

# PUENTE ARCO MIXTO DE LA VICARIA SOBRE EL EMBALSE DE LA FUENSANTA

**Santiago PEREZ-FADÓN**

Ingeniero de Caminos

FERROVIAL-AGROMÁN

Director Técnico

sp.fadon@ferrovial.es

**José Emilio HERRERO**

Ingeniero de Caminos

FERROVIAL-AGROMÁN

Jefe Area. Est. Obra Civil

j.e.herrero@ferrovial.es

**Luis MARTÍN-TERESO**

Ingeniero de Caminos

FERROVIAL-AGROMÁN

Responsable del proyecto

l.martin@ferrovial.es

## Resumen

El puente de La Vicaria es un arco mixto de tablero intermedio situado sobre el embalse de La Fuensanta en el río Segura, Albacete (España). La longitud total del viaducto es 260 m, con 2 arcos de luz 168 m. Cada arco está inclinado  $10^\circ$  hacia el interior, a ambos lados del tablero. La sección transversal del arco es un cajón con chapas plegadas relleno con hormigón autocompactante con conectadores. La sección del tablero comprende 2 vigas metálicas longitudinales, de sección en U, conectadas con una losa de hormigón. El sistema constructivo consiste en ensamblar un arco atirantado (bowstring) de 120 m en el fondo del valle y después elevarlo 40m con gatos hidráulicos para conectarlo con el resto de la estructura, construida en voladizo desde las laderas.

**Palabras Clave:** Arco, mixto, atirantado, corten, autocompactante, izado, anclajes, péndolas, voladizos, bowstring.



## 1. Introducción

El Embalse de La Fuensanta y el río Segura divide el término municipal de Yeste y sus aldeas en 2 partes. Este pueblo se encuentra enclavado en la unión de las Sierras de Alcaraz, Segura y la Sagra, y es principal núcleo de población de una aislada y montañosa región en el Sur de la provincia de Albacete.

El puente forma parte de la futura carretera que unirá Yeste con el pueblo de Letur, y dará acceso directo al pueblo desde el Este (hasta ahora solo tiene comunicación desde el Norte), evitando bordear todo el embalse y reduciendo el recorrido en 50 minutos. Su única calzada consta de 2 carriles para vehículos y 2 aceras.

El propietario del embalse y promotor del puente, la CONFEDERACION HIDROGRÁFICA DEL SEGURA, decidió construir un puente emblemático para resolver los problemas de comunicación del pueblo, una vieja reivindicación de sus habitantes desde la construcción de la presa en 1932. De hecho, el puente restaura un antiguo camino cortado por el embalse. Además, un requerimiento de la propiedad era la reducción al mínimo de la necesidad de mantenimiento.

Después de un proyecto previo firmado por CETEC, donde se definió la tipología y el encaje del arco en sus parámetros básicos, FERROVIAL-AGROMAN fue elegido como constructor y responsable del diseño final. Ferrovial-Agromán recogió y adaptó el diseño partiendo de estas ideas previas, y facilitó una solución completa que incluye un proceso de construcción especialmente adaptado a la situación del valle.

El emplazamiento del puente es el encuentro del río, que fluye de sur a norte dejando una zona montañosa, y el embalse. La topografía tiene unas características especiales; la terraza horizontal del río, de 120m de ancho; a ambos lados, 25m de laderas empinadas de roca caliza y después, 45m de suave pendiente hasta el nivel de la carretera. La carretera pasa 24m sobre el embalse casi lleno; y 44m sobre el río, cuando el embalse está vacío.



## 2. Descripción de la estructura

La estructura es un puente arco con tablero intermedio, ambos mixtos, de luces (20+25+170+25+20), ajustado a la forma del valle. La cimentación de los arcos se realiza en la roca caliza de las laderas.

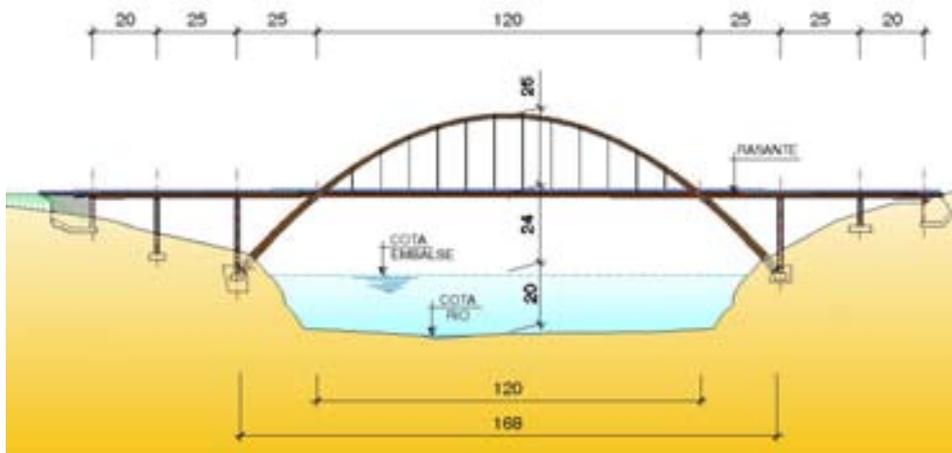


Fig 1. Alzado. Dimensiones generales.

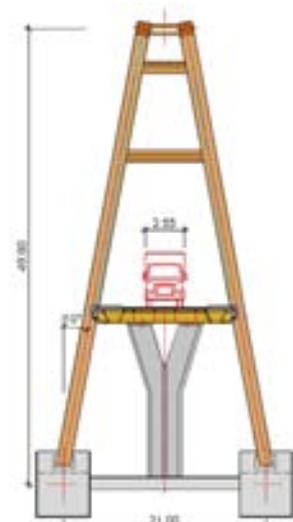


Fig 2. Sección transversal.

Tabla 1 Parametros principales del puente

Luz / Flecha (arco)	3.4	Acero s355 "Corten"	890ton (300 kg/m2tab)
Luz / Canto (clave del arco)	140	Acero pasivo	480ton
Luz / Canto (Arranque del arco)	70	Hormigon	6150m3
Luz / Canto (tablero)	134	Horm. autocompactante	600m3

## 2.1 Tablero

El tablero está compuesto de una viga continua mixta, de hormigón y acero Corten, simplemente apoyada en las pilas con apoyos de neopreno, elásticamente unida a los arcos por 12 pares de péndolas, y rígidamente conectada a los arcos en su intersección, a 60m desde el centro del puente, mediante una riostra.

Su sección transversal está compuesta de 2 artesas metálicas longitudinales de 1m de canto, arriostradas por vigas en doble T cada 3m. El tablero está hormigonado in situ sobre prelasas, que colaboran con la losa en servicio.

Las péndolas son barras de acero al carbono de diámetro 85mm, protegidas con vainas de polietileno.

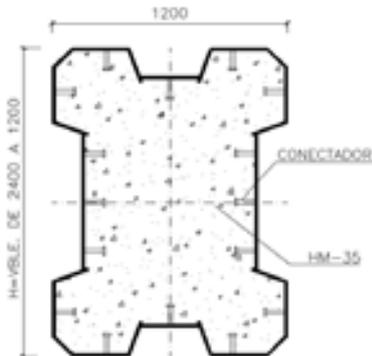


Fig. 3. Sección de arco.

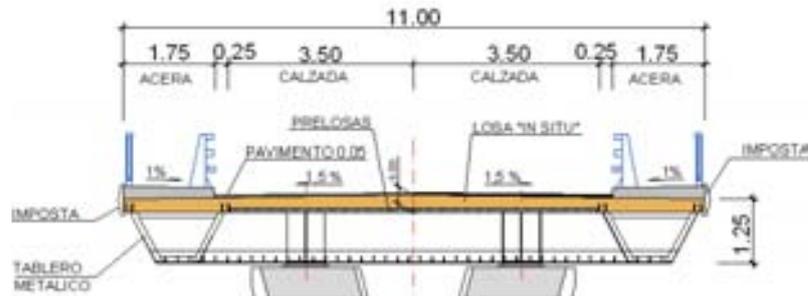


Fig. 4. Sección de tablero.

## 2.2 Arcos

La luz de los arcos es de 168m, 120m de los cuales están sobre el tablero, con una inclinación de 10° hacia el interior del tablero. La flecha es de 48.9m, 25m de ellos sobre el tablero; ambos arcos están arriostrados entre sí por 6 vigas metálicas de sección exterior similar a la del arco.

Las secciones de los arcos son tubos metálicos cuasi-rectangulares, rellenos de hormigón autocompactante, formado por 4 chapas plegadas y soldadas en sus extremos. Su anchura es constante a lo largo del arco; y su canto es variable desde 2.4m a 1.2m.

Cada arco está empotrado en sus arranques en unos zócalos de hormigón armado (el más pequeño de 6m x 7m x 5m), conectados por medio de 28 barras de acero de alto límite elástico, hasta alcanzar la superficie de cimentación en la roca. Para evitar transmitir fuerzas transversales al macizo rocoso, debidas a la inclinación de los arcos, los bloques de cimentación han sido arriostrados entre sí mediante un tirante de hormigón armado, de forma que equilibren las reacciones de los 2 arcos en cada margen.



Fig. 5. Pilas y plataforma del bowstring.



Fig. 6. Estribo 2. Vainas de retenida.



Fig. 7. Zócalo de cimentación de arcos.

## 2.3 Pilas y estribos

Las pilas tienen forma de Y, y son de hormigón in situ. El tablero se conecta a cada pila en una viga transversal que une las 2 vigas longitudinales principales. Las pilas más altas, junto a los arranques de arco, tienen una altura de 24.3m, y se asientan sobre el tirante que arriostra los macizos de anclaje de los arcos.

El estribo de la margen izquierda es de tipo cerrado, para limitar el derrame de tierras en su frente. En la margen derecha es de tipo abierto, y queda casi enterrado.

Los muros laterales de los estribos aloja en su interior los cables de retenida que empotran el tablero al estribo durante el izado (ver proceso constructivo). Parte de las zapatas se han realizado inclinadas para ofrecer una superficie de contacto perpendicular a la fuerza de tesado de los anclajes al terreno.

Todas las cimentaciones son directas. El reconocimiento geotécnico en el macizo rocoso de la margen izquierda aconsejó la realización de unas inyecciones de consolidación en el trasdós de los arranques de arco en esa margen.

## 3. Proceso Constructivo

La estructura metálica del puente (arcos + tablero) fue dividida en 3 subestructuras metálicas parciales autoportantes:

### 3.1 Arco Atirantado (Bowstring)

La situación del embalse aguas abajo, y el estudio del régimen hidráulico de avenidas de aguas arriba del río, permitió concluir que la utilización del fondo de embalse como plataforma de trabajo era segura.

Se realizó una plataforma temporal de trabajo en el lecho del embalse donde se montaron apeados los 120m centrales del tablero metálico. Posteriormente, se establecieron una serie de torres de cimbra coincidentes con la posición de las péndolas.

Cada semi-arco fue dividido en 3 piezas de montaje, más una pieza en la clave; se colocaron en posición apoyados en las torres y se unieron entre si y al tablero en sus extremos, mediante una riostra de unión ("riostra de bowstring").

Se colocaron las riostras entre arcos, se retiraron las torres y se colocaron las péndolas.

El desapeo del bowstring se realizó elevando con gatos los extremos del tablero, desapeando así las vigas del tablero de sus apoyos intermedios y cargando el arco atirantado a través de las péndolas.



Fig 8. Bowstring (I). Tablero.



Fig 9. Bowstring (II). Montaje de arco.



Fig 10. Bowstring (III). Desapeo y péndolas.

### 3.2 Vanos de acceso y voladizos

La estructura metálica del tablero en los vanos de acceso en cada margen fue montada en el suelo y colocada con grúas sobre las pilas.

Los arranques metálicos de los arcos (desde la cimentación a la intersección con el tablero) fue colocada en su posición en una única operación con grúa (33m en voladizo) y empotrada provisionalmente en las barras de cosido a la zapata.

Una vez posicionados en voladizo los arranques de cada arco en una margen, fueron unidos en su extremo superior por medio de una riostra (perteneciente también al tablero, en la intersección de los 3 elementos, "riostra de voladizo"), colocada con grúa y soldada en el sitio.

Finalmente, se coloca el tramo completo de tablero metálico desde la pila hasta la riostra del voladizo.

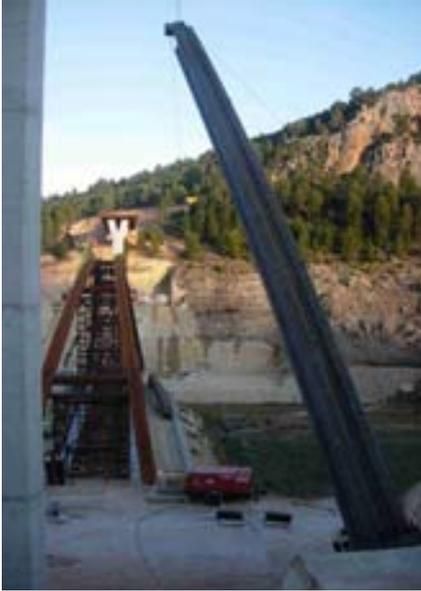


Fig 11. Voladizo (I). Arranques de arco.



Fig 12. Voladizo (II). Riostra de voladizo.



Fig 13. Voladizo (III). Tablero del voladizo.

### 3.3 Izado

Una vez las 3 estructuras metálicas parciales han sido construidas (el arco central y los 2 voladizos de las márgenes), los extremos del tablero se fijan al estribo mediante los cables de pretensado que se anclan al terreno, alojados en los muros laterales de los estribos.

Tesados estos cables, el bowstring de 470ton (colgado de 4 cables) fue elevado 40m, mediante 4 gatos de izado colocados en cada viga longitudinal del tablero, en una operación de 8 horas realizada por ALE-LASTRA.

Finalizado el izado, se procedió a la unión por soldadura de los extremos enfrentados de arcos y tableros de las 3 estructuras parciales. Para asegurar el perfecto enfrentado de los extremos a soldar, se tomaron una serie de medidas que se explican en el apartado correspondiente.

La secuencia de soldado, por razones térmicas, fue la siguiente; primero se soldó la margen derecha, se calzó con topes la junta izquierda a soldar, se liberó los anclajes del estribo derecha, pasando la tracción a compresión por los topes y permitiendo las dilataciones en el estribo derecha; sólo entonces, se pudo soldar la junta izquierda.



Fig 14. Gatos de izado.



Fig 15. Apoyos del bowstring.



Fig 16. Riostra de bowstring.

### 3.4 Hormigonado de Arcos

Para asegurar el equilibrio de cargas aplicadas al arco durante el hormigonado y posterior curado, los arcos fueron rellenados de hormigón en 2 fases. Cada arco fue dividido en módulos estancos de 5m de longitud, rellenos alternativamente en cada fase con hormigón autocompactante.

Al final de cada fase, de una jornada de duración, el hormigón, con aditivos retardantes, comenzaba su fraguado, en una posición antifunicular de carga en los arcos, y sin flechas apreciables en el puente.

Una vez el arco mixto adquirió resistencia suficiente, se colocaron las prelosas del tablero, colocó la ferralla y se hormigonó la losa in situ desde el centro hacia el exterior.



Fig 17. Unión de tableros después del izado.



Fig 18. Amortiguador.



Fig 19. Hormigonado de una fase del arco.

Después de los trabajos de acabado, se instalaron amortiguadores y topes en estribos para reducir las deflexiones verticales producidas por las sobrecargas asimétricas, y permitir deformaciones lentas debidas a acciones reológicas.

El puente se finalizó en Agosto del 2007.

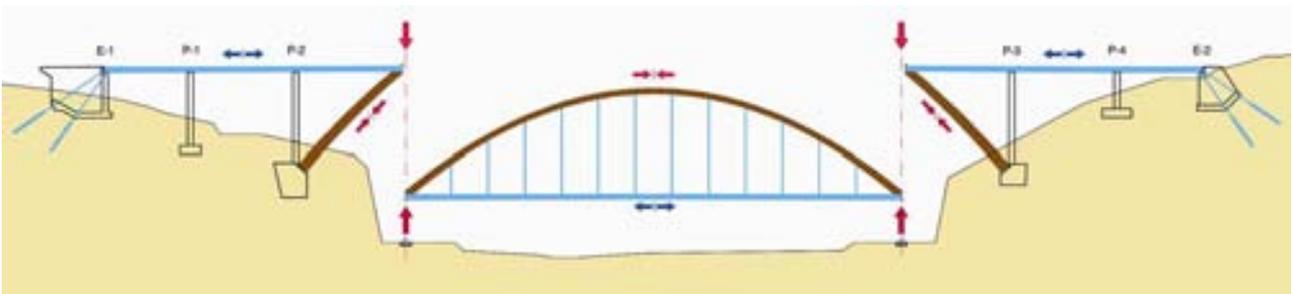


Fig 20. Esquema de fuerzas durante el izado.

## 4. Analisis estructural

Estructuralmente, el puente es un arco de tablero intermedio con vanos de acceso. Presenta las siguientes características no habituales en esta tipología:

- Gran esbeltez de arcos y tablero.
- Arcos bastante peraltados.
- El cruce de arco\_tablero se produce bastante arriba (1/2 de la flecha), con un ángulo cercano a 45°.

Se realizó un estudio en profundidad del comportamiento de la estructura, para determinar la repercusión de estos parámetros, y conseguir optimizar su diseño. El proceso evolutivo de diseño y las conclusiones a las que se llegaron caen fuera de las posibilidades de este artículo; sólo indicar que la clave para encajar estructuralmente el puente fue la vinculación arco-tablero (parámetro que modifica sustancialmente el comportamiento del puente), y que el peralte de los arcos contrarresta en parte la esbeltez de los elementos estructurales.

## 5. Comprobaciones estructurales

El desarrollo del proyecto de la estructura ha consistido principalmente en los siguientes trabajos:

- Definición de los parámetros fundamentales del puente acabado, y definición del proceso constructivo
- Dimensionamiento de los elementos que definen las secciones generales, y de los elementos especiales.
- Verificación y comprobación de cada fase evolutiva del puente en construcción y del puente en servicio.

El análisis estructural se ha realizado mediante un modelo de cálculo lineal de barras en 3D del puente completo, y de cada una de las estructuras parciales del montaje evolutivo. Los elementos especiales han sido comprobados con modelos de cálculo lineal de placas en 3D, para la comprobación en detalle. Se ha comprobado tanto el Estado Limite de Servicio como el Estado Limite Ultimo de acuerdo a las normas y recomendaciones españolas vigentes (IAP, RPX, RPM, EHE). Se han realizado diferentes cálculos no lineales y dinámicos, con resultados que no difieren de forma apreciable de los deducidos en el cálculo lineal.



Fig 21. Unión de riostras arcos, anclaje péndolas y apoyo cimbra.



Fig 22. Tramos del arco en taller, listos para el transporte.

## 6. Detalles de construcción

Simplificadamente, el origen de todos estos elementos se puede agrupar en 3 motivos:

- Compaginar estructuras parciales del proceso constructivo con puente permanente. (Diseño de Riostras).
- Compaginar todos los requerimientos del arco con su geometría. Diseño del arco (discretización): Los arcos tienen una directriz parabólica y su complicada sección de canto variable se debe despiezar, plegar, armar, transportar, montar en obra y hormigonar en elementos de diferentes dimensiones validas para cada una de esas operaciones.
- Resolver todas las intersecciones del arco. La parábola del arco está contenida en un plano inclinado y todas los elementos que se cruzan con él lo hacen en diferentes ángulos en el espacio (en algunos casos, varias intersecciones coinciden en un mismo punto del arco, con diferentes ángulos de entrada). (zócalos de apoyo, riostras arco-tablero, riostras entre arcos, anclajes de péndolas, y apoyos en cimbra).
- Asegurar la geometría y acabado final del puente. (diseño de "Muñones", transiciones de artesa, anclaje de péndolas en el tablero).

Practicamente todos los elementos del puente están condicionados en su diseño por alguna (o varias) de las razones anteriormente enumeradas. A continuación, se explica brevemente algunos de estos elementos y su definición a nivel de construcción:

### 6.1 Construcción del arco

Cada arco ha sido construido por medio de una poligonal de 63 segmentos rectos de aproximadamente 3m. Cada segmento se compone de 4 chapas que se pliegan, y sueldan en sus extremos para formar la sección transversal.

Hay diafragmas cada 1.5m, pudiendo ser estos abiertos o cerrados. Cada 2 abiertos hay 1 cerrado. Una vez montado el arco, los diafragmas cerrados definen módulos estancos de 4.5m de longitud que son unidades de hormigonado.

Cada segmento se une con el siguiente formando un ángulo diferente cada vez, que sigue la directriz del arco; en todas estas uniones hay un diafragma, aunque puede ser abierto o cerrado. La unión de 2 o 3 segmentos forma un tramo de transporte (hay 23 por arco).

Una vez en obra, varios tramos se unen para formar una pieza de montaje. El arranque de arco, desde la placa de cimentación hasta la riostra que lo une al tablero, forma una única pieza de 4 tramos que se coloca en voladizo. Cada semiarco del bowstring consta de 3 piezas de montaje (una por torre de cimbra), más la pieza de clave.

## 6.2 Control de la geometría del arco

Se estableció un sistema de control de la geometría en varios niveles.

Debido a las dimensiones del arco y a la planificación de los trabajos, no se pudo realizar un montaje en blanco completo en taller. En su lugar se estableció un sistema de tramos conjugado similar al que se emplea en dovelas prefabricadas.

Consiste en marcar unos puntos de control en los extremos de los tramos de transporte. Cada 3 tramos consecutivos se premontan en taller mediante unos perfiles angulares atornillados que reproducen su posición relativa. Se toman datos topográficos de los 3 para asegurar que su forma conjunta es la correcta.

A continuación, se separa uno de ellos (el primero de los 3 que se fabricó), y cuando está armado el siguiente, se premona con los 2 restantes y se toman datos, repitiendo el proceso. Como cada punto de control se toma 3 veces, cruzando los datos se puede saber la geometría del conjunto del arco, y la precisión en la toma de datos (son redundantes).

En obra se vuelven a ensamblar los tramos con los perfiles atornillados y se vuelve a realizar una comprobación topográfica de los puntos de control de taller, antes de su definitiva unión para formar cada piezas de montaje. Ensambladas las piezas, y antes de colocarlas en obra, se colocan unas dianas en puntos convenidos para el seguimiento de la geometría durante el resto de la ejecución, especialmente en las operaciones de montaje de los voladizos en cada margen; y montaje de péndolas y desapeo en el caso del bowstring.

## 6.3 Aseguramiento de la geometría en las operaciones de montaje

La unión soldada de las 3 estructuras parciales (bowstring y los 2 voladizos a cada lado) después del izado, solo podía realizarse si los extremos a unir (a cada lado de la junta, separados 40cm) se encontraban enfrentados. Para asegurarlo, se tomaron 2 medidas:

### 6.3.1 Absorción de errores por geometría (establecimiento de holguras)

Los extremos de tablero y arcos se simplificaron a secciones rectangulares (denominadas "muñones" en el proyecto), retranqueadas 10cm respecto al rectángulo incrito a las secciones exteriores. Posteriormente, se restituyen las secciones exteriores. Así se facilitan los trabajos de soldadura de las uniones, y se corrige la falta de alineación que pueda haber, dentro de los límites fijados.



Fig 23. Muñon de voladizo con dianas de replanteo.



Fig 24. Bowstring: Muñon, riostra, gato desapeo, orejeta izado.

### 6.3.2 Maniobras de corrección

En cada una de las 3 operaciones en que se divide el montaje de los voladizos, se estableció un movimiento adicional de ajuste para corregir la posición:

- Operación 1: Los arranques de arco en voladizo no se empotraron directamente al zócalo de hormigón, sino que se empotraron a las barras de cosido, mediante un sistema de tuercas y contratuercas. Así, se podía corregir repetidamente la posición de la pieza, colgada de una grúa, modificando las contratuercas de apoyo.

El objetivo a conseguir para pasar a la siguiente fase era dejar los 2 arranques de arco a la misma altura y a la misma distancia del eje longitudinal.

- Operación 2: La riostra de voladizo está dividida en 2 partes en su centro. Una vez unida en sus extremos a los muñones del de arco, se regula su apertura que controla la separación transversal de los arcos.

El objetivo de este movimiento es igualar esta distancia transversal, a la distancia que existe entre los muñones del bowstring, construido 40m más abajo.



Fig 25. Enhebrado a las barras con contratuercas.



Fig 26. Riostra de voladizo.



Fig 27. Apertura de riostra.

- Operación 3: La colocación del tablero en voladizo consiste en soldar la sección posterior de las vigas artesas al resto de los vanos de acceso sostenido por la grúa. A continuación, apoyar su lado anterior a la riostra de voladizo por medio de un emparillado de perfiles soldados en su cara superior (lazo).

Este dispositivo incorpora un tope frontal con gato que impide el avance del arco en ménsula al recibir la carga del vano, y por compatibilidad de movimientos, también su descenso. Cuando se activa el gato, el mecanismo inverso provoca el retroceso y por tanto, también la elevación del arranque del arco y tablero.

Así, se controla la altura del voladizo, recuperando la flecha que tenía acumulada de las fases anteriores en voladizo.



Fig 28. "Lazo"



Fig 29. Unión muñon-riostra de voladizo.



Fig 30. Lazo en acción.

## 7. Conclusiones

El proyecto del Arco de la Vicaria ha hecho realidad un puente singular en el entorno de un paraje de gran belleza natural, en medio de una región de difícil acceso, y con un relieve complicado.

Su diseño y construcción pueden considerarse un éxito en la medida que ha satisfecho los requerimientos de la propiedad, y se ha desarrollado según lo previsto sin incidencias apreciables.

El diseño de una estructura tan compleja como esta debe incluir:

- La definición de los elementos finales del puente.

- El proceso constructivo detallado con los medios auxiliares a emplear, su ubicación, y todos los elementos especiales necesarios, ya sea durante la construcción como en servicio.
- Además, debe prever procedimientos y operaciones que permitan absorber las desviaciones respecto a lo previsto, que se puedan producir durante la ejecución de la obra.

En este caso, el estudio en profundidad del diseño y los factores concurrentes, permitió obtener las mejores soluciones al proyecto planteado, tanto en servicio como en el proceso constructivo:

- El encaje de la estructura es la solución óptima si se exige evitar la colocación de apoyos permanentes en el embalse, considerando la morfología del valle, y las condiciones geotécnicas de las laderas y su simetría.
- La existencia de las terrazas horizontales del río y su régimen hidráulico, permitió su uso para el bowstring provisional, y resolver así la construcción, que de otra forma hubiese supuesto costosos medios auxiliares.
- Estructuralmente, la vinculación arco-tablero es un factor clave para definir la forma de trabajo de la estructura conjunta. De hecho, se ha demostrado que es posible conseguir diseños con AMBOS elementos, arco y tablero, muy esbeltos, si se resuelve correctamente esta vinculación.

La elección de una estructura mixta de arco y tablero con acero tipo "corten" permitió:

- Reducir los requerimientos de mantenimiento en servicio.
- Optimizar el empleo de materiales, manteniendo la esbeltez deseada de los elementos estructurales.
- Resolver la limitada disponibilidad de medios locales, maximizar la prefabricación en el exterior y reducir los trabajos en el sitio. Se fabricaron grandes piezas metálicas en taller; y se transportaron y se colocaron sucesivamente en obra con grúa, para formar una estructura evolutiva de gran complejidad.
- Usar la estructura metálica completa del puente como cimbra y encofrado, hormigonando arco y tablero para convertir la estructura en mixta, adquiriendo la rigidez y resistencia necesarias en servicio.



El cuidado de los detalles del diseño es asimismo muy importante para transmitir una imagen final espectacular, debiendo prevalecer en algunas ocasiones el criterio estético frente a otras consideraciones:

- La característica sección transversal del arco, con las superficies plegadas, genera líneas de sombra sobre sus caras, que realzan sus líneas racionales, como contrapunto a las bellas formas naturales del entorno.
- Los anclajes de las péndolas, en el arco y en el tablero se han realizado en el interior de las secciones de arco y tablero, permitiendo una gran limpieza visual en los acabados.
- Las pilas en Y, donde los apoyos del tablero se encuentran remetidos en el interior de la plataforma, permite resaltar la continuidad del canto del tablero a lo largo del puente, y su esbeltez.
- Las riostras entre arcos, cuya sección es similar, pero algo menor a los arcos, y girada según el arco en su encuentro, se maclan en su intersección (punto coincidente además con el anclaje de péndolas).
- Después de la construcción, se ha restituido completamente la sección del arco en el cruce con tablero.

Finalmente, la construcción de este puente no podría haberse llevado a cabo sin una buena coordinación entre los equipos de diseño y construcción que han intervenido. Hay que destacar la gran labor profesional realizada por el EQUIPO DE OBRA de FERROVIAL-AGROMAN; también, desde un punto de vista técnico, la labor de taller y la calidad de los trabajos en obra de ASCAMON, taller encargado de la construcción metálica.