

Viaductos de Bolintxu. Proceso constructivo

Bolintxu viaducts. Construction procedure

**Guillermo Capellán^a, Alejandro Godoy^b, Rafael Martínez Turrado^c, Emilio Merino^d,
Julio González Zalduondo^e, Jesús Posadas^f y Verónica Arrayago^g**

^aDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Arenas & Asociados, Ingeniería de Diseño. Dir. Técnico. gcapellan@arenasing.com

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

^cIngeniero Técnico de Obras Públicas. Mammoet. Sales Manager. Rafael.Martinez@mammoet.com

^dIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Arenas & Asociados, Ingeniería de Diseño. Director Madrid. emerino@arenasing.com

^eIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Arenas & Asociados, Ingeniería de Diseño. Jefe de Proyecto. jgonzalez@arenasing.com

^fIngeniero Técnico de Obras Públicas. Arenas & Asociados, Ingeniería de Diseño. Supervisor en obra. jposadas@arenasing.com

^gIngeniera Civil. Mammoet. Project Manager. Veronica.Arrayago@mammoet.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, siendo la primera realización de este tipo en el mundo. La ejecución de estos viaductos ha supuesto un gran desafío técnico y coordinativo, debido a la complejidad del proceso constructivo y al limitado espacio de trabajo disponible, al quedar los viaductos encajados entre los dos túneles de ambas laderas. El abatimiento de los semiarcos mixtos, con 71m de longitud y 1150 tn de peso, resulta una maniobra muy espectacular, requiriendo de unidades hidráulicas de 1250 tn y unas medidas de control y monitorización muy exigentes.

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, being the first of its kind worldwide. The execution of these viaducts has been a great technical and coordination challenge, due to the complexity of the construction process and the restrained working space available, as the viaducts are wedged between the two tunnels on both slopes. The lowering of the 71 m long and 1150 tons composite arches is a very spectacular maneuver, requiring 1250 tons hydraulic units and very demanding control and monitoring measures.

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

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

1. Introducción

Los viaductos de Bolintxu están formados por dos tableros tipo arco paralelos que conectan los túneles de Arnotegi y Seberetxe.

El cruce sobre el valle de Bolintxu, de gran valor medioambiental, requiere el diseño de unas estructuras muy singulares y una

construcción respetuosa con el entorno natural, lo que sumado al escaso espacio disponible en ambas laderas lleva al desarrollo de una solución mediante arcos mixtos de gran rebajamiento, contruidos en vertical para su posterior abatimiento.

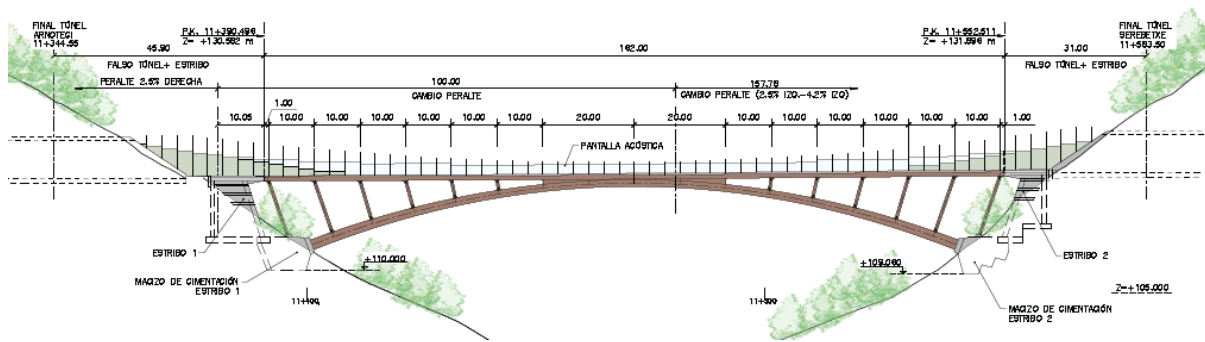


Figura 1. Alzado general

La longitud 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 metálicas. El tablero, con una anchura de 14 m, está formado por dos cajones metálicos y un entramado de vigas transversales y costillas, que junto con la losa superior conforman un tablero mixto (Fig.2). La conexión tablero-arco se realiza mediante montantes articulados dispuestos cada 10 m en dirección ortogonal al arco, quedando la parte central maclada, con una sección integral.

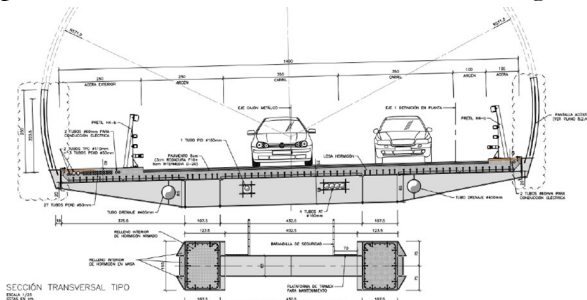


Figura 2. Sección transversal

2. Subestructura

2.1 Excavaciones y sostenimientos

La presencia de discontinuidades en el macizo rocoso susceptibles de rotura planar exigió la construcción de recintos provisionales de sostenimiento mediante pantallas ancladas de micropilotes o taludes reforzados mediante bulonado (Fig.3 y 4). Estos se ajustaron de forma

estricta a la geometría de la cimentación para minimizar la afección al valle.

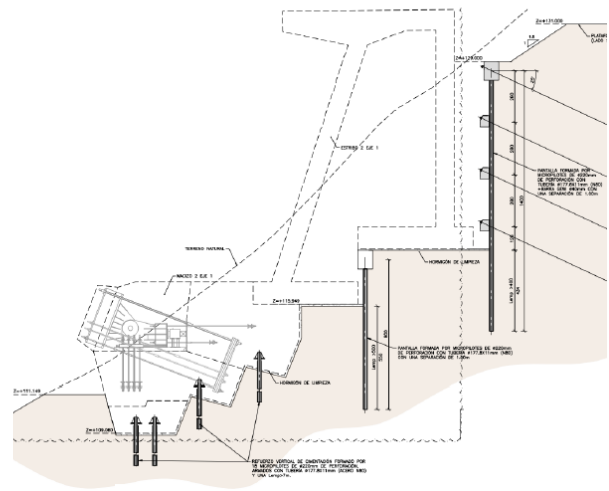


Figura 3. Sección longitudinal de subestructura



Figura 4. Recinto de excavación

2.2 Cimentación y estribo

La cimentación de los arcos se realiza mediante un macizo escalonado de cimentación, con apoyo directo sobre roca. La cimentación se refuerza con micropilotes para las fases constructivas, para evitar que el peso del semiarco en vertical active alguna cuña inestable de terreno. El cuerpo del estribo, formado por un cajón hueco de hormigón, presenta un paramento frontal inclinado, siendo paralelo al último montante. La losa superior del estribo presenta un voladizo de canto variable, que sirve de conexión con el tablero, el cual no apoya sobre el estribo sino en el último montante.

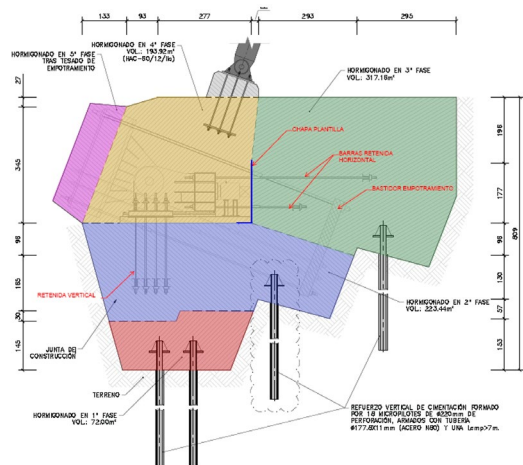


Figura 5. Fases de ejecución del macizo

El macizo de cimentación, dado su elevado volumen ($>1000\text{m}^3$), se ejecuta en 5 fases (Fig.5), debiendo dejar embebidos todos los bastidores auxiliares que sirven de anclaje para la rótula provisional de giro y las barras del empotramiento definitivo.

El alzado del estribo se ejecuta mediante encofrado trepante, la losa superior mediante prelosas y el voladizo frontal mediante cimbra.



Figura 6. Ejecución del alzado del estribo

2.3 Rótula de giro

Tras la ejecución de las tres primeras fases del macizo de cimentación y la finalización de los estribos, se procede a la instalación de las rótulas de giro. Estos elementos son los encargados de permitir el giro de los semiarcos durante el abatimiento, requiriendo un elevado grado de precisión, tanto en la fabricación en taller como en el montaje en obra. Para ello se prevé un meticuloso procedimiento de montaje, contemplando que la fabricación de las rótulas de ambos nervios se realice en un bastidor conjunto, de modo que se asegure la consecución de un eje único de giro (Fig.7 y 8).

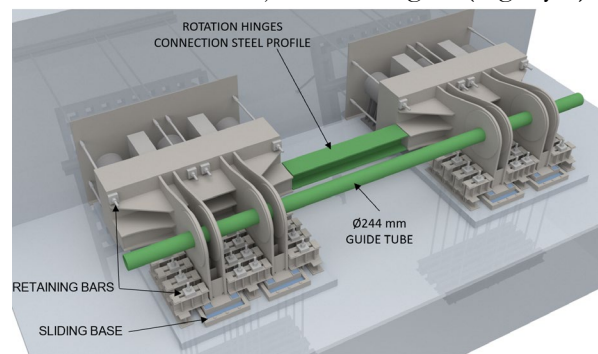


Figura 7. Detalle de rótulas deslizantes

Para corregir posibles desviaciones geométricas en planta durante el abatimiento las rótulas se diseñan con una base deslizante, permitiendo movimientos de corrección ($\pm 85\text{mm}$) mediante el accionamiento de unos gatos dispuestos entre la rótula y el macizo (3 uds 500 tn/nervio). La transmisión de la reacción horizontal de las rótulas al macizo ($R_H=10000\text{kN/nervio}$) se realiza mediante unos topes metálicos fijos, dispuestos en prolongación de las orejetas principales.

Las rótulas disponen, además, de unos bastidores para su anclaje provisional en horizontal y vertical, lo que se realiza mediante barras de alto límite elástico, garantizando así la fijación de la misma durante toda la fase constructiva, permitiendo, a su vez, su liberación en el caso de resultar necesario activar el mecanismo de corrección geométrica durante el abatimiento.



Figura 8. Montaje de rótulas

3. Ejecución de semiarcos en vertical

3.1 Torres auxiliares

Previamente al montaje de los tramos metálicos que conforman los semiarcos se coloca la torre auxiliar de arriostramiento, responsable de soportar el semiarco durante su ensamblaje en vertical. Estas torres, que alcanzan los 61 m de altura, se apoyan en la cara superior del macizo de cimentación y se anclan mediante puntales en el estribo (Fig.9).



Figura 9. Primer tramo de torre auxiliar anclada a estribo y rótulas instaladas

La torre se ejecuta en tramos de unos 15m de longitud, y dispone de una escalera interior, que sirve de medio de acceso a las diferentes secciones de trabajo.

3.2 Montaje de semiarcos

Los semiarcos se construyen en vertical mediante tramos metálicos previamente ensamblados en bancada de obra. Las longitudes de los tramos son variables para adaptarse a la capacidad de izado de las grúas, requiriéndose grúas desde 500 a 800 tn.

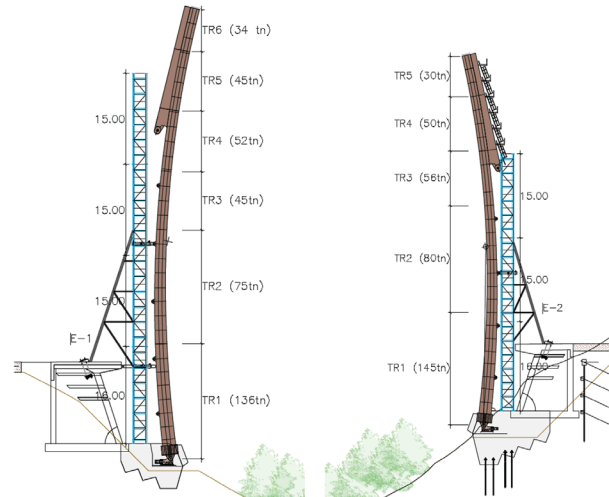


Figura 10. Tramificación de semiarcos Eje1 y Eje2

Los tramos se presentan con el anterior con la ayuda de unas guías auxiliares que permiten alojar gatos para el ajuste en vertical. Una vez verificado el posicionamiento del tramo las guías se fijan mediante tornillos y el extremo superior se ancla a la torre mediante un bastidor regulable. Al ser la torre un elemento flexible la geometría de posicionamiento de los tramos debe recalcularse según avanza la construcción.

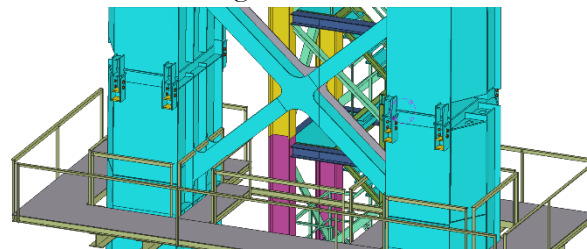


Figura 11. Plataforma de trabajo y guías de montaje

La zona de unión presenta varias ventanas para el acceso a todas las soldaduras y al montaje de los tramos de ferralla interior. La continuidad de armadura se realiza mediante solape por traslape en la zona de unión, prolongando la ferralla previamente instalada en taller mediante tramos de barra con empalmes mecánicos mediante manguitos roscados.

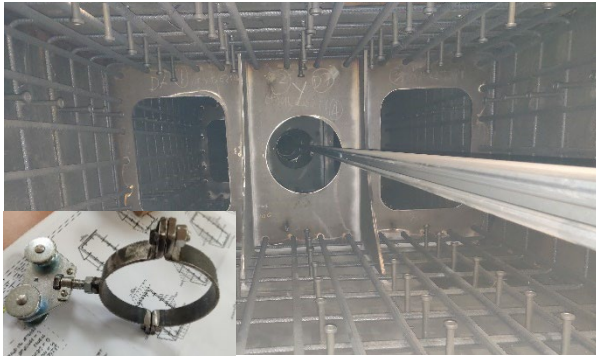


Figura 12. Sistema guiado de hormigonado interior

3.3 Hormigonado interior

Una vez finalizada la unión entre tramos, se procede al relleno interior de los cajones metálicos con hormigón autocompactante de 60 MPa, necesario para la materialización de la sección mixta. El vertido se realiza por tongadas de unos 2.5m de altura (6.5m^3) y cada 45min, alternando entre ambos nervios, a una velocidad controlada que no genere sobrepresiones en las paredes del cajón metálico que puedan ocasionar abolladuras. El vertido se realiza por bombeo con manguera tremie guiada a través de los mamparos de rigidización interna mediante un perfil auxiliar (Fig.12 y 13).

4. Abatimiento

4.1 Macizos de anclaje de retenida

Los macizos de retenida se emplean para el anclaje del tirante trasero del marco de volteo al terreno. Cada macizo dispone de 4 alineaciones con 4 anclajes a diferentes inclinaciones (30° , 40° , 50° y 60°), formados por cables Y1860 S7 de $9\Phi 0.6''$ tesados a 150tn.

En el 50% de los anclajes se disponen células de carga para controlar la evolución de sollicitación. Adicionalmente, se instalan extensómetros de varilla a diferentes profundidades y se realizan controles topográficos periódicos para el control de posibles movimientos de la cimentación.



Figura 13. Bombeo de hormigón al interior del tramo

El macizo de retenida se precomprime contra el terreno, buscando que la reacción de tiro no llegue en ningún caso a generar descompresión.

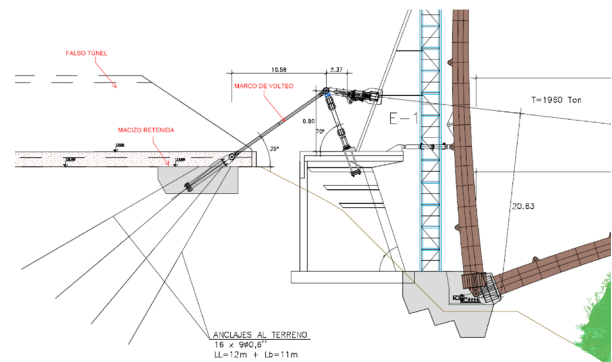


Figura 14. Esquema del macizo de retenida

Para la ejecución del macizo, con unas dimensiones de $11 \times 9 \times 3\text{m}$, se instalan bastidores auxiliares para la sujeción de las barras de anclaje del tirante de retenida y el guiado de los anclajes al terreno y de los extensómetros (Fig.15).

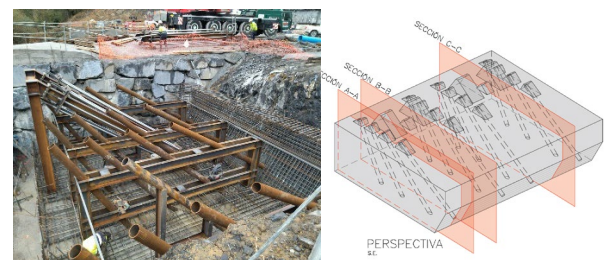


Figura 15. Bastidor aux. y geometría de macizo

Previamente a la ejecución de los anclajes se ejecutan unos macizos de prueba junto a los definitivos, con 3 anclajes cada uno. En estos elementos se ensayan diferentes configuraciones de los anclajes y sus bulbos para validar la solución y caracterizar la roca, y poder así afrontar la maniobra con mayores garantías.

4.2 Marcos de volteo

Por cada nervio del arco se dispone un marco de retenida o volteo (Fig. 16 y 17), que a su vez está formado por patas dobles, tanto en el puntal delantero como en el tirante trasero. Cada una de las patas del tirante trasero está armada con 2 perfiles IPE600 armado en S355 y soldados entre ellos, quedando arriostrados con la otra pata mediante diagonales y montantes en base a perfiles UPN220, formando una celosía tipo Long, o en cruces de San Andrés.

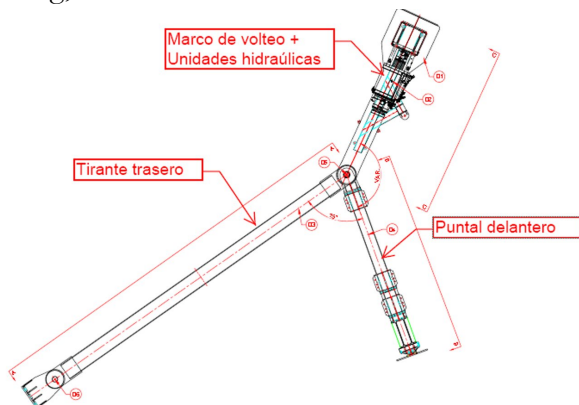


Figura 16. Esquema del marco de volteo



Figura 17. Imagen del marco de volteo

El puntal delantero está compuesto por columnas modulares atornilladas de sección en cajón cerrado, en base a doble UPN400. En cabeza, embulonado sobre la conjunción de tirante y puntal, se sitúa el marco de volteo y soporte que aloja la unidad de izado, armado en acero S690.

En cuanto a la unidad en sí misma, se trata del modelo de gato de izado por cables más grande del mercado, con una capacidad a carga máxima de 1250 tn.

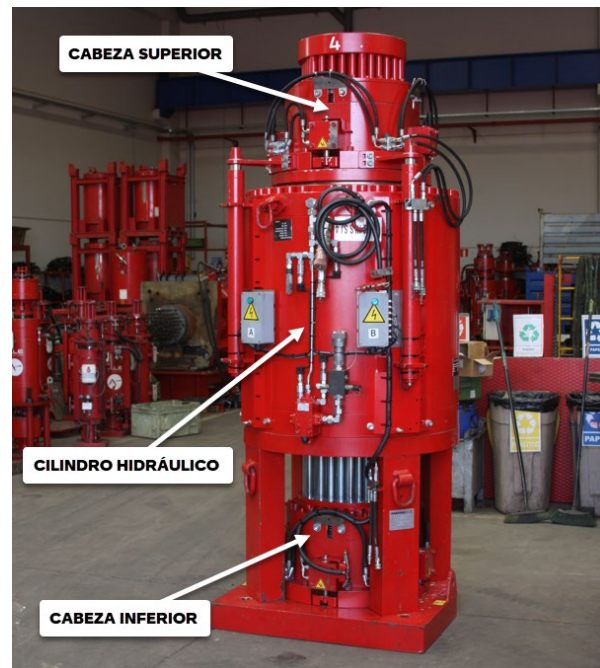


Figura 18. Unidad de izado de 1250 tn

4.3 Rotura de equilibrio

La rotura del equilibrio de los semiarcos en su posición de montaje se produce por empuje de 3 cilindros hidráulicos de 64,3 tn de capacidad y 1400 mm de carrera efectiva actuando sobre cada nervio, aproximadamente a la cota de la losa superior del estribo.



Figura 19. Operación de rotura de equilibrio

Los gatos se vinculan al estribo mediante perfiles metálicos 4HEB300 y se conectan al nervio del semiarco con uniones embulonadas. Una vez liberado el arco de su anclaje temporal a la torre, se produce desplome e inicio de rotación del arco por extensión de los vástagos de los cilindros y el consiguiente aumento en la longitud de los cables del marco de retenida.

El control de toda la operación se lleva a cabo mediante tablas de datos previstos discretizadas por fases y subfases, en las que se establece una correlación entre distintos parámetros que se controlan en tiempo real durante la maniobra, tales como el ángulo de giro de los semiarcos, la carrera y presión/carga de los cilindros de rotura de equilibrio, la carga en las unidades hidráulicas de 1250 tn y el incremento de longitud de los cables de retenida. La fase 1 y sus subfases corresponden a la rotura de equilibrio

TABLA CONTROL EJE 1 LADO ARNOTEGI (NERVIO 2x75 t + 1x64t)

Fase	Ángulo relativo [°]	Ángulo del anclaje [°]	Descenso total (mm)	Carrera_HLS (mm)	Q_Unidad (KN)	Q_emp (KN)	Presion (bar)	Carrera gatos (mm)	Nº Gatos empuje
1.1	0	92.2	0.0	0.0	777.7	1400	203	206	3
	0.5	91.7	217.6	217.6	840.0	1400	203	342	3
	1	91.2	436.5	218.9	901.5	1400	203	479	3
	1.5	90.7	656.8	220.3	962.5	1400	203	615	3
	2	90.2	878.4	221.6	1022.8	1400	203	752	3
	2.5	89.7	1101.2	222.8	1082.6	1400	203	889	3
	3	89.2	1325.2	224.0	1141.8	1400	203	1026	3
	3.5	88.7	1550.3	225.2	1200.6	1400	203	1163	3
	4	88.2	1776.6	226.3	1258.8	1400	203	1300	3
	4.3	87.9	1912.9	136.3	1293.6	1400	203	1383	3
1.2	4.3	87.9	1914.1	1.2	1177.7	1200	245	1383	2
	4.3	87.9	1918.1	3.9	810.8	600	304	238	1
1.3	4.5	87.7	2009.1	91.1	834.6	600	304	292	1
	5	87.2	2237.7	228.6	893.9	600	304	428	1
	5.5	86.7	2467.3	229.6	952.7	600	304	564	1
	6	86.2	2697.9	230.6	1011.1	600	304	701	1
	6.5	85.7	2929.4	231.5	1069.1	600	304	837	1
	7	85.2	3161.9	232.5	1126.7	600	304	973	1
	7.5	84.7	3395.3	233.3	1183.9	600	304	1109	1
	8	84.2	3629.4	234.2	1240.9	600	304	1245	1
	8.5	83.7	3868.0	238.5	951.0	0	0		0

Figura 20. Tabla de control de rotura de equilibrio. Eje 1, Lado Arnotegui. Fase 1

4.4 Abatimiento

A partir de la rotura de equilibrio, el giro de los semiarcos es inducido por su peso propio y por el incremento paulatino y controlado de la longitud de los cables de retenida, que “dejan ir” cada semiarco. Para ello se actúa sobre las unidades de 1250 tn, incrementando la longitud de cable en tramos iguales a la carrera de la unidad: 600 mm.

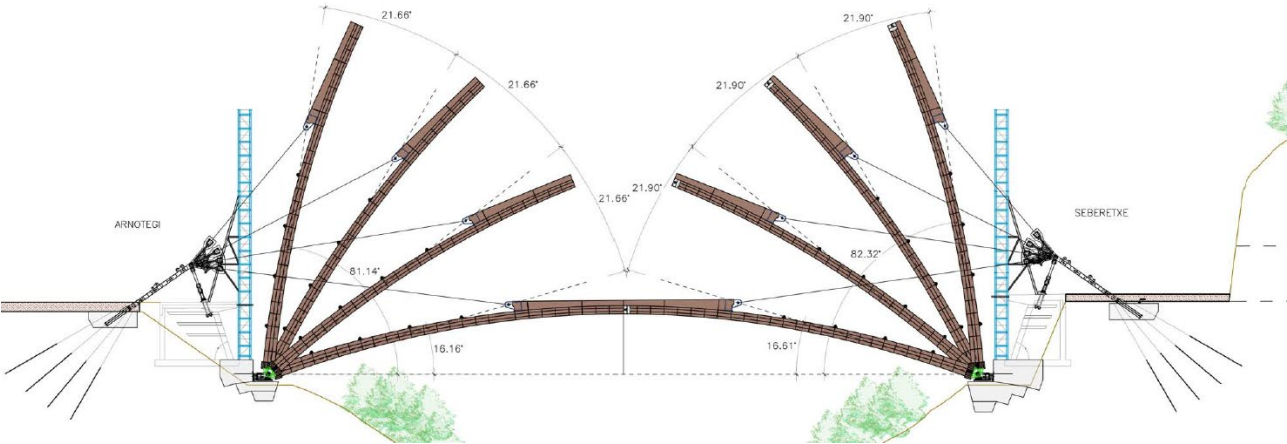


Figura 23. Alzado general abatimiento

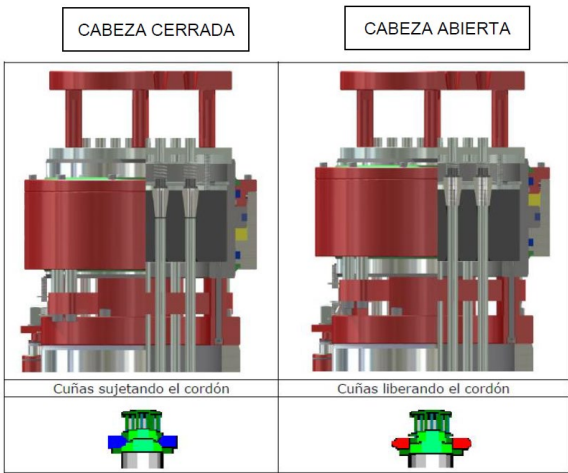


Figura 21. Situaciones de cabeza cerrada y abierta de la unidad de 1250 tn

Las unidades hidráulicas constan de un cilindro principal hueco a través del cual pasan cables de acero similares a los utilizados en el pretensado. En los extremos del cilindro se sitúan las denominadas cabeza superior e inferior, que son las encargadas, mediante un gato que acciona un sistema de cuñas, de anclar mecánicamente el cable a cada cabeza correspondiente en cada fase, bien sea de extensión o bien de retracción del vástago.

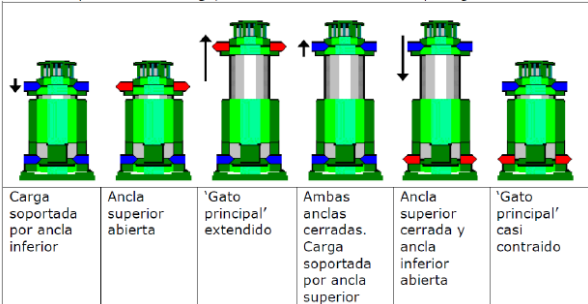


Figura 22. Secuencia de accionamiento de la unidad en modo descenso



Figura 24. Vista general abatimiento

Mediante el accionamiento de la unidad, controlado por operador a través del programa de manejo, se producen sucesivas aperturas y cierres de ambas cabezas, así como extensiones y retracciones del vástago, lo que provoca el paulatino incremento de longitud de las madejas de cable de retenida, y con ello, el giro de los semiarcos sobre las rótulas inferiores.

TABLA CONTROL EJE 1 LADO ARNOTEGI (NERVIO 3x64 I)

Fase	Ángulo relativo (°)	Ángulo del anclaje (°)	Descenso total (mm)	Carrera_HLS (mm)	Q_Unidad (KN)	Q_emp (KN)	Presion (bar)	Carreras gatos (mm)	Nº Gatos empuje
4	50	42.2	23798.3	452.6	5526.5	0	0	0	0
	51	41.2	24248.1	449.8	5643.1	0	0	0	0
	52	40.2	24695.0	447.0	5760.4	0	0	0	0
	53	39.2	25139.1	444.0	5878.4	0	0	0	0
	54	38.2	25580.1	441.0	5997.1	0	0	0	0
	55	37.2	26018.1	438.0	6116.5	0	0	0	0
	56	36.2	26452.9	434.8	6236.6	0	0	0	0
	57	35.2	26884.5	431.6	6357.5	0	0	0	0
	58	34.2	27312.9	428.4	6479.3	0	0	0	0
	59	33.2	27737.9	425.0	6601.8	0	0	0	0
	60	32.2	28159.5	421.6	6725.3	0	0	0	0
	61	31.2	28577.7	418.2	6849.6	0	0	0	0
	62	30.2	28992.4	414.7	6974.8	0	0	0	0
	63	29.2	29403.5	411.1	7101.1	0	0	0	0
	64	28.2	29810.9	407.5	7228.3	0	0	0	0
	65	27.2	30214.7	403.8	7356.6	0	0	0	0
	66	26.2	30614.8	400.0	7486.0	0	0	0	0
	67	25.2	31011.0	396.2	7616.5	0	0	0	0
	68	24.2	31403.4	392.4	7748.2	0	0	0	0
	69	23.2	31791.9	388.5	7881.2	0	0	0	0
70	22.2	32176.4	384.5	8015.4	0	0	0	0	
71	21.2	32557.0	380.5	8150.9	0	0	0	0	
72	20.2	32933.4	376.5	8287.9	0	0	0	0	
73	19.2	33305.8	372.4	8426.3	0	0	0	0	
74	18.2	33674.0	368.2	8566.2	0	0	0	0	
75	17.2	34038.1	364.0	8707.7	0	0	0	0	
76	16.2	34397.8	359.8	8850.9	0	0	0	0	

Figura 25. Tabla de control de abatimiento Eje 1, Lado Arnotegui. Fase 4 (final)

El abatimiento se divide en tres fases que siguen a la rotura de equilibrio (Fig.23),

momento en el que la carga en los gatos de rotura llega a cero, y a partir del cual continúan incrementándose los valores de carga en las unidades de retenida, hasta alcanzar valores máximos finales de 8851KN.

Durante la maniobra, los valores de longitud de cables y la carga en las unidades de retenida se pueden leer en tiempo real en el ordenador de control de las unidades, mientras que el giro se controla con topografía, utilizando estaciones robotizadas que obtienen la geometría de los arcos en tiempo real durante el abatimiento, pudiéndose comparar con las trayectorias teóricas.

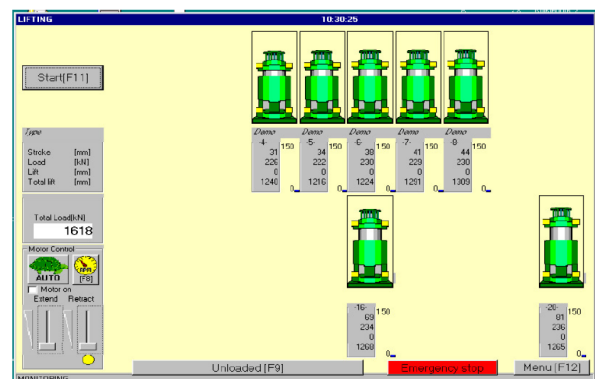


Figura 26. Ejemplo de captura de pantalla típica del ordenador de control de unidades

4.5 Cierre en clave

En los extremos de los semiarcos se instalan unos topes que conforman un mecanismo de enclavamiento mecánico, mediante una solución de tipo machihembrado. Este sistema está diseñado para admitir desviaciones transversales de hasta 170mm y longitudinales de ± 150 mm. 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 y unos topes para el bloqueo provisional de los semiarcos. A continuación, se ejecuta una meseta de mortero, y una vez esta alcanza resistencia se realiza una descarga parcial de los cables para que la clave entre en carga, pudiendo continuar entonces con los trabajos de soldadura, y finalmente, con el relleno interior de hormigón. Por último, se procede a la descarga completa de los cables.

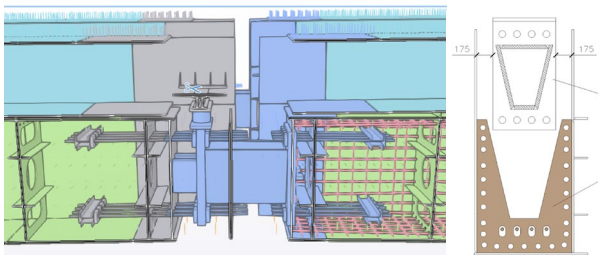


Figura 27. Sistema de cierre en clave

4.6 Monitorización

Durante todo el abatimiento, y en tiempo real, además de las reacciones en los anclajes y los movimientos del macizo de retenida, se controlan las reacciones en las rótulas, las cargas en cables de tiro y las trayectorias de descenso de cada uno de los semiarcos, para lo que se utilizan unas estaciones totales robotizadas que toman de forma continua unas dianas previamente instaladas a lo largo de los semiarcos, y las comparan con las trayectorias teóricas. La gestión de toda esta información permite conocer el estado de la estructura en tiempo real durante toda la maniobra y poder anticipar la toma de decisiones.

4.6 Empotramiento en la base

Una vez abatidos los semiarcos, ejecutada la continuidad estructural en la clave y descargados los cables, se procede al empotramiento definitivo de la base de los arcos, para lo que en primer lugar se procede a la ejecución de la fase 4 del macizo de cimentación. El empotramiento se realiza mediante el tesado de 19 barras por nervio, con diámetros de 47 y 75mm.



Figura 28. Sistema de empotramiento en arranque

5. Tablero

5.1 Montaje de tramos y montantes

El montaje del tablero se realiza por tramos de sección completa y 10 m de longitud, llevando incorporado el montante y sus rótulas inferiores para su presentación conjunta sobre el arco. La ejecución se realiza de forma simétrica, desde la zona central hacia los estribos.

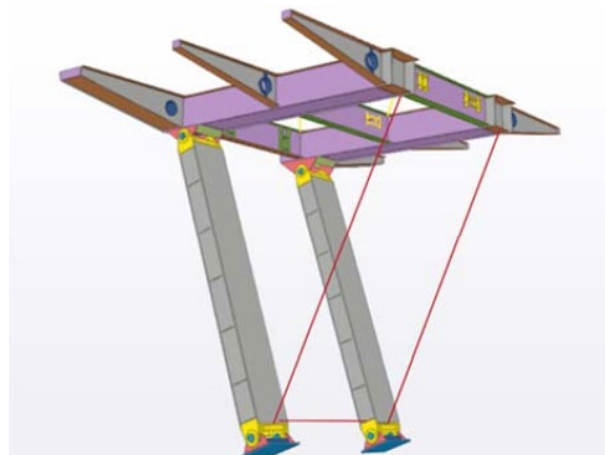


Figura 29. Tramo de montaje de tablero

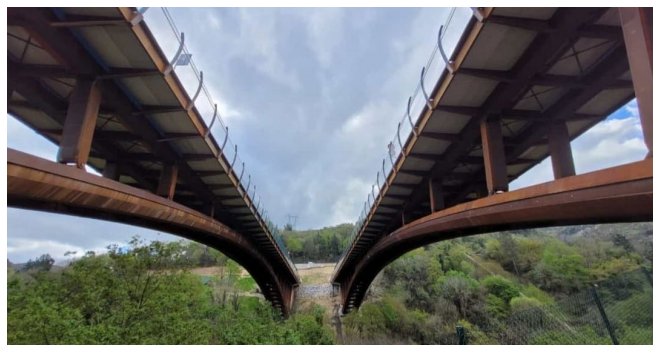


Figura 30. Fotografías del puente acabado

5.2 Instalación de prelosas y ejecución de losa superior

Con el tablero completo se procede a la instalación de las prelosas mediante grúa, para a continuación, proceder con el ferrallado in situ y finalmente hormigonar la losa superior.



Figura 31. Instalación de prelosas

Por último, se ejecuta el firme y se instalan los pretiles y las pantallas acústicas, siguiendo estas últimas una distribución variable para adaptarse a los exigentes requerimientos medioambientales del entorno, resultando más altas junto a los túneles y de menor altura en el centro-luz

6. Conclusiones y agradecimientos

La innovadora tipología y el método de ejecución de los viaductos de Bolintxu ha supuesto un enorme desafío técnico, con un complejo proceso constructivo mediante abatimiento, requiriendo el desarrollo y uso de numerosos elementos singulares y específicos para su ejecución y control.

El resultado final es el de una estructura elegante, perfectamente integrada y completamente respetuosa con el sensible entorno del valle sobre el que cruza, el cual se ha preservado durante toda la construcción.

Se agradece a todos los participantes en la obra por su excelente trabajo, haciendo especial mención a los siguientes:

- Propiedad: INTERBIAK.
- Constructor: UTE PAGABIDEA (*Gaimaz, Cantábricas, Geotunel y Campezo*).
- Taller metálico: GOROS S. COOP.
- ATDO: UTE HEGOALDE II (*Fulcrum, Dair, Idom y Geoconsult*).
- Heavy Lifting: MAMMOET.
- Monitorización: TEKNÉS.
- Medios auxiliares: ULMA.
- Grúas: IBARRONDO.
- Diseño e ingeniería de construcción: ARENAS & ASOCIADOS.