

# Acueducto del Barranco Roig

## *Roig Gully Aqueduct*

Arturo Rueda Rieu<sup>(1)</sup>, Lorenzo Carbonell Cerezo<sup>(2)</sup>, Rosa Monzó Enguix<sup>(3)</sup>, José María Pastor Villanueva<sup>(3)</sup> y David Ferreras Camarero<sup>(3)</sup>

Recibido | Received: 27-05-2010  
Aceptado | Accepted: 02-03-2011

### Resumen

Aunque el transporte de agua a presión tiene una mayor flexibilidad de trazado que el transporte por gravedad y en lámina libre, la orografía acaba imponiendo utilizar estructuras auxiliares que permitan el trasiego de agua. En el tramo E de la conexión del curso bajo del río Júcar con el tramo V (“Nueva conducción Júcar – Vinalopó”) la tubería de impulsión debe salvar distintas infraestructuras de transporte y cuatro barrancos, optándose por la ejecución de hincas y acueductos respectivamente. El artículo se centra en la solución dada a estos acueductos, especialmente en el acueducto del barranco El Roig, cercano a la localidad de Moixent, para el que condicionantes de distinta índole acabaron imponiendo un diseño singular.

**Palabras clave:** acueducto, transporte en tubería, estructura atirantada, barras roscadas, tubos curvos.

### Abstract\*

Despite the pressurized water pipe flow has got a higher flexibility in its course than the free surface flow, the terrain enforces the construction of auxiliary elements which allow the water transferring. In E stretch of the Jucar river down course connection with V stretch (“Nueva conducción Júcar-Vinalopó”) the pipe must overcome different transport infrastructures and four ravines, choosing pipe jacking and aqueducts respectively. This article is focused on the solution given to these aqueducts, especially to the Roig’s gully aqueduct, near the village of Moixent, for which conditions of various kinds imposed a unique design.

**Keywords:** aqueduct, pipe flow, stayed structure, tie rods, curved bars.

\* An extensive English language summary of the present article is provided on page 102 of this issue both for the convenience of non-Spanish-speaking readers and inclusion in databases.

(1) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Obras y Proyectos de AcuaJúcar, S.A. (Valencia, España).  
(2) Ingeniero Industrial. Acciona Infraestructuras, S. A. (Valencia, España).  
(3) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. TYP SA, S.A. (Valencia, España).

Persona de contacto / Corresponding author: [dferreras@typsa.es](mailto:dferreras@typsa.es)

## 1. LOS ACUEDUCTOS DEL TRAMO E DE LA NUEVA CONDUCCIÓN - VINALOPÓ

### 1.1. Descripción general de la obra

La conducción Júcar-Vinalopó se inicia aguas arriba del Azud de la Marquesa en Cullera (Valencia) a cota +1,5 m y finaliza en la cabecera del Alto Vinalopó, en las inmediaciones de Villena (Alicante), en concreto en la Central de Alorines, a cota +547,4 m. Tiene una longitud total de conducción superior a los 95 km, incluyendo dos túneles de 6 km de longitud total, cuatro bombeos y tres balsas intermedias. En cola del sistema y a los efectos de regulación y almacenamiento de excedentes se dispone de una balsa, denominada San Diego, con una capacidad de 20 Hm<sup>3</sup>.

El transporte en toda la conducción debe hacerse a presión para salvar las cotas del trazado, con tubería de acero de diámetro 1.829 mm. La conducción, además, se dimensiona para un caudal de diseño de 4,5 m<sup>3</sup>/s, si bien se comprueba su correcto funcionamiento para un caudal de 5,6 m<sup>3</sup>/s.

Su objeto es la transferencia de recursos hídricos sobrantes del Júcar hasta la cuenca del Vinalopó en un volumen máximo establecido en el actual Plan Hidrológico del Júcar de hasta 80 Hm<sup>3</sup>/año, una vez satisfechas las demandas en la cuenca cedente y de forma especial, las medioambientales.

La ejecución del trazado se ha realizado en dos fases, que se han dividido en distintos tramos para su ejecución. El tramo que nos ocupa se incluye dentro de la Fase 2: "Conexión del curso bajo del río Júcar con el tramo V conducción Júcar - Vinalopó"; se trata del tramo E: con una longitud total de 18.020 m de conducción, tiene que atravesar distintas infraestructuras, situación que se ha resuelto mediante hincas, y salvar varios cauces, caso que se ha salvado mediante sifones o acueductos dependiendo de la orografía.

### 1.2. Los acueductos del tramo E

La conducción en el tramo E cruza diferentes barrancos y ramblas; cuatro se salvan mediante acueducto: el de Tío Antonio, el del afluente del Hoz, el de Hoz y el de Roig. En casi todos ellos las luces impuestas rondan los 35 metros, excepto en el barranco de Roig que tiene una luz de 60 metros. Se adoptó la solución de acueducto frente al sifón por condicionantes funcionales y económicos, evitando la ocupación de los barrancos.

Dado que la conducción del trasvase es una tubería de acero de gran diámetro (DN 1.829 mm, con acero de calidades variables, que llegan hasta X70 según norma API en los acueductos), con los espesores necesarios para resistir las altas presiones del trasiego y las tierras en su parte enterrada, cuando se

estudiaron soluciones estructurales para los acueductos se optó por proyectarlos como tubos autoportantes, empleando la propia tubería como viga que salvara la luz de los barrancos, apurando la capacidad resistente remanente en el material tras resistir las presiones interiores, cumpliendo los límites de deformación necesarios para el transporte.

Según se recoge en las referencias [1] y [2], la aparición histórica de esta solución para acueductos se da en el comienzo del siglo XX, pareja a su utilización en las impulsiones hidráulicas, cuando se consiguió producir de forma industrial tubos de acero de suficiente calidad y longitud, aplicando soldadura eléctrica continua en taller. Los primeros registros de acueductos construidos con la tubería de impulsión utilizada como viga, se rastrean hasta Suecia en el principio del XX; con chapas de acero laminadas y juntas roblonadas, en ocasiones el conjunto se rigidizaba con celosías metálicas y se colocaban anillos rigidizadores para evitar abolladuras locales en las chapas. Destaca la conducción de Orebro, de 1909, en la que con tuberías de 2250 mm de diámetro y espesores de 8 mm se salvaron vanos de 8 m con anillos en los apoyos y separaciones de 2 m entre éstos. En Suiza en 1925, en la construcción de la planta hidroeléctrica de Waggital, se llegó a vanos de 22,5 m con diámetros de 2.200 mm y espesores variables de 20 a 26 mm (en esta ejecución ya se empleó junta soldada). En EEUU, en 1927, se cruzó el Mississippi cerca de Toston (Montana) con cuatro vanos de 30, 38,5; 38,5 y 30 m, con diámetro de 3.100 mm y espesores variables de 19 a 9.50 mm.

Los barrancos del tío Antonio, afluente de Hoz y Hoz (Figura 1) están dentro del ámbito ordinario, con luces que no superan los 35 metros. Los acueductos cruzan los cauces mediante un único vano: la tubería surge de la ladera y atraviesa el barranco con la pendiente de la conducción y respetando los gálibos verticales impuestos por el estudio hidráulico. El diámetro de la tubería es de 1.829 mm, su espesor es de 17,5 mm; la calidad del acero es X70. Sólo tienen anillos de rigidización en los apoyos y la configura-

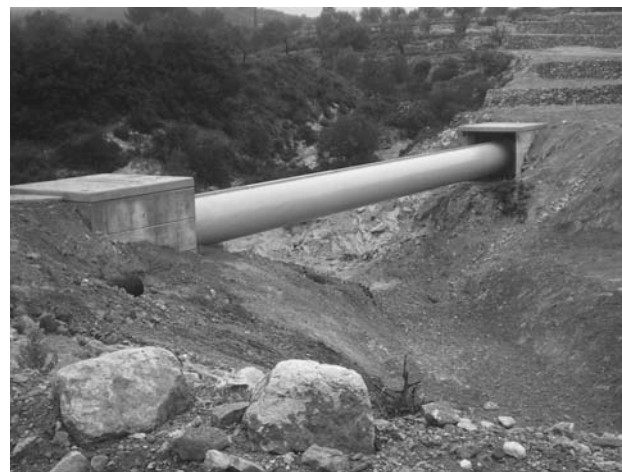


Figura 1. Acueducto barranco Hoz



Figura 2. Compensador de dilatación

ción de la sustentación en todos ellos es la misma: un apoyo rígido anclado al estribo y otro apoyo móvil que permite los movimientos en el sentido longitudinal según la traza, tras el cual se ha colocado un compensador de dilatación (Figura 2).

Sin embargo, en el barranco Roig, el mayor de todos, la luz existente (60 m) es excesiva para colocar la tubería como una simple viga; dado que, por razones hidráulicas se prefirió no colocar apoyos definitivos en el cauce para reducir la luz, por tanto fue necesario buscar soluciones alternativas a esta tipología estructural.

## 2. EL ACUEDUCTO DEL BARRANCO ROIG

### 2.1. Diseño

#### 2.1.1. Condicionantes

El barranco Roig (Figura 3) se encuentra próximo a la localidad de Moixent y tiene un ancho en coronación de 60,5 m. Esta luz queda fuera del rango adecuado para la solución de tubería autoportante principalmente por criterios de deformación así como por criterios resistentes: con el diámetro impuesto, el espesor necesario para conseguir suficiente rigidez en el sistema para limitar la flecha no es económico, ni



Figura 3. Vista aérea del barranco Roig

tan siquiera viable, para 60 metros de luz. Hubo de plantearse por tanto soluciones diferentes a los otros acueductos para esta estructura, respetando los condicionantes existentes.

En el proyecto se realizó un estudio hidráulico de los distintos cauces con acueducto, tomando como periodo de retorno de estudio 100 años (vida útil de proyecto); en el caso del barranco Roig el caudal punta correspondiente es 86,81 m<sup>3</sup>/s con un calado cercano a los 3 m ocupando todo el cauce. Este valor impone alternativas de un vano único, sin pilas intermedias que puedan interferir con el flujo y con un gálibo mínimo fijado; en el Roig, el movimiento de tierras necesario para la solución sifón hacía inviable esta alternativa.

Por criterios prácticos, se fijó también que las características de la solución propuesta utilizara para la tubería un diámetro nominal D.N. 1.829 mm ya que mantenía la continuidad de la tubería enterrada que llega al barranco.

Estos dos criterios obligaban ya a construir una estructura auxiliar que reforzara el comportamiento de la tubería dotándola de la suficiente rigidez vertical. Además, la Propiedad decidió, dada la proximidad del municipio de Moixent y de la A7, establecer un fuerte condicionante estético: se buscó crear un hito referente de toda la obra.

#### 2.1.2. Diseño formal

Respetando el condicionante de no invadir el cauce con ningún elemento, y aprovechando que la estructura no soporta sobrecargas de uso (lo cual permite una mayor libertad formal), se ha diseñado una solución en la que prima el condicionante estético. La solución juega con la forma de la estructura auxiliar necesaria: se idea una estructura atirantada con cuatro pilonos curvos dispuestos de forma asimétrica, dos en cada margen, de los que se suspende la tubería (Figura 4). La curvatura de los pilonos no es arbitraria sino que se corresponde con la propia de un arco de medio punto de 60 m (la luz del barranco) y la longitud total de los mismos corresponde con su perímetro.



Figura 4. Infografía diseño original

El arco de medio punto es de las primeras formas estructurales conocidas: generalizada especialmente durante la época romana (civilización que parece ser que sintió una fascinación casi mística por esta herencia etrusca), se convirtió en paradigma de la construcción civil. La asociación histórica entre la silueta del arco de medio punto y los acueductos pertenece ya al inconsciente colectivo, gracias a los numerosos ejemplos existentes. La idea horizonte que apareció durante el diseño fue la creación de un arco metálico de medio punto que salvara el barranco.

Sin embargo, se entendió que quedarse en la inspiración del pasado histórico para la elección de una forma resultaba insuficiente desde una estética actual: se buscó renovar la presencia del medio punto, de manera que se vuelva perceptible aun a costa de su funcionalidad. Por ello, se planteó la fragmentación del arco en cuatro partes asimétricas, utilizando los elementos así creados para los pilonos laterales y los mástiles de retenida. La deconstrucción libera las tensiones internas del arco, materializadas en los cables de sustentación; al mismo tiempo, también libera la forma pura, el arco, de su función, gracias al vacío entre alguna de sus partes. Este vacío debe ser creado por el espectador para completar la obra.

### 2.1.3. Diseño estructural

La justificación estructural del diseño es suspender elásticamente la tubería con las barras de forma que pueda superar el barranco: se mejora su comportamiento frente a las acciones gravitatorias completando el sistema con las barras y los mástiles, contrarrestando parte del peso con los macizos de retenida y consiguiendo la suficiente rigidez vertical. Transversalmente, frente a acciones horizontales, el comportamiento está desacoplado por la baja rigidez del sistema en este sentido, debiendo cada elemento resistir independientemente.

Los mástiles son de sección circular, de acero X65, y tienen un diámetro de 34" (863,6 mm) y un espesor de 19,1 mm; para la tubería se ha mantenido el diámetro de 1829 mm y se ha incrementado el espesor a 17,5 mm y la calidad del acero a X70; para el sistema de tirantes se decidió adoptar un sistema de barras roscadas, con una métrica de 76 mm. Se adoptó esta tipología de tirante frente al cable por adaptarse mejor a las condiciones de la obra, además de permitir una mejor solución de los detalles de unión con el resto de la estructura.

Por último, las condiciones de apoyo de la tubería en los extremos son las mismas que en los otros acueductos del tramo: un apoyo fijo en un lado y liberación del movimiento longitudinal con un compensador de dilatación en el otro.

## 2.2. Cálculo

### 2.2.1. Acciones

Las principales acciones sobre el acueducto son el agua y el viento.

#### • Agua

El caudal de diseño del acueducto es el máximo de 5,6 m<sup>3</sup>/s; la máxima presión en este tramo es de unos 150 metros de columna de agua, lo cual equivale aproximadamente a 1,5 N/mm<sup>2</sup> de presión interior, a la que hay que añadir una sobrepresión/depresión de 1 N/mm<sup>2</sup> por efecto del transitorio. El diseño de la conducción evita presiones negativas a lo largo del acueducto. La presión origina una tensión circunferencial en la chapa de la tubería que se relaciona con la presión interior  $P$  mediante la Ecuación 1 su número correspondiente.

$$\sigma_r = P \cdot \frac{D}{2t} \quad (1)$$

donde  $D$  el diámetro exterior de la tubería,  $t$  el espesor de la misma y  $P$  la presión en el interior.

Esta tensión radial origina a su vez una deformación radial, que se puede obtener dividiendo la tensión entre el módulo de Young, y por efecto Poisson, esta deformación radial induce un acortamiento longitudinal.

La sollicitación del agua se completa con el rozamiento contra las paredes de la tubería, derivado de la pérdida de carga por fricción.

En cuanto al transitorio, supone únicamente una mayor presión radial ya que de la relación de continuidad se puede deducir que la sobrepresión se transforma en una variación de la cantidad de movimiento, necesaria para frenar el fluido entre dos secciones cualesquiera de control, pero no supone un incremento en la acción longitudinal o gravitacional.

#### • Viento

Se ha considerado del lado de la seguridad que, frente al viento transversal, los elementos (tubería, mástiles y cables) funcionan independientemente, desacoplados, siendo la situación pésima para esta acción. La acción del viento sobre la estructura es compleja: conocer su acción exacta hubiera requerido ensayos en prototipo que la magnitud de la obra no justificaban. Se ha hecho previamente una aproximación cualitativa, siguiendo la referencia [3], acotando el fenómeno para obtener unos resultados adecuados, y después se ha empleado de forma conservadora el Eurocódigo 1 [4].

La acción del viento se puede suponer como la superposición de una componente de "fondo", cuasi-

estática, y de una componente resonante debida a la excitación cercana a las frecuencias naturales. La parte de fondo está afectada a su vez por la turbulencia, amplificándose con un factor de ráfaga. Por último, existen fenómenos dinámicos e inestabilidades aerolásticas, autoinducidos y autoexcitados, poco conocidos y de difícil evaluación; sin embargo, la sección circular de todos los elementos, de elevada rigidez torsional, tiene una buena respuesta.

La componente de fondo se asimila en las Normas de forma genérica a cargas estáticas recogiendo el efecto de la altura, la topografía, la exposición del elemento, el entorno y la turbulencia. La expresión que recoge el Eurocódigo 1 [4] es la Ecuación 2, equivalente a los efectos extremos del viento:

$$F = q_{ref} \cdot c_e(z_e) \cdot c_f \cdot c_d \cdot A \quad (2)$$

donde  $q_{ref}$  es la presión de referencia, proporcional a la velocidad de referencia al cuadrado y a la densidad del aire;  $c_e(z_e)$  es el coeficiente de exposición a la altura de referencia  $z_e$ , tiene en cuenta el terreno y la altura sobre el nivel del suelo, modifica la presión media para tener en cuenta un pico de turbulencia;  $c_f$  es el coeficiente de fuerza o arrastre, depende de la geometría de la sección y de su rugosidad principalmente;  $c_d$  es un coeficiente dinámico que tiene en cuenta la amplificación dinámica;  $A$  es el área expuesta a la acción.

Para considerar la componente resonante el Eurocódigo 1 añade un coeficiente dinámico que tiene en cuenta los efectos de reducción debidos a la falta de correlación de las presiones sobre la superficie, así como los efectos de mayoración debidos a las componentes de la frecuencia de turbulencia cercanas a la frecuencia fundamental de la estructura y la acción de ráfagas de viento.

Tras analizar los elementos que componen la estructura, se comprobó que los elementos más sensibles a la componente resonante eran los mástiles; para estudiarlos se han asimilado a las estructuras tipo chimeneas que figuran en el Eurocódigo 1 y se ha profundizado en el cálculo del mástil más alto. Para éste se ha seguido el procedimiento detallado para respuesta lineal que se recoge en el anexo B, que se puede aplicar al darse las condiciones exigidas.

- Otras acciones

La idealización de las acciones se completa con las restantes solicitaciones recogidas en la Guía Técnica para el transporte de agua a presión [5] y en el Manual de Tirantes [6]: para la acción térmica se adoptan valores de diferencial térmico en las barras de +18 °C y -10°C, ya que tanto el color de las barras como la pintura serán de tonos claros; se ha contemplado la posibilidad de rotura de los tirantes accesi-

bles por vandalismo; este evento se ha analizado de forma estática con un coeficiente de ampliación dinámica de 2.

### 2.2.2. Modelo estructural

Se construyeron dos modelos numéricos con dos programas diferentes para analizar la estructura, estimar la respuesta bajo las acciones descritas y contrastar los resultados, empleando el formato de seguridad prescrito por el marco normativo. Las principales características de los modelos han sido: cálculo en régimen elástico; variación de la rigidez de los elementos, bien por su configuración deformada o bien por su estado tensional; análisis en teoría de segundo orden, o mediante la actualización paso a paso de la geometría de la estructura deformada o mediante la modificación de la matriz de rigidez utilizando funciones de estabilidad o la matriz geométrica. La estructura tiene un plano de rigidez claro, el de los tirantes y es claramente traslacional fuera de éste. En los modelos se incorporaron las imperfecciones laterales globales equivalentes de la estructura traslacional y las imperfecciones iniciales equivalentes de los elementos comprimidos aislados; se ha adoptado una curvatura ficticia adicional de  $e_0$  de 1/200, siendo  $l$  la longitud desarrollada de cada uno de los mástiles.

La sección de la tubería es esbelta, clasificándose según el Eurocódigo 3 [7] como clase 4. En ausencia de una formulación específica para hallar el ancho reducido de secciones circulares, se realizó la siguiente simplificación: el punto de unión de las "alas" con las "almas" de la sección circular se realiza en los puntos situados a 45°. Operando según el Eurocódigo 3 se llega a que las almas son de clase 3 y el ala superior de clase 4, con una esbeltez de 1,87 y un factor de reducción de 0,47.

Las barras se han discretizado como barras biarticuladas que no admiten compresiones; su rigidez está afectada por su peso propio y por su estado tensional (efecto catenaria). Para representar este efecto se ha empleado la Ecuación 3 o fórmula de Ernst, que modifica el módulo de elasticidad del material para corregir su comportamiento real, en un proceso iterativo:

$$E_T = \frac{E}{1 + \frac{q^2 \cdot d^2 \cdot E \cdot A}{12 \cdot T^3}} \quad (3)$$

donde  $E$  es el módulo del material,  $q$  es el peso lineal de las barras,  $d$  es la proyección horizontal de la barra,  $A$  es la sección y  $T$  es la tensión en la cuerda.

### 2.2.3. Comprobaciones

Se han dimensionado los elementos a nivel de punto (Figura 5), comprobando que las tensiones que aparecen en las partes más solicitadas de la sección

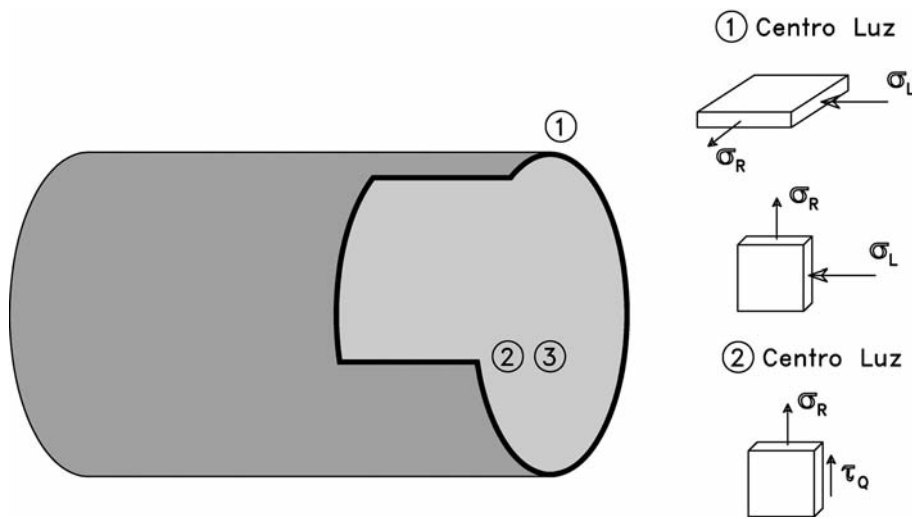


Figura 5. Esquema tensional

sean inferiores a las que establece el criterio de plastificación de von Mises recogido en la Ecuación 4:

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3 \cdot \tau_{xy}^2} < \sigma_{ult} \quad (4)$$

- Tubería

Dentro de las sollicitaciones en la tubería, la presión interna del agua utiliza aproximadamente el 50 % de la capacidad de la sección. Para limitar las deformaciones se ha seguido el criterio fijado por el AWWA [1], que establece una deformación máxima por operación de  $L/360$ .

- Mástiles

En los mástiles se ha limitado la deformabilidad a  $1/200$  para limitar la amplificación de los esfuerzos y por estética. Se han estudiado además las vibraciones que pueden generar el viento en el mástil más alto por desprendimiento de torbellinos (calle de Von Karman), empleando la Ecuación 5, que puede encontrarse en [3] y que recoge también el Eurocódigo 1. La máxima amplitud  $y_f$  a la velocidad crítica del viento es la siguiente:

$$\frac{\max y_f}{b} = K_w \cdot K \cdot c_{lat} \cdot \frac{1}{S_t^2} \cdot \frac{1}{S_c} \quad (5)$$

donde  $b$  es el ancho del mástil,  $K_w$  es el factor de longitud efectiva de correlación de una ménsula, con una forma modal de flexión de forma parabólica y pequeños desplazamientos en cabeza;  $K$  es el factor de forma modal;  $c_{lat}$  es el coeficiente de fuerza de excitación aerodinámica,  $S_t$  es el número de Strouhal y  $S_c$  es el número de Scrouton. La máxima amplitud obtenida es de 3 cm y se ha comprobado la resistencia con las fuerzas inerciales inducidas.

La fatiga en los mástiles puede estar originada tanto por el viento como por las operaciones de la tubería.

El intervalo tensional originado por la acción del viento está dentro de los límites admitidos con los detalles de la obra; en cuanto a las operaciones de la tubería, está previsto un régimen estándar de funcionamiento no superior a las dos paradas al día, por lo que no son esperables problemas por este aspecto.

- Barras

Considerando tanto la fuerza axial como el incremento tensional derivado de la flexión de la barra, la tensión máxima de la barra en servicio es del 50 % la tensión de rotura garantizada por el fabricante; se acota así el problema de la fatiga por la operación de la tubería y se asegura la ausencia de deformaciones plásticas diferidas.

Para evaluar la fatiga por viento se han seguido las recomendaciones del Manual de Tirantes [6], evaluando el incremento tensional con la Ecuación 6:

$$\Delta\sigma_{fatiga} = \left[ 1,08 + 0,00756 \cdot (\log N)^2 - 0,188 \cdot (\log N) \right] \cdot \Delta\sigma_{T=100} \quad (6)$$

donde  $\Delta\sigma_{T=100}$  es el incremento tensional por el viento de período de retorno de 100 años y  $N$  se toma igual a 10.

### 2.3. Construcción

La parte más interesante del suministro de los materiales y preparación de la obra fue el curvado de los tubos que forman los mástiles. Se obtuvieron a partir de tubo de acero fabricado según API 5L X65 que fue suministrado a la fábrica encargada de esta operación en piezas de 12 metros de longitud máxima. Por las dimensiones y espesores de las piezas, el curvado hubo de realizarse por inducción en Génova. El procedimiento de curvado por inducción se basa en la aplicación de calor local empleando energía eléctrica de alta frecuencia: se utiliza una bobina de



Figura 6. Montaje de los mástiles

inducción colocada alrededor de la tubería a curvar; la bobina calienta una pequeña sección circunferencial de la tubería hasta alcanzar una temperatura comprendida entre los 850 y los 1.100 grados centígrados; conforme se consigue la temperatura correcta de curvado el tubo se desplaza lentamente a través de la bobina, mientras se aplica la fuerza de curvatura mediante un brazo de radio fijo; cuando se produce la curvatura del tubo el área adyacente por delante de la banda que se está calentando es enfriado mediante aire o agua para mantener las propiedades del material. El inconveniente de este procedimiento es que se desaprovecha la parte inicial y final del tubo, que es donde se posiciona la mordaza.

La tubería se lanzó en dos tramos apeándola provisionalmente en el cauce. En cambio, los distintos tramos de los mástiles se llevaron a la obra y se acopiaron en el terreno. Para el ensamblaje de los mástiles se prepararon cuatro plataformas niveladas de hormigón y nichos en los puntos donde se unían los tramos para permitir la soldadura circunferencial del mástil (Figura 6). Una vez soldado cada uno de los mástiles se replantearon topográficamente y se abrieron los huecos para posteriormente montar y soldar las chapas de las orejetas. Esta fase en tierra finalizó con el control de calidad de las soldaduras realizadas mediante líquidos, partículas magnéticas, ultrasonidos o rayos x, según el tipo de soldadura, y con una primera imprimación de protección anti-corrosión.

Los mástiles se izaron y colocaron como elementos independientes con grúas de alta capacidad: fueron necesarias dos para conseguir suficiente estabilidad y precisión. Se soldaron a la pieza de arranque: esta soldadura es crítica para la seguridad, lo que incidió en su control de calidad. Esta fase de colocación de mástiles terminó con la corrección de la deformación del proceso. La deformación en los mástiles se corrigió utilizando un tráctel entre ellos, de esta forma se consiguió que los mástiles tuvieran la posición teórica original correspondiente a la fase de los mástiles colocados con las barras intermedias (fase contemplada en el cálculo); como la geometría es asimétrica, la posición global está ligeramente cabeceada hacia el barranco en

ambos estribos. En los mástiles más cortos esta deformación fue imperceptible; en los mástiles más largos se corrigió el cabeceo con otro tráctel entre los mástiles y la retenida para facilitar las siguientes fases constructivas.

En esta fase se replantearon topográficamente las orejetas en su posición y se realizó el primer montaje en taller de las barras roscadas. Las barras son macizas, de métrica 76 mm, y acaban en extremos mecanizados y roscados, preparados para recibir las horquillas de enganche a la estructura y los manguitos tensores de acople que sirven tanto para conectar las distintas partes de la barra como para introducir tensión en las mismas por acortamiento relativo entre las dos partes que unen. Con la longitud definitiva se llevaron a la obra y se colocaron en la estructura (Figura 7).

La tensión que se puede introducir a la estructura con las barras roscadas es limitada, una tensión máxima de 120 kN, mediante el roscado de los acopladores con llave dinamométrica que proporciona un par máximo de 700 – 1500 N.m. El izado de



Figura 7. Colocación barras



Figura 8. Gatos hidráulicos para izado de la estructura



Figura 9. Perfil de la estructura terminada



Figura 10. Roscado de las barras



Figura 11. Vista aérea de la estructura terminada



la tubería del apeo y la puesta en carga de la estructura se realizó dando una predeformada controlada de 35 mm a la tubería con medios hidráulicos (Figura 8), seguido de un tensado máximo de las barras (Figura 9) y finalizando con un desapeo controlado de la tubería.

La construcción terminó con la aplicación de las últimas capas de pintura anti-corrosión y con el pintado decorativo, además de los últimos movimientos de tierras y vallas de protección anti-vandálicas. Se realizó una prueba de carga de la estructura coincidiendo con la primera puesta en marcha de las bombas de la estación de Llanera, situada inmediatamente aguas abajo: los resultados de las lecturas de las deformaciones fueron satisfactorios.

## REFERENCIAS

- [1] AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA). *Steel Water Pipe: a Guide for Design and Installation (M11)*. 4ª ed. Denver, CO: AWWA, 2004. 241 p. ISBN: 1-58321-274-4
- [2] SPENA F.R., SPARACIO R. "Ponti tubo ad Amaca per l'attraversamento del Sele". *Costruzioni metalliche*. 1980, n° 6, p. 293-299.
- [3] MESEGUER J., SANZ A., PERALES J.M., y PINDADO S. *Aerodinámica civil. Cargas de viento en las edificaciones*. 1ª ed. Madrid: McGraw-Hill, 2001. 270 p.
- [4] UNE-ENV 1991-2-4:1998. *Eurocódigo 1 - Bases de proyecto y acciones en estructuras – Parte 2 – 4: Acciones en estructuras. Acciones del viento*. Madrid: AENOR, 1998. 134 p.
- [5] CEDEX. *Guía Técnica sobre tuberías para el transporte de agua a presión*. 1ª ed. Madrid: Ministerio de Fomento, 2003. 438 p.
- [6] ACHE. *Manual de Tirantes*. 1ª ed. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2007. 219 p.
- [7] UNE-ENV 1993-1-1:2008. *Eurocódigo 3 – Proyecto de estructuras de acero – Parte 1-1: reglas generales y reglas para edificios*. Madrid: AENOR, 2008.

## RELACIÓN DE PARTICIPANTES

- **Nombre de la obra:**

Nueva conducción Júcar – Vinalopó. Tramo E de la conexión del curso bajo del río Júcar con el tramo V.

- **Nombre de la estructura:**

Acueducto del Barranco Roig.

- **Propiedad y Dirección de obra:**

AcuaJúcar, S.A.

- **Consultora encargada del proyecto de la estructura:**

TYPSA

- **Empresa constructora:**

UTE Acciona Infraestructuras, S.A. – Construcciones Luján S.A.

- **Asistencia Técnica a la Dirección de obra:**

Socoin S.L., CPS Ingenieros, Iturribizia S.L. (parte estructural).

- **Fabricación de Estructura Metálica:**

Obras Metálicas Noroeste S.L., OMP MONGIARDINO SPA (curvado de los tubos).