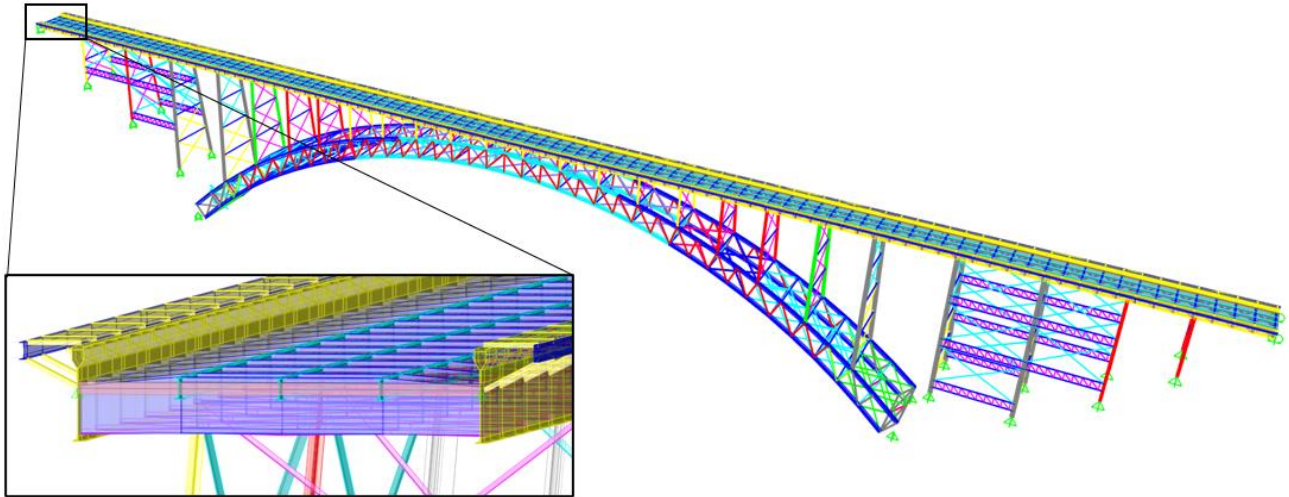


Figura 9 Vista general de modelo de cálculo elaborado en SAP2000

3.5 Estrategia de análisis estructural

Al tratarse de una estructura traslacional se comprueba su estabilidad lateral global mediante un análisis no lineal que contempla las imperfecciones geométricas de la estructura para la obtención de esfuerzos.

Para ello, siguiendo los criterios del enfoque 2 recogido en el Eurocódigo 3 [4], el modelo elaborado considera las imperfecciones globales de la estructura mientras que las imperfecciones locales en los elementos comprimidos se verifican considerando el fallo por inestabilidad (pandeo).

La imperfección global de la estructura se aplica en el arco, estudiándose tanto el caso deformación horizontal (fuera del plano del arco) como el caso de una deformación vertical

asimétrica (dentro del plano del arco). Los valores de estas imperfecciones se establecen de acuerdo con lo indicado en las tablas D.8 y D.9 del Eurocódigo 3. Parte 2.

A partir del modelo de cálculo elaborado se comprueba que el efecto de las imperfecciones globales del arco resulta poco relevante por lo que se concluye que, de forma global, el arco del puente no es susceptible de experimentar importantes incrementos de esfuerzos por efectos de segundo orden.

Este resultado es lógico, ya que la geometría del arco, con anchura variable que se incrementa hacia los apoyos y sección inclinada con pendiente 1/12, junto con el importante número de arriostramientos, confieren al arco una gran estabilidad frente a los esfuerzos de segundo orden.

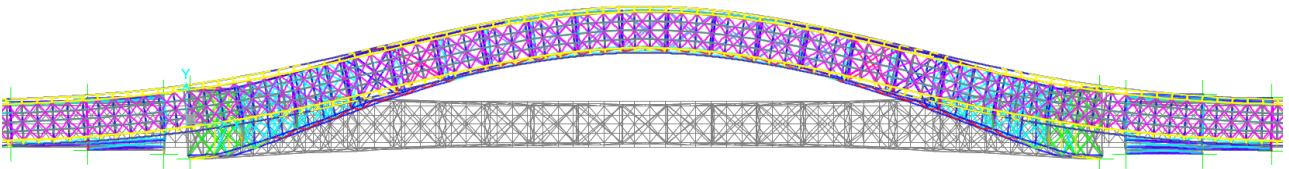


Figura 10 Vista en planta de modelo elaborado en SAP2000. Imperfección geométrica horizontal en arco según tabla D.9. de Eurocódigo 3. Parte 2. (Deformada x100)

3.6 Calibración del modelo

Al contar con los cálculos de Proyecto Original ha sido posible cotejar los resultados obtenidos en el modelo elaborado respecto a los obtenidos por el Projectista.

Se ha comprobado que las reacciones obtenidas en el apoyo de los arcos por acción de la carga permanente son muy similares a las obtenidas en Proyecto (diferencias del orden del 5 %). También se ha comprobado que los axiles de compresión que se obtienen en los soportes de las palizadas son muy similares a los reflejados en Proyecto Original.

Estos resultados ponen de manifiesto la gran maestría del Projectista que, mediante cálculos manuales, determinó acertadamente el peso de la estructura a pesar de su gran complejidad.

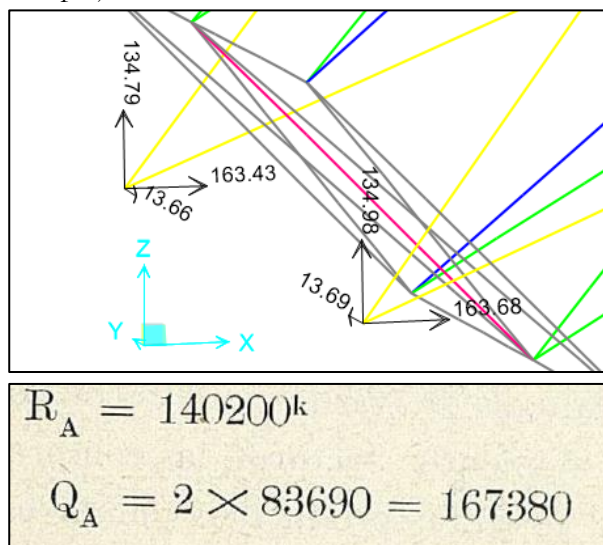


Figura 11 Comparativa de reacciones por carga permanente en arco. Arriba: Modelo de cálculo elaborado en SAP2000 (t). Abajo: Reacciones obtenidas en Proyecto [1]

También se han analizado los modos de vibración de la estructura comprobando que los modos fundamentales se corresponden con la excitación global de la estructura y que, además, son coherentes con una estructura metálica de gran flexibilidad como es el caso del puente analizado. El primer modo de vibración

obtenido es vertical asimétrico con una frecuencia de 1.37 Hz mientras que el segundo modo de vibración es horizontal con un periodo de vibración de 1.48 Hz.

Estos resultados son del mismo orden de magnitud que los obtenidos en la prueba de carga dinámica realizada dentro de la rehabilitación del puente que tuvo lugar en el año 2013 [3].

3.7 Criterio de verificación estructural

La comprobación estructural de los perfiles se lleva a cabo en Estado Límite Último de acuerdo con los criterios del Eurocódigo 3. Esta comprobación se lleva a cabo de forma automática por el software de cálculo, donde se han implementado las correspondientes combinaciones de cálculo para todas las fases de andamiaje y escenarios de cálculo previstos en las distintas alternativas de andamiaje propuestas por el Contratista.

Las verificaciones se han centrado en los principales elementos del puente como son los cordones principales de los arcos, soportes de las palizadas y las vigas principales del tablero.

Respecto a las uniones, no se ha llevado a cabo su verificación ya que en la información disponible no se encuentra su completa definición y, por tanto, no ha sido posible llevar a cabo su comprobación. Ante esta situación, de acuerdo con lo prescrito en Proyecto Original, se ha asumido que las uniones entre los distintos elementos se han dimensionado para resistir los esfuerzos de cálculo solicitantes sin reducir la capacidad resistente de los elementos que se unen.

En lo relativo a la verificación de la cimentación no se ha considerado necesaria ya que, dada la alta capacidad portante del terreno en que se apoya el arco, se estima que la cimentación de los arcos puede resistir, de forma holgada, las reacciones generadas durante el repintado del puente.

3.8 Resultados obtenidos

Tras las verificaciones realizadas se comprueba que la alternativa con menor número de fases de andamiaje y andamios más pesados solo resulta válida, cumpliendo de forma muy estricta, para el caso de evitar solapamiento entre fases de andamiaje. Lógicamente, la alternativa con mayor número de fases y andamios más ligeros también resultó válida con un pequeño margen de seguridad estructural adicional.

Teniendo en cuenta la posibilidad de que existiesen daños por corrosión no localizados dado el difícil acceso para la inspección de la estructura y ante la posibilidad de que las uniones hubiesen perdido parte de su capacidad resistente, ACL recomendó el empleo de la alternativa con un mayor número de fases con andamios más ligeros para, de este modo, disponer de una mayor seguridad estructural frente a cualquier imprevisto que pudiera producirse durante la obra.

Además, para asegurar el correcto comportamiento de la estructura, se propuso la realización de una prueba de carga estática con un peso similar al de los andamios a emplear en obra.

4. Realización de prueba de carga estática

La prueba de carga estática realizada se llevó a cabo con objeto de verificar el adecuado funcionamiento de la estructura, comparando los resultados teóricos esperados en el modelo con los datos que se obtienen de la prueba de carga.

Para su realización se empleó un camión de 3 ejes cargado hasta alcanzar un peso total de 20 Tn. El peso del camión se estableció de forma que resultase representativo de las fases de andamiaje a disponer en las zonas críticas del arco, que se corresponden con los arranques (palizadas de gran altura) y a cuartos de luz del arco, según los resultados teóricos del modelo.

Se definieron un total de 7 hipótesis de carga distribuidas a lo largo del tablero sobre el arco coincidiendo con la posición más crítica de las fases de andamiaje propuestas.



Figura 12 Realización de prueba de carga estática

Durante la realización de la prueba se observaron importantes deformaciones por efecto térmico en la estructura, alcanzándose valores de flecha vertical en la clave del arco del orden de los 25 mm en el margen derecho y de los 35 mm en margen izquierdo.

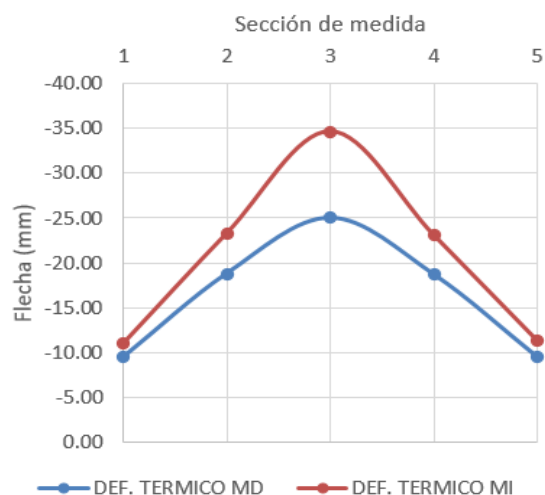


Figura 13 Flecha vertical en arco por efecto térmico medida durante realización de prueba de carga

Teniendo en cuenta las deformaciones esperadas por la prueba de carga eran del orden de los 10 mm, este fenómeno alteraba los resultados obtenidos, por lo que fue necesario realizar numerosas medidas en vacío para poder desacoplar las deformaciones generadas por el peso del camión respecto a las deformaciones generadas por el efecto térmico.

Una vez corregidas las deformaciones causadas por efectos térmicos en los datos obtenidos en obra, se verificó que las

deformaciones inducidas por el peso del camión eran coherentes con los resultados teóricos previstos por el modelo y, en consecuencia, la prueba de carga se consideró satisfactoria. Tras este éxito de la prueba de carga, se procedió al montaje de los andamios en el tramo correspondiente del arco para llevar a cabo su repintado.

5. Desarrollo de la obra

La obra se ha desarrollado con normalidad, no produciéndose ningún problema relacionado con la implantación de los andamios a lo largo del arco para su repintado.

Los andamios empleados se componen por un carro superior apoyado en el tablero con sendos voladizos que permitieron el acceso a las caras laterales y parte inferior del tablero. Junto con este carro se instaló un andamio colgado de la estructura que se apoya tanto en la parte inferior de tablero como en los cordones del arco para permitir el acceso tanto a las palizadas como al propio arco.



Figura 14 Andamiaje: Carro superior

El andamio colgado se fue modificando en función de su posición en el arco para adaptarse a la sección variable de la estructura.

Con objeto de acelerar los trabajos, se volvió a estudiar la posibilidad de solape entre fases de andamiaje y se aceptó el montaje de 2 andamios independientes siempre que cada uno de ellos se encontrase a cada lado de la clave del arco.

Las obras finalizaron satisfactoriamente a principios de 2024, abriéndose la estructura al tráfico el 25 de marzo de 2024.

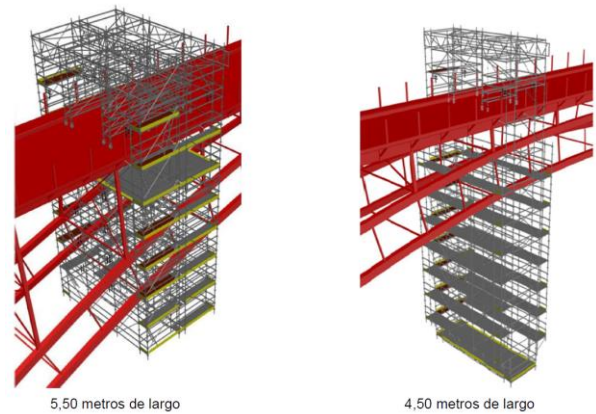


Figura 15 Esquema 3d de carro superior y andamios en distintas posiciones del arco



Figura 16 Instalación de dos andamios de forma simultánea en el tramo del arco

Referencias

- [1] Ribera, J. Eugenio (1897). *Estudio sobre los grandes viaductos*. Revista de Obras Públicas.
- [2] Ribera, J. Eugenio (1914) Puente-viaducto de Requejo, sobre el Duero, en Pino (Zamora) *Revista de Obras Públicas*. 2035: 471–475.
- [3] Llombart Jaques, J. Antonio, Rodríguez Bragado, David (2015) Rehabilitación del puente-viaducto de Requejo (Puente de Pino) *Revista de Obras Públicas*. 3562: 93–103.
- [4] Comité Europeo de Normalización (2010), *Eurocódigo 3. Proyecto de estructuras de acero*, Madrid, UNE.
- [5] BOE-A-2021-13681 (2021). *Código Estructural*. Madrid, Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana