

Viaductos de Bolintxu. Diseño

Bolintxu viaducts. Design

**Guillermo Capellán Miguel^a, Alejandro Godoy Ansótegui^b, Emilio Merino Rasillo^c,
Julio González Zalduondo^d y Jesús Posadas Carmona^e**

^a Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Arenas & Asociados, Ingeniería de Diseño. Technical Dir. gcapellan@arenasing.com

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Arenas & Asociados, Ingeniería de Diseño. Project Manager. agodoy@arenasing.com

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Arenas & Asociados, Ingeniería de Diseño. Dir. Of. Madrid. emerino@arenasing.com

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Arenas & Asociados, Ingeniería de Diseño. Project Manager. jgonzalez@arenasing.com

^e Ingeniero Técnico de Obras Públicas. Arenas & Asociados, Ingeniería de Diseño. Site Supervisor. jposadas@arenasing.com

RESUMEN

Los viaductos de Bolintxu salvan el valle homónimo, de elevado interés medioambiental, mediante arcos mixtos de gran rebajamiento, contruidos en vertical y posteriormente abatidos, salvaguardando así el valle durante la construcción. El innovador diseño de estos viaductos ha supuesto un gran desafío técnico. El uso de la tipología mixta en los arcos, y su proceso constructivo por abatimiento, ha requerido el desarrollo de herramientas de diseño paramétricas que permiten la rápida iteración de los modelos de cálculo, así como su exportación a 3D, lo que ha facilitado el uso de la tecnología BIM desde el inicio del proyecto, haciendo posible alcanzar los exigentes grados de precisión que requería la ejecución.

ABSTRACT

The Bolintxu viaducts span the valley of the same name, which is a highly-valued ecological area, by means of very shallow composite arches, built vertically and then lowered to protect the valley during construction. The innovative design of these viaducts was a great technical challenge. The use of the composite typology in the arches and their construction by lowering required the development of parametric design tools that allow a fast iteration of the calculation models as well as their 3D export. This allowed the use of BIM technology from the beginning of the project, making it possible to achieve the high accuracy requirements necessary for the execution.

PALABRAS CLAVE: arco mixto, rótula deslizante, abatimiento, paramétrico, BIM, monitorización

KEYWORDS: composite arch, sliding hinge, tilt down, parametric, BIM, monitoring

1. Introducción

Los viaductos de Bolintxu se enmarcan dentro de las actuaciones de la Infraestructura del Tramo 9B, Bolintxu-Venta Alta, de la Fase I de la Variante Sur Metropolitana de Bilbao, estando formados por dos tableros tipo arco inferior paralelos que conectan los túneles de Arnategi y Seberetxe salvando el valle de Bolintxu. El valle es un área medioambientalmente muy sensible, ubicado dentro de una zona protegida, lo que condiciona notablemente tanto el diseño como

el procedimiento constructivo utilizado. El requisito de una construcción respetuosa con el entorno natural, sumado al escaso espacio disponible en ambas laderas, lleva al desarrollo de una solución innovadora mediante arcos mixtos de gran rebajamiento, contruidos en vertical para su posterior abatimiento, reduciendo de este modo la afección al valle y generando una solución medioambientalmente sostenible y perfectamente integrada.

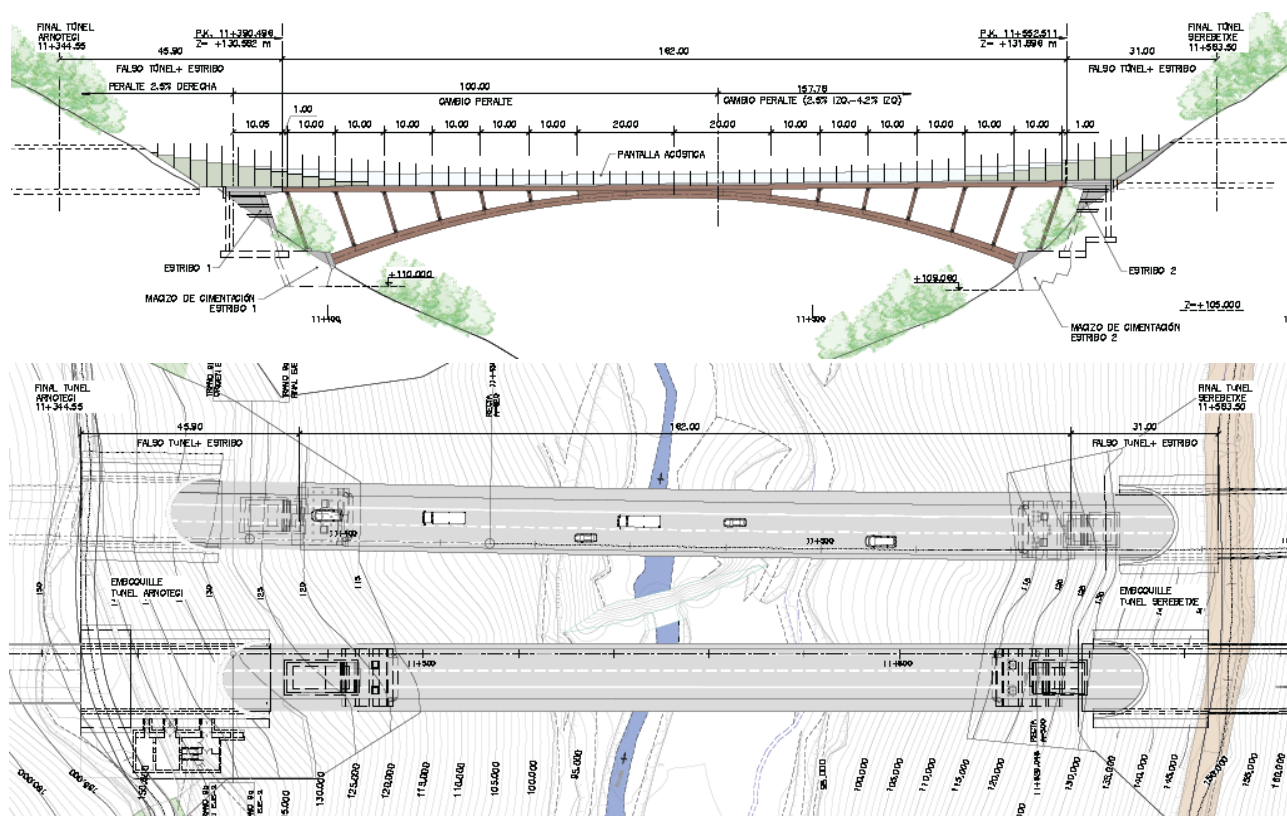


Figura 1. Alzado y planta general

2. Condicionantes de diseño

El diseño de la estructura presentó numerosos condicionantes desde el origen, siendo necesario adoptar soluciones innovadoras para su resolución. La ubicación sobre una zona protegida, con el requerimiento de minimizar las afecciones sobre la misma, demandaban una solución integrada, sostenible y de limitada ocupación, lo que eliminó las alternativas de soluciones empotradas o de estructura superior.

Adicionalmente, los viaductos se encuentran encajados entre dos túneles, pertenecientes a tramos de licitación diferentes y adjudicados a empresas distintas, lo que supuso una gran limitación de los accesos y del espacio de trabajo disponible, provocando que se descartaran alternativas de construcción de tipo empuje.

La construcción mediante grúa o blondín tampoco resultó viable por motivos técnicos o económicos, por lo que finalmente se optó por

el arco mixto construido por abatimiento como la solución más apropiada para la ejecución.

La búsqueda de reducir la ocupación en el valle derivó en configuraciones de arco muy rebajadas, requiriendo el uso de tipología mixta, alcanzando relaciones flecha-luz de 1/11.

Para evitar los riesgos de derrames sobre el valle, o de llenado incorrecto del interior de los arcos, se descartó la opción de relleno interior mediante bombeo a presión, aprovechando la construcción en vertical de los arcos para su llenado. Esto se hizo a costa de aumentar el peso de los semiarcos a abatir, pero garantizando así el correcto llenado interior y la formación de juntas de hormigonado ortogonales a la directriz. El relleno interior del arco, sumado al uso de acero con resistencia mejorada a la corrosión (cor-ten), conforman una solución sostenible de gran durabilidad y reducido coste de mantenimiento.

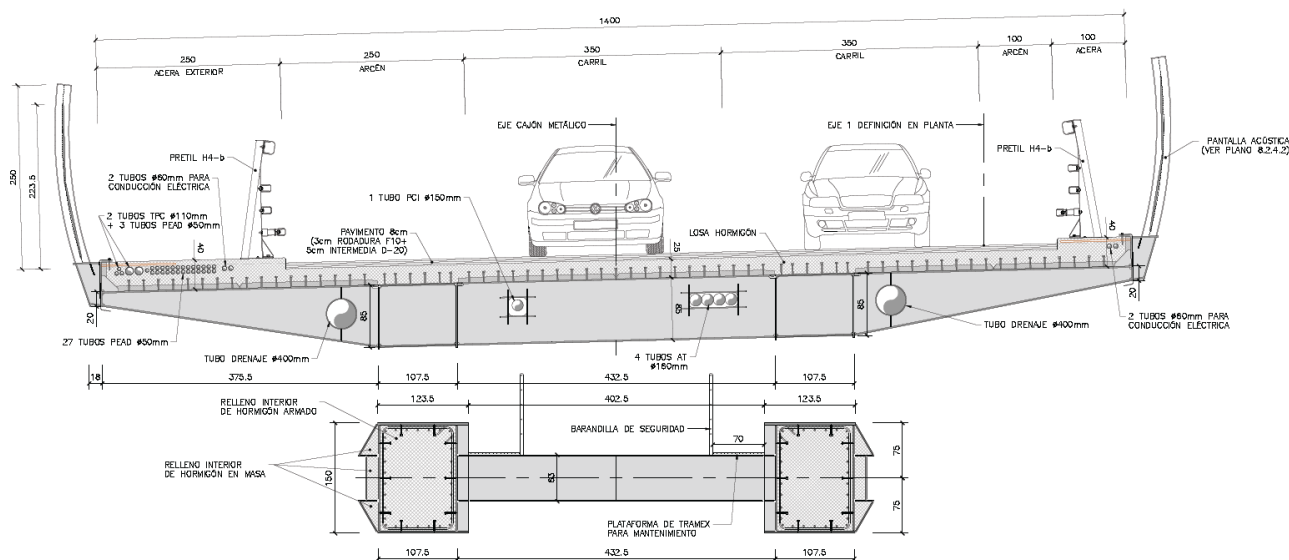


Figura 2. Sección tipo

3. Descripción de la solución

La longitud resultante de las estructuras es de 162 y 142 m, con arcos de 143 y 128m de luz respectivamente. Cada arco está formado por dos nervios paralelos de sección cajón mixta y directriz parabólica, con una separación de 5.40 m entre ejes y unidos mediante cruces de San Andrés armadas con perfiles metálicos doble T.

La sección de los arcos es de canto variable, partiendo de 2.20 m en los arranques hasta 1.50m en centro-luz (Fig.4). El tablero, con una anchura de 14 m y dos carriles de 3.50 m, está formado por dos cajones metálicos paralelos y un entramado de vigas transversales y costillas, que junto con la losa superior conforman un tablero mixto (Fig.2). La sección de los arcos, del tablero y de los montantes presentan la misma anchura, que se mantiene constante en 1.075 m.

La conexión tablero-arco se realiza mediante montantes metálicos articulados dispuestos cada 10 m en dirección ortogonal a la directriz del arco, quedando la parte central del arco maclada con el tablero, en una sección integral. Esto hace que se reduzca el alzado de la estructura, que, junto con el rebajamiento del arco, limita la ocupación de la estructura en el valle.

3.1 Cimentaciones y subestructura

La cimentación de la estructura se realiza de forma directa contra la roca, mediante macizos escalonados que se adaptan a la pendiente de las laderas (Fig.3). La cimentación de los arcos y los estribos, formados por cajones huecos, quedan maclados, formando un elemento único que equilibra las reacciones durante el abatimiento.

Durante la fase de diseño se valoró la posibilidad de prolongar el tablero, reduciendo la longitud del estribo, aunque esto provocaba solicitaciones excesivas. La posibilidad de instalar un tramo independiente biapoyado, también se descartó por cuestiones de mantenimiento y durabilidad, por lo que finalmente se optó por prolongar el estribo en voladizo hasta el encuentro con el tablero, presentando este únicamente una coacción lateral mediante topes instalados en el extremo del voladizo, quedando el tablero apoyado sobre el último montante.

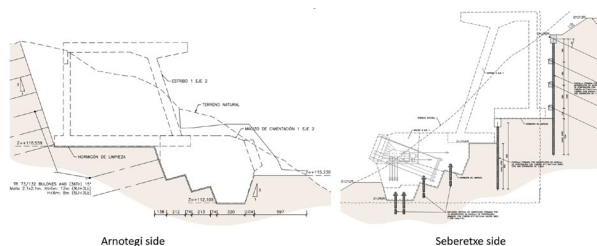


Figura 3. Esquema de subestructura

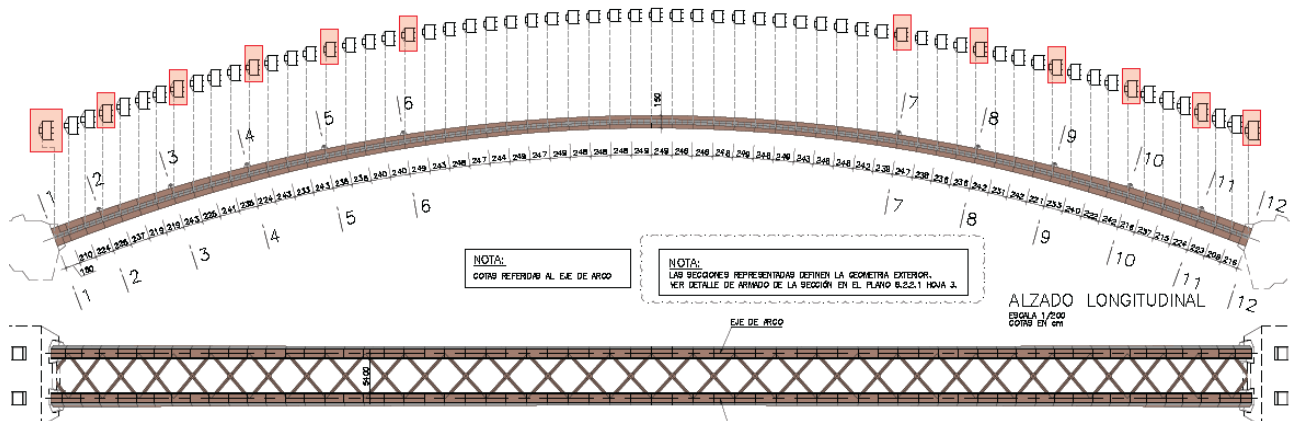


Figura 4. Alzado y planta de arco

3.2 Arco

La sección del arco se ha diseñado específicamente para adaptarse a la tipología mixta (Fig.3), liberando al máximo su interior para facilitar el montaje de la ferralla, tanto longitudinal como transversal, disponiendo únicamente diafragmas transversales de rigidización interna cada 2.50 m.

Los rigidizadores longitudinales de los paneles que conforman el cajón se disponen por el exterior, conformando en las caras laterales unas células de caras inclinadas, lo que, además de mejorar la estética del arco, optimiza su comportamiento aerolástico.

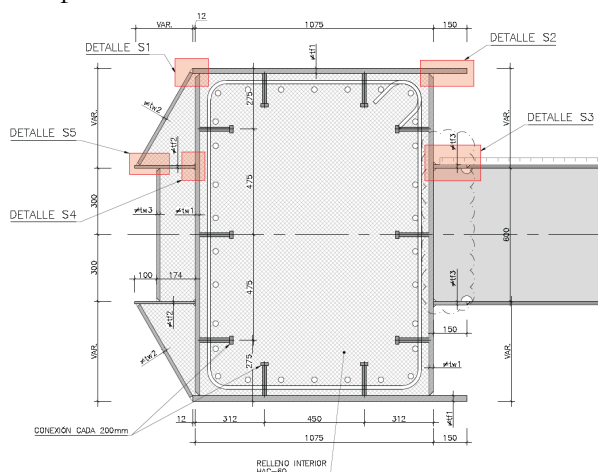


Figura 5. Sección tipo de arco

Los diafragmas transversales disponen de ventanas para facilitar el llenado y de agujeros para el paso de la ferralla longitudinal,

garantizando su continuidad (Fig.4). En las juntas entre tramos se realizan empalmes mediante manguitos roscados.

El interior de la sección se rellena con hormigón autocompactante HAC-60, que junto con los conectores y el armado dispuesto en su interior permite el desarrollo completo de la capacidad resistente de la sección mixta.



Figura 6. Fotografía de la sección del arco en taller

La anchura de los cajones de tablero y arco coinciden, permitiendo que las orejetas de los montantes se instalen en prolongación de sus almas, quedando unidas en la zona maclada.



Figura 7. Fotografía de armado de tramo de arco

3.3. Tablero

El tablero está formado por dos cajones metálicos paralelos y vigas transversales con costillas cada 3.33m.

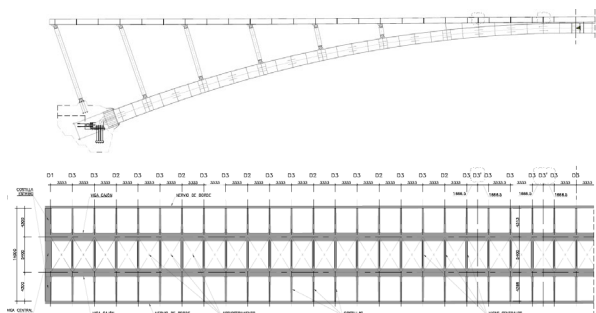


Figura 8. Alzado y planta de tablero

La pendiente transversal de la calzada se materializa inclinando las alas, manteniendo las almas verticales, de modo que siempre se encuentren alineadas con las del arco. Para mantener los ejes de giro de los montantes alineados, y permitir deformaciones simétricas, las diferencias de cota entre nervios se absorben con la variación de altura de las orejetas.

Los cajones son huecos, conformados en tramos estancos, con unas dimensiones de 1.075x0.85m.

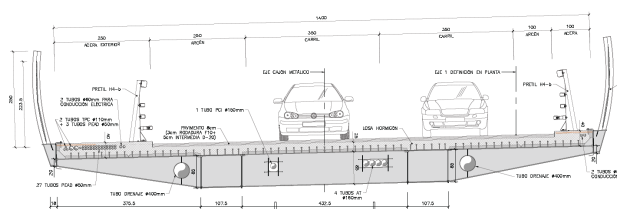


Figura 9. Sección tipo de tablero.

La sección mixta del tablero se completa con una losa superior de 25 cm de espesor, que se ejecuta mediante prelosas planas de 7 cm de canto. A lo largo del tablero discurren numerosas conducciones (tubos de drenaje, de protección contra incendios de los túneles, suministro eléctrico o de comunicaciones), para lo que resulta necesario disponer pasos en las vigas transversales y costillas, y bandejas colgadas. En los laterales de la sección se dispone de unas células que sirven de rigidización para el anclaje de los montantes de la pantalla acústica, con altura variable entre 2 y 4 m.

3.4 Rótulas de giro

En la base de los arcos se instalan unas rótulas provisionales que permiten el giro de los semiarcos durante el abatimiento (Fig.8). El procedimiento prevé que estas rótulas puedan admitir movimientos de corrección, como prevención ante una posible desviación geométrica durante la maniobra. Para ello se diseñan unos bastidores deslizantes, apoyados sobre unas bases con superficies PTFE-inox. Estos bastidores quedan bloqueados mediante barras de anclaje vertical y horizontal, y se disponen unos topes metálicos removibles o “stoppers”, en prolongación de las orejetas, para la transmisión de las reacciones horizontales al macizo de cimentación ($R_H=10000\text{kN/nervio}$).

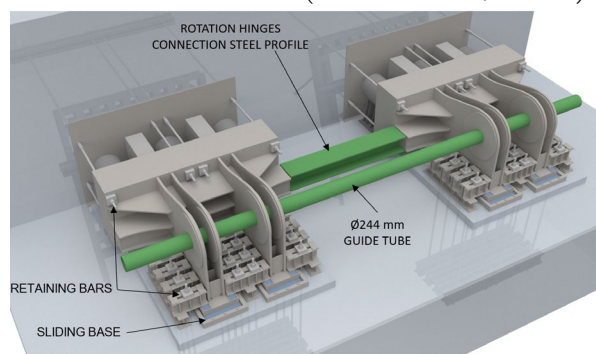


Figura 10. Detalle de rótulas deslizantes.

Las rótulas admiten movimientos de corrección de $\pm 85\text{mm}$ mediante el accionamiento de unos gatos dispuestos entre el bastidor trasero de la rótula y el macizo (3 uds 500 tn/nervio). La corrección puede realizarse en sentido longitudinal o en transversal mediante desplazamiento variable en cada nervio. Una vez abatido, el arco se empotra en el macizo de cimentación mediante barras postesadas (Fig.9).

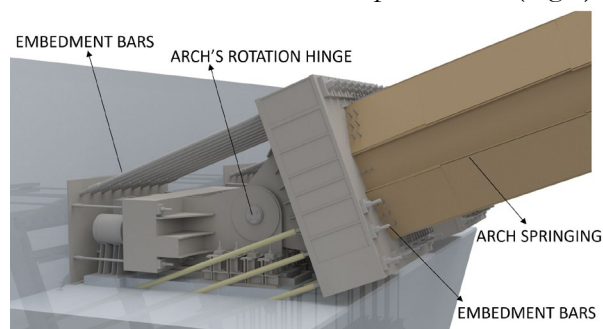


Figura 11. Detalle de arranque de arco empotrado

4. Cálculo

3.1 Diseño paramétrico

El diseño de la estructura se planteó desde un inicio como paramétrico, para lo que se desarrollaron herramientas específicas con Rhino-Grasshopper que permitían la modificación de cualquier parámetro geométrico de la estructura y su traslado inmediato al modelo de cálculo, pudiendo iterar ágilmente hasta converger en la configuración óptima.

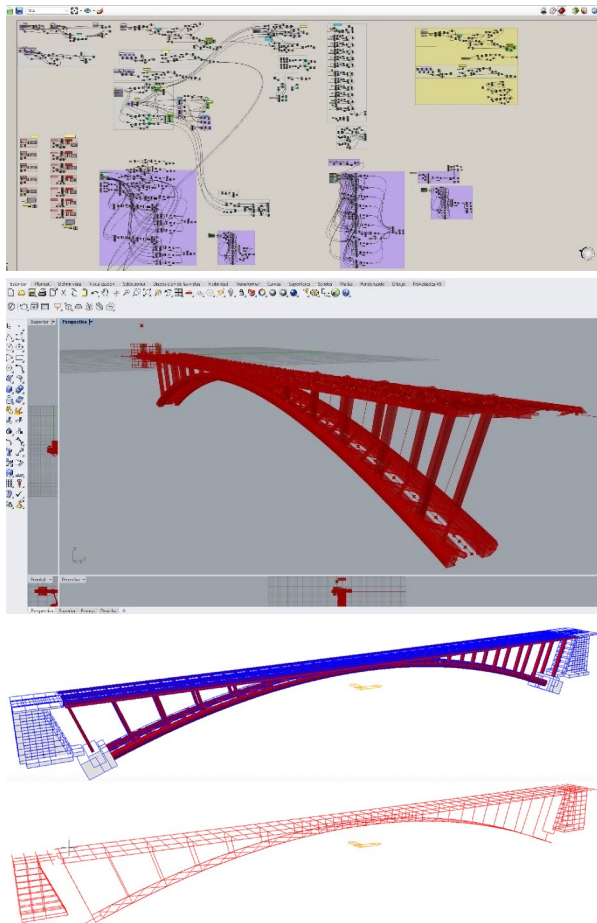


Figura 12. Herramientas de trabajo paramétrico (Rhino+Grasshopper+Midas)

Las variables principales evaluadas fueron la directriz del arco, las dimensiones de las diferentes secciones y los espesores de las chapas. En cada iteración, una vez modificada la geometría, esta se vuelca de forma automática a los modelos 3D y de cálculo, disponiendo siempre de la información actualizada para los diferentes usos o análisis.

3.2 Diseño en BIM

El trabajo colaborativo mediante la tecnología BIM ha sido fundamental para poder alcanzar los grados de precisión requeridos por este proyecto. Los modelos 3D, desarrollados inicialmente a partir de las herramientas paramétricas, se comparten y actualizan de forma dinámica entre todos agentes interesados. En nuestro caso, principalmente por el taller metálico (GOROS) y la UTE PAGABIDEA (*Gaimaz, Cantábricas, Geotunel y Campezo*).

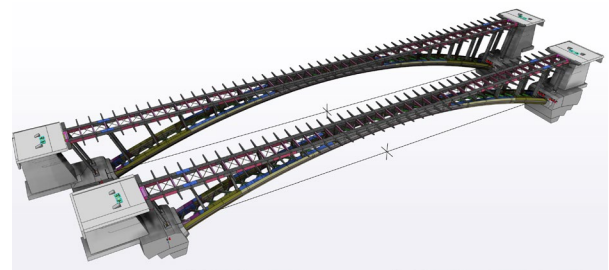


Figura 13. Modelo 3D federado

A partir de los modelos 3D se han podido desarrollar todos los planos de fabricación para la estructura metálica y replantear de forma precisa la posición de cada elemento en obra. Además, con la incorporación de la ferralla a los modelos 3D se han podido detectar colisiones e interferencias entre los diferentes elementos, siendo esto de vital importancia en las cimentaciones, donde se instalaron numerosas estructuras auxiliares.

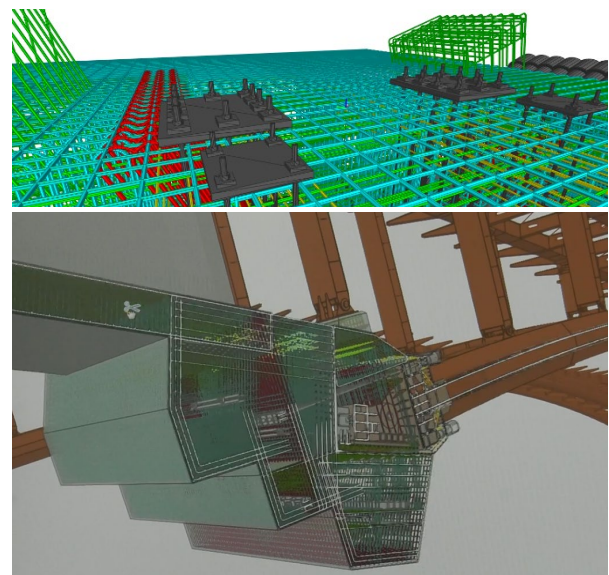


Figura 14. Modelado BIM de ferralla

3.3 Metodología de cálculo estructural

El cálculo de la estructura se ha realizado con el programa MidasCivil, importando la geometría del modelo paramétrico.

El cálculo es evolutivo, analizando todas las fases del proceso constructivo (Fig.13), incluidas las fases de montaje vertical en tramos y cada uno de los steps del abatimiento. Esto, además de proporcionar la envolvente completa de solicitaciones sobre la estructura, permite conocer la evolución de las deformaciones sobre la misma, necesarias para anticipar las deformaciones conjuntas de torre y estructura durante el ensamblaje en vertical, permitiendo corregir la posición de montaje de cada tramo, así como obtener la geometría contraflechada final de fabricación.

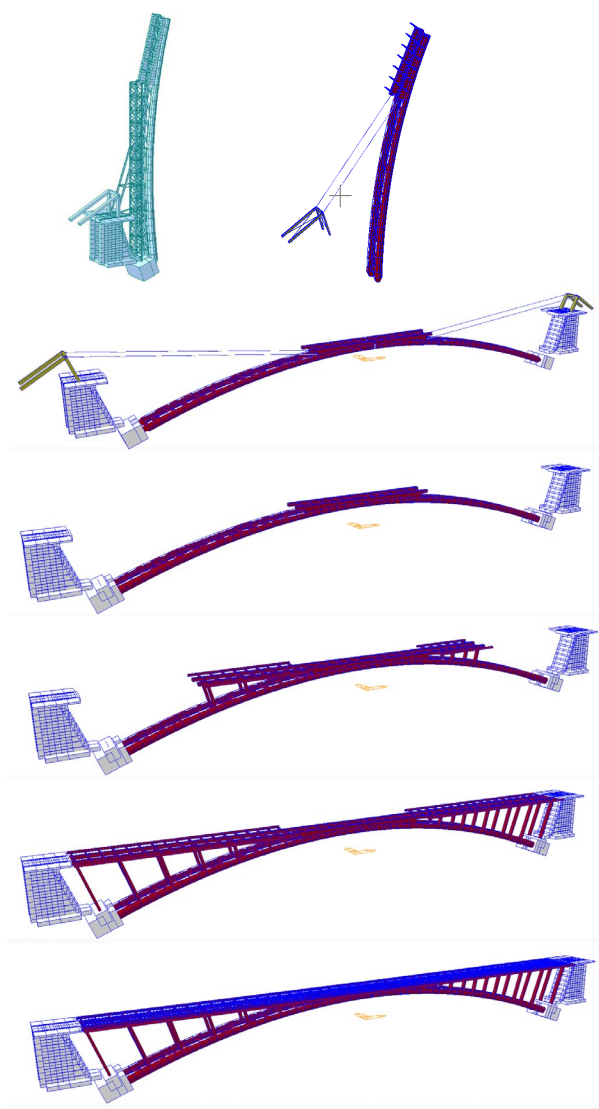


Figura 15. Modelo evolutivo según las fases del PC

Al tratarse de una estructura mixta, se ha considerado la no linealidad geométrica y de material en el análisis de los arcos, mediante un proceso incremental iterativo en el que se analiza el estado tensional de las secciones, obteniendo el grado de fisuración resultante para cada una de ellas, repitiendo el proceso hasta converger en una situación estable. Para ello, y teniendo en cuenta los esfuerzos de primer orden, se define un número de secciones críticas en el arco, para las que se determina la combinación de cargas pésima, y para las que se realiza el análisis detallado.

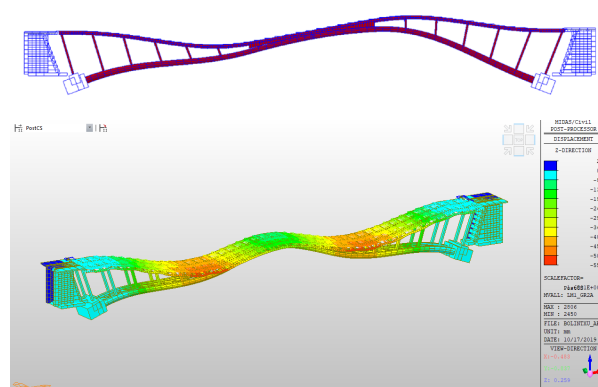


Figura 16. Gráficas de deformaciones

Adicionalmente al modelo general de cálculo se realizaron numerosos modelos independientes de detalle para la verificación de diferentes elementos: análisis de los paneles del arco durante el vertido del hormigón, obteniendo la altura máxima y la velocidad de vertido; modelo de análisis transversal del tablero o modelos de la rótula de giro inferior.

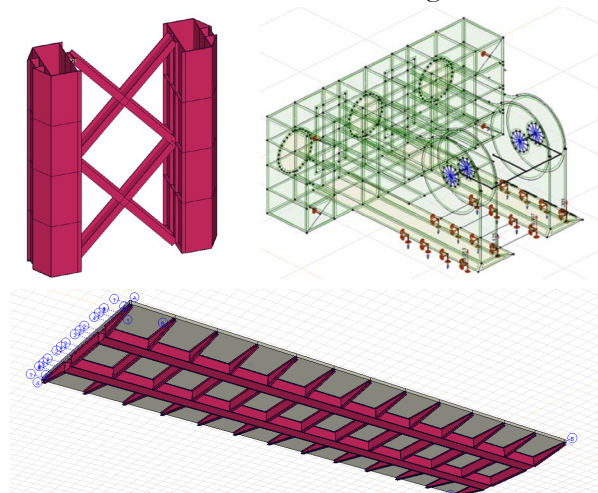


Figura 17. Modelos adicionales de detalle



Figura 18. Vista general abatimiento

4. Abatimiento

La singular maniobra de abatimiento, en la que se descenden semiarcos de hasta 75 m de longitud y 1150 tn de peso barriendo un ángulo de 75°, supone una operación de gran responsabilidad, demandando el diseño de varios sistemas innovadores para su correcto desarrollo y control.

Algunos de ellos ya se han descrito en este documento, como es el caso de las rótulas deslizantes, diseñadas para la rotación de los semiarcos pero con capacidad de movimiento para una eventual corrección geométrica. Otros de los más relevantes se describen a continuación.

4.1 Sistema de monitorización

La gran responsabilidad que supone la maniobra requiere el diseño de un sistema de control que permita conocer el comportamiento de la estructura durante el abatimiento, tanto en la evolución de las reacciones en los diferentes elementos como de la geometría, para su interpretación y la coordinación de sus fases.

Para ello se instala un sistema de sensores distribuidos en toda la estructura que permite conocer de forma precisa y en tiempo real sus estados tensionales y geométricos. Todo ello se comunica mediante un software, desarrollado específicamente por la empresa TEKNÉS, que permite acceder a la información de forma remota, pudiendo conocer el estado de la estructura en cada momento y agilizar la toma de decisiones. El propio software incorpora un sistema de avisos en el caso de detectar que alguno de los parámetros rebasa los valores límites previamente fijados.



Figura 19. Fotografía de puesto de control

Dentro de los elementos controlados se destacan los siguientes:



Figura 20. Fotografías de secuencia de abatimiento

- **Torres auxiliares:** Se instalan galgas extensométricas, inclinómetros y anemómetros para conocer su estado tensional, deformacional y la velocidad del viento.
- **Rótulas deslizantes:** Se instalan galgas extensométricas en las orejetas principales para conocer el estado tensional de las mismas, así como extensómetros en el bastidor para detectar los movimientos.



Figura 21. Fotografía de sensores en rótula

- **Macizo de retenida:** Se instalan células de carga en el 50% de los anclajes de retenida del marco del abatimiento. Adicionalmente, se instalan palpadores y extensómetros de varilla a diferentes profundidades para detectar posibles movimientos relativos de la cimentación que pudieran alertar del fallo en alguno de los anclajes al terreno.

- **Marco de abatimiento:** Se instalan galgas extensométricas para conocer el estado tensional de los elementos que forman el marco, y detectar cualquier anomalía en el mismo.
- **Unidades hidráulicas:** Las propias unidades de MAMMOET, para la rotura de equilibrio o tiro, incorporan sensores que proporcionan la carga actuante y el recorrido del mismo, total y parcial.
- **Semiarcos:** Se instalan galgas extensométricas, inclinómetros y dianas para conocer el estado tensional y la geometría durante el abatimiento. Las dianas se toman de forma automática mediante estaciones totales robotizadas, comparando, sus trayectorias con las teóricas (Fig.20). Esto resulta de vital importancia, ya que al encontrarse en la parte central arco y tablero maclados, no hay margen de tolerancia para el ajuste geométrico tras el cierre en clave.

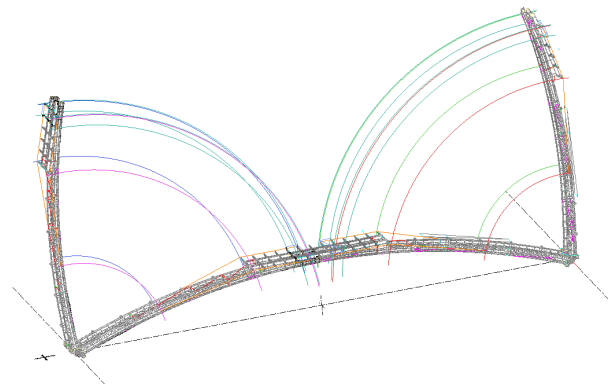


Figura 22. Esquema de trayectorias teóricas



Figura 23. Fotografía de estructura acabada

4.2 Cierre en clave

Se diseña un sistema de cierre en clave, mediante la instalación en los extremos de los semiarcos de unos topes que conforman un mecanismo de enclavamiento mecánico, mediante una solución de tipo machihembrada.

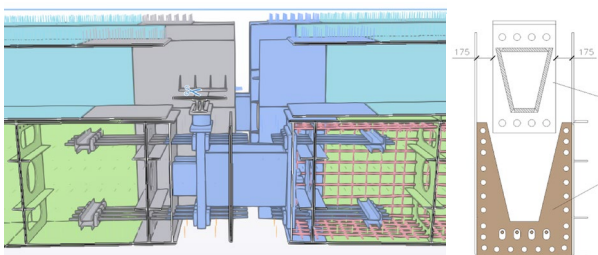


Figura 24. Esquema de sistema de cierre en clave

Este sistema está diseñado para admitir desviaciones transversales de hasta 170mm y longitudinales de ± 150 mm, recentrando los semiarcos. En caso de superar estos valores se debe desbloquear la rótula base y activar la corrección geométrica mediante gatos hasta quedar dentro de la tolerancia requerida. El sistema de enclavamiento dispone de unas barras WR32 que se instalan mediante manguitos roscados, y unos topes para el bloqueo provisional de los semiarcos una vez enfrentados. A continuación, se ejecuta una meseta de mortero en el frente del tope macho, y una vez esta alcanza la resistencia mínima requerida (24h) se descargan parcialmente los cables para que la clave entre en carga, pudiendo

proceder entonces con los trabajos de soldadura. Finalmente, se monta la ferralla y se rellena el interior con hormigón para garantizar la continuidad estructural de cada nervio del arco. Por último, se procede a la descarga completa de los cables.

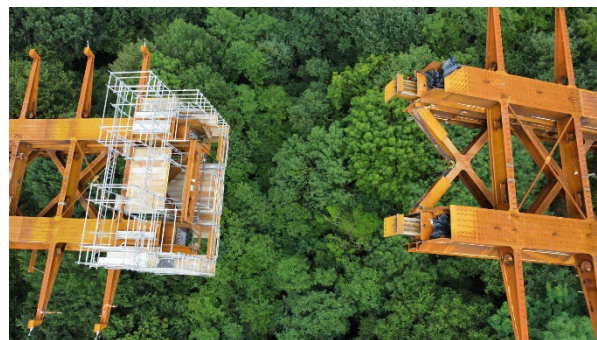


Figura 25. Fotografía de aproximación de semiarcos

6. Conclusiones y agradecimientos

La singular tipología y ejecución de los viaductos de Bolintxu ha supuesto un enorme desafío técnico de diseño. El resultado final es el de una estructura innovadora, elegante, sostenible y perfectamente integrada en el valle que salva.

Se agradece a la propiedad (INTERBIAK) y a la UTE constructora (*Gaimaz, Cantábricas, Geotunel y Campezo*) por la confianza depositada en ARENAS & ASOCIADOS para el diseño de estos viaductos, tanto en fase de proyecto como de Asistencia Técnica especializada durante la construcción.