

## DESARROLLO DE SOLUCIONES ARCO BOWSTRING CON SISTEMA DE PÉNDOLAS TIPO NETWORK: EL PUENTE DE VALDEBEBAS

### **Francisco MILLANES MATO**

Doctor Ingeniero de Caminos C. y P.  
IDEAM S.A.  
Presidente  
[general@ideam.es](mailto:general@ideam.es)

### **Daniel MARTÍNEZ AGROMAYOR**

Ingeniero de Caminos C. y P.  
IDEAM S.A.  
Jefe de Proyectos  
[daniel.martinez@ideam.es](mailto:daniel.martinez@ideam.es)

### **Pablo SOLERA PÉREZ**

Ingeniero de Caminos C. y P.  
IDEAM S.A.  
Ingeniero Proyectista  
[pablo.solera@ideam.es](mailto:pablo.solera@ideam.es)

### **Jesús MARTÍN SUÁREZ**

Ingeniero de Caminos C. y P.  
IDEAM S.A.  
Ingeniero Proyectista  
[jesus.martin@ideam.es](mailto:jesus.martin@ideam.es)

## **RESUMEN**

El nuevo Puente de Valdebebas, con una luz principal de 150 m, está llamado a ser uno de los puentes emblemáticos de las entradas a Madrid. Su concepción ha surgido siguiendo criterios funcionales, estéticos y de eficiencia estructural. El resultado es un arco bowstring metálico con tablero mixto, cuya forma está inspirada en el diseño industrial, armonizando con la Terminal T4 del Aeropuerto de Barajas. El puente presenta una conexión innovadora entre arco y tablero: diagrid, una malla metálica que adecuadamente combinada con la iluminación dotan al puente de una personalidad singular.

**PALABRAS CLAVE:** Diagrid, arco bowstring, iluminación, diseño industrial, ortodoxia estructural

## **1. CONCURSO PARA UN PUENTE SINGULAR**

En marzo de 2007 la Junta de Compensación “Parque de Valdebebas” convoca un Concurso de ideas para el diseño y proyecto de construcción de un puente singular, actuación que no se rige por parámetros estrictamente funcionales.

Al contrario, el nuevo puente está llamado a ser una referencia urbana de primer orden, una carta de presentación del concepto urbano que persigue Valdebebas pero, también, la mejor puerta de acceso a la T4 del Aeropuerto de Madrid. Se trata, por tanto, de proyectar una estructura singular, que pueda llegar a representar una seña de identidad propia de Valdebebas, entre hitos urbanísticos y arquitectónicos de la talla de la Nueva Ciudad de la Justicia de la Comunidad de Madrid, la nueva Ciudad Deportiva del Real Madrid, la Ampliación de los Recintos FERIALES y la propia T4 de los renombrados estudios de arquitectura de Lamela y Richard Rogers.

La propuesta de IDEAM, con la coordinación de los equipos de ingenieros y arquitectos, autores del presente artículo, ganó el concurso. El proyecto constructivo se realizó en 2008. La construcción está prevista que se inicie en el segundo semestre de 2011.



**Figura 1. Infografía del alzado de la solución propuesta**

## **2. DISEÑO CONCEPTUAL DE LA SOLUCIÓN PROYECTADA**

El puente proyectado tiene vocación de objeto y, como tal, de icono representativo de la actuación. Se ha proyectado un puente urbano, un puente ambicioso en su diseño, innovador en los materiales, concepción formal, tipología estructural y proceso constructivo. Una apuesta rigurosa por la confluencia entre formas arquitectónicas y ortodoxia estructural.

El puente proyectado es deliberadamente objetual y se presenta como tal con unas formas claras y precisas, más cerca de los diseños industriales de Roger Tallón, o de la industria de la aviación, que de las consabidas geometrías de las tipologías estructurales de puentes capaces de salvar luces de 150 m.

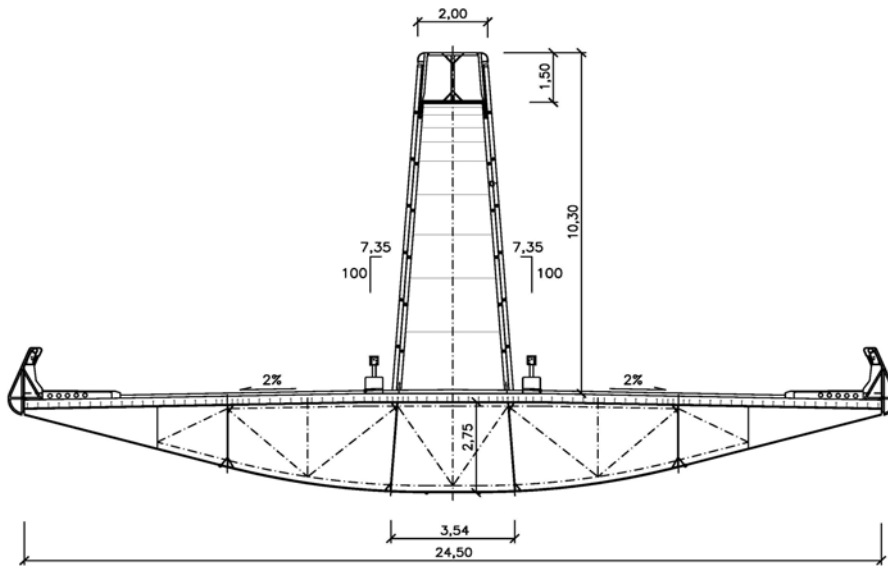
La influencia del aeropuerto no se puede obviar, no se ha querido obviar: su “influencia” ha inspirado las formas aerodinámicas del puente, la concepción en lámina, o cáscara, metálica del tablero, la elección de la pintura de aluminio metalizada que le confiere un aspecto material próximo al de la cubierta de la T4.



**Figura 2. Vista desde el tablero del arco y 'diagrid'**

Pero, a su vez, el puente proyectado responde asimismo a una concepción estructural potente y rotunda, de la que se derivan sus principales virtudes de claridad y simplicidad formal, pureza estructural y geometría dinámica, sugerente y atractiva.

Un puente con un carácter geométrico muy peculiar, casi aeronáutico, cuya forma se desarrolla a partir de una sección variable en T invertida, asociada a una tipología estructural en arco rebajado atirantado con el tablero inferior (tipo bow-string), clásico esquema estructural que permite salvar la luz solicitada, de 150 m, sin transmitir empujes al terreno.



**Figura 3. Sección transversal por centro de vano. ‘Sección en T invertida’.**

El aspecto formal más relevante y singular del diseño se desarrolla a partir de un doble “*diagrid*” o malla estructural permeable, de la que cuelga el tablero del arco y que, como plano de gran rigidez, materializa el alma, en malla o celosía, de la gran viga de altura variable en que se transforma nuestro arco atirantado. El “*diagrid*” se diseña en doble plano en cada lateral de la espina de la estructura, conformando una cuádruple malla decalada que, al mismo tiempo que garantiza la necesaria transparencia visual, la dota de un carácter dinámico, generador de infinitas luces y sombras que reverberan y enriquecen, de sugerencias y matices, las sensaciones visuales de las perspectivas, diurnas o nocturnas, desde múltiples y diferentes puntos de vista.

La estructura tramada resultante del “*diagrid*” crea una silueta lateral de “fachada” propia de un edificio u objeto arquitectónico. Por otra parte, toda la forma de la estructura es eficaz, necesaria desde un punto de vista resistente, sin elementos “ornamentales” superfluos, esencialmente ortodoxa en su diseño estructural.

El diseño de nuestra propuesta, siendo riguroso estructuralmente, resulta completamente innovador en el ámbito de los puentes, no conociéndose ningún antecedente similar o parecido tanto en el ámbito nacional como internacional. El puente tiene una fachada o alzado arquitectónico rotundo y reconocible, configurado dentro de un perfil estructural clásico y ortodoxo: el resultado de tal confluencia es un diseño innovador, cuyos atractivos y cualidades arquitectónicas se ven acompañados de una respuesta estructural de gran eficacia.

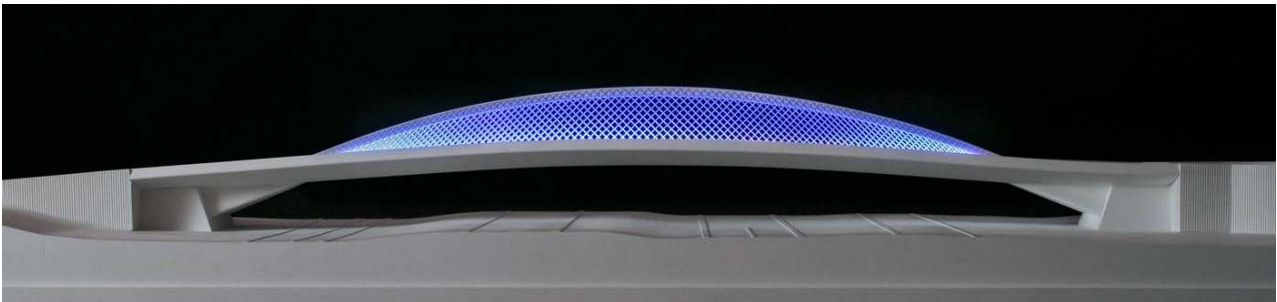
La luz que, a lo largo del día, atraviesa la jaula formada por la cuádruple malla decalada que constituye el “*diagrid*” multiplicará, en función de la incidencia luminosa y del punto de vista del viandante o conductor, el rico juego de transparencias, reverberaciones, luces y sombras arrojadas del efecto celosía, en un efecto que recuerda, y se inspira, en las creaciones escultóricas de Eusebio Sempere.



**Figura 4. Infografía de la vista general del puente**

Por la noche, la fachada del “*diagrid*” se convierte en el elemento de referencia de la actuación. El puente no se ilumina, sino que, al tener cuerpo y alojar las luminarias en su volumen interior, entre los dobles planos laterales del “*diagrid*”, se convierte en un espacio iluminado, a modo de malla o jaula en la que se contiene la luz.

La iluminación se refuerza desde las barandas laterales que, mediante una suave y tenue luz reflejada, perfilan las aristas laterales perfiladas del acero. Unos pequeños focos complementarios, de baja intensidad y debidamente orientados, terminarán de perfilar y sugerir las aristas del cartabón triangular inferior que sirve de arranque del puente.



**Figura 5. Maqueta del puente con la iluminación en el interior del diagrid**

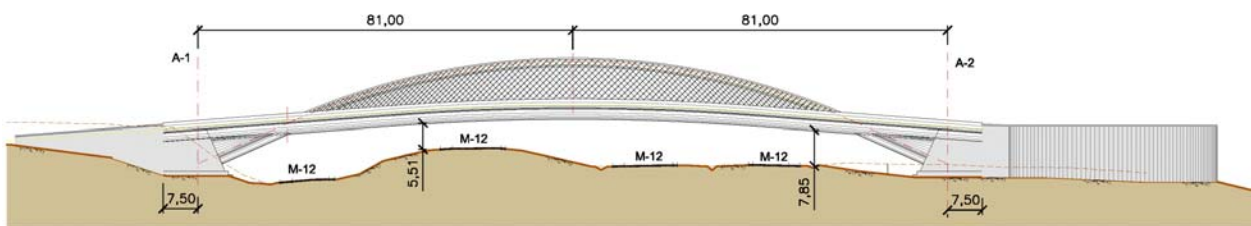
### 3. CONCEPTO ESTRUCTURAL

A pesar del carácter innovador del diseño formal de la propuesta y de su enfoque objetual, arquitectónico, poco habitual en el ámbito de los puentes, el diseño planteado corresponde a una ortodoxa concepción estructural en la que, como se ha dicho, todos los elementos que lo componen responde a un optimizado esquema resistente, del que se ha eliminado cualquier elemento superfluo u ornamental. La potencia formal y carácter arquitectónico de la propuesta surgen así por simple ordenación y tratamiento del diseño de los elementos resistentes. El esquema resistente longitudinal puede leerse desde dos planteamientos que, en sí mismos, sólo constituyen dos aproximaciones teóricas a un mismo discurso estructural:

\* El vano de 156 m libres visualmente, equivalente a 162 m entre los ejes de apoyos ocultos en los estribos, se resuelve mediante un arco atirantado central de 124 m, de luz, con arco superior y tablero/tirante inferior en sección mixta. Las péndolas de cuelgue del tablero sobre el arco se disponen inclinadas, como en los conocidos arcos tipo Nielsen pero, en este caso, se sustituyen por un cuádruple “*diagrid*”, en doble plano, con perfiles rectangulares huecos (RHS) convencionales cruzándose a 45° y creando un plano de cuelgue rígido que impide el pandeo del arco mixto en su plano. Unos sencillos arriostramientos triangulares, dispuestos espaciados a 45°

entre planos del “*diagrid*”, permiten controlar asimismo el pandeo lateral del arco fuera de su plano.

Las reacciones verticales del bow-string actúan sobre los extremos de sendos cartabones o ménsulas de 18,0 m de vuelo respecto a los ejes de apoyos. La reacción se descompone en una biela inclinada resistida por el plano inferior del cartabón, debidamente conectado a un hormigón de fondo interior (en doble acción mixta), y en una tracción horizontal que es recogida por el cajón superior metálico. El esquema se autoequilibra, según un mecanismo clásico de célula triangular que queda oculto en el estribo: la tracción superior se continúa por un tirante horizontal de hormigón pretensado anclado al final del tablero mixto; la tracción del tirante, de unos 18 m de longitud oculta, se descompone en una fuerza ascendente vertical equilibrada por el oportuno contrapeso anclado a dicho final de estribo y una biela inclinada comprimida de hormigón que, dirigiéndose hacia el apoyo del vano principal cierra el circuito de equilibrio transmitiendo la resultante vertical a una cimentación pilotada. El recinto oculto de hormigón que materializa la célula triangular se cierra lateralmente mediante dos muros-pantalla que se vinculan al encepado de apoyo y a la zapata del contrapeso confiriendo la rigidez necesaria a la cimentación frente a eventuales movimientos horizontales.



**Figura 6. Alzado general del puente**

\* Alternativamente, el esquema resistente puede explicarse desde otra óptica, equivalente desde el punto de vista estructural: se proyecta un vano biempotrado de 162 m de luz entre apoyos. El centro de dicho vano, a flexión positiva, es resistido por una viga de gran canto de 124 m, en celosía de altura variable materializada por el cordón comprimido superior (arco mixto) el cordón traccionado inferior (tablero mixto) y la celosía del alma (“*diagrid*”). En la zona a flexión negativa de 18 m, próxima a apoyos, el tablero mixto recoge la tracción superior y el cartabón, con doble acción mixta, la compresión inferior. El momento de empotramiento en apoyos se convierte, a través del mecanismo de célula triangular antes descrito, en un corto vano de compensación oculto, cuya reacción negativa extrema se equilibra con un contrapeso.

En ambos discursos estructurales, el “*diagrid*” trabaja fundamentalmente a tracción, colgando las cargas del tablero del cordón superior del arco, ya que la componente inclinada de la compresión de éste último alivia muy sensiblemente el trabajo a cortante de dicho “*diagrid*”.

La sección transversal, en T invertida del tramo central de 124 m recoge básicamente la torsión de las sobrecargas excéntricas actuando sobre media plataforma, de relativa entidad dada la gran anchura de esta, mediante la gran rigidez a torsión de la sección mixta cerrada pluricelular que constituye el tablero de nuestra propuesta, empotrado a torsión en los extremos de los cartabones laterales.

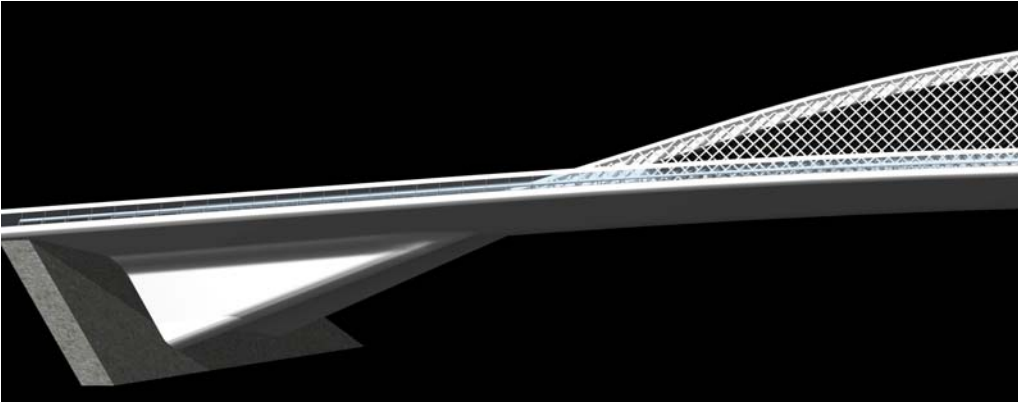


Figura 7. Detalle del cartabón – arranque del arco

## 4. PRINCIPALES ELEMENTOS ESTRUCTURALES

### 4.1. Tablero

El tablero está formado por una sección metálica cajón multicelular, de canto constante de 3 m, máximo en el eje de la sección, sobre la que se dispone una losa de hormigón, también de canto constante de 0,25 m de espesor. El acero es de tipo S355 J2, con un límite elástico de 355 N/mm<sup>2</sup>.

El fondo de la sección sigue una curva circular en los 30,00 m centrales, prolongándose, mediante rectas tangentes a esta curva, hacia los laterales. En los extremos, el fondo del tablero se remata mediante una pieza metálica que integra las impostas semicirculares y los petos-barreras, ligeramente inclinados respecto a la vertical, quedando oculta, una barrera rígida de hormigón que garantiza la exigible contención de los vehículos que circulen sobre el tablero del puente, impidiendo cualquier riesgo de caída por accidente sobre la M-12. Se consigue de esta forma, generar una superficie limpia y continua, de geometría suave y características aerodinámicas, que hacen del tablero un elemento ligero a pesar de su elevada anchura y rigidez a sección. El tablero queda dividido internamente en 5 células al disponerse 4 almas internas. Para permitir la división del cajón en piezas transportables a obra, y conseguir además que las dos almas centrales se conecten con los elementos de cuelgue arco-tablero o diagrid, las almas se han dispuesto inclinadas.

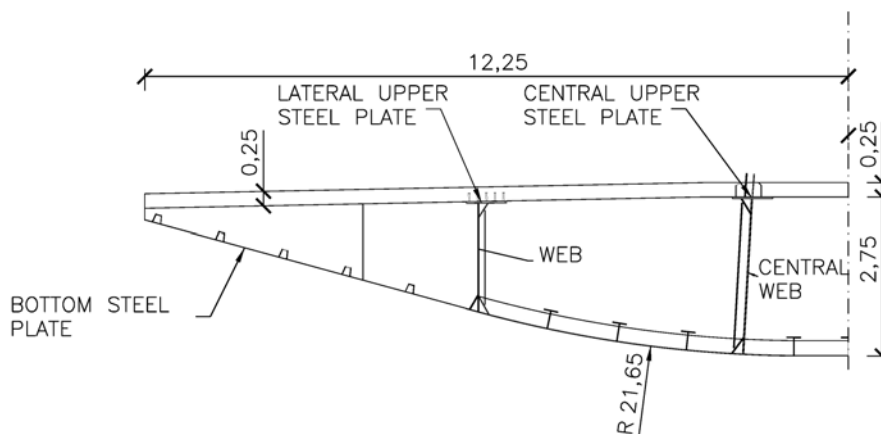


Figura 8. Sección transversal del tablero

Sobre cada una de las almas, se suelda una platabanda superior rectangular, sobre la que se sueldan los pernos de conexión entre el tablero metálico y la losa de hormigón superior, para materializar una sección mixta.

Sobre las platabandas superiores se apoya la losa de hormigón superior de 0,25 m de espesor y de hormigón HA-35, con una resistencia característica superior a los 35 N/mm<sup>2</sup>. Esta losa se hormigona sobre prelosas, también de hormigón de la misma calidad, que sirven inicialmente como encofrado de la losa y posteriormente trabajan solidariamente con ésta.

Transversalmente, dentro de la sección del cajón y cada 5 m, se disponen riostras con un sistema estructural en celosía que permiten recoger las acciones de las cargas excéntricas y transmitir las hasta el centro del tablero, donde es recogido por los planos de sustentación de éste, o diagrid, que a modo de péndolas inclinadas lo cuelgan del arco.

#### **4.2. Arco**

Todo el tablero queda sustentado por el arco, que con una flecha estructural de 10,30 m y considerando exclusivamente la longitud del tablero situada por debajo del arco, de 124 m, nos proporciona una relación flecha-luz de 1/12. Este valor nos indica que estamos ante un puente arco rebajado, situándose los valores de los arcos normales en el entorno de 1/5 a 1/8. Con estas dimensiones, además de responder a los objetivos formales previstos, nos permite alejarnos de los límites superiores impuestos por la servidumbre aeronáutica.

La sección del arco es casi rectangular, abandonando esta geometría en la zona superior, donde se disponen sendos salientes para poder recoger los planos de diagrid. El canto del arco es constante, de 1,50 m, mientras que el ancho varía linealmente desde los 4 m en el encuentro con el tablero, hasta los 2,00 m que presenta en la clave. Está formado por acero S355J2, con espesor máximo en la clave, donde la sección es más reducida y mínimo en el entronque con el tablero, donde alcanza su mayor dimensión.

En alzado, el arco sigue una curva circular de radio aproximado de 150 m, continuando mediante rectas tangentes hasta el tablero en sus zonas de arranque.

Por debajo del tablero, el arco se prolonga hasta alcanzar los apoyos, abriéndose en anchura, y manteniendo el contacto con el tablero, configurando un tímpano triangular volumétrico, de gran potencia formal. La geometría del tímpano facilita la difusión de las compresiones que transmite el arco a su llegada a los puntos de apoyo.

Este elemento mantiene la estructura de pieza mixta descrita para el arco, al estar formado externamente por una piel de acero, que aloja en su interior una biela inclinada de hormigón de fondo, debidamente conectada a dicho acero.

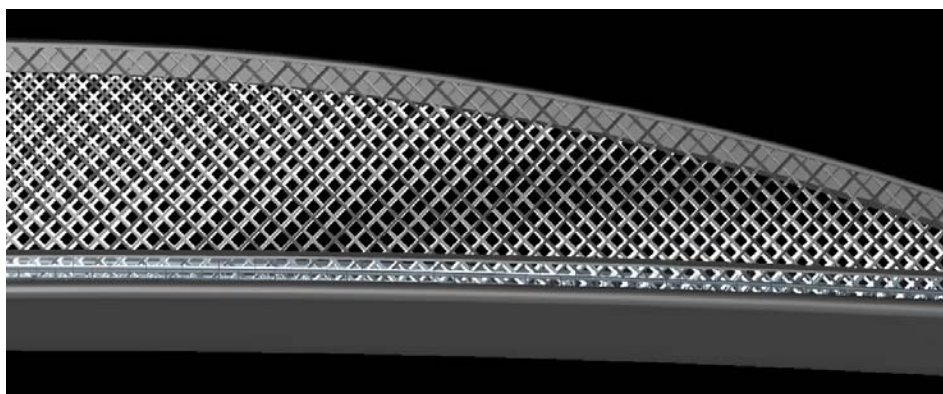
#### **4.3. Sistema de sustentación del tablero o 'diagrid'**

La conexión del tablero con el arco se realiza mediante una malla o celosía de perfiles tubulares rectangulares de acero S355 J2H, denominada "diagrid". Su misión estructural consiste en trasladar las cargas verticales actuantes sobre el tablero hasta el arco. Tiene, por tanto, un comportamiento básico a tracción, dado que su trabajo a cortante como alma de una viga en T invertida se ve drásticamente reducido por la componente inclinada de la compresión del arco y la propia rigidez a flexión del tablero-tirante.

Cada malla de diagrid está formada, a su vez, por dos familias de perfiles tubulares, dispuestos perpendicularmente entre sí, colocados en el mismo plano y dispuestos a 45° respecto la horizontal. A cada lado del arco se colocan dos planos de diagrid, cada uno en un sentido, y ligeramente inclinados, decalándose entre sí, y configurando en conjunto una malla en relieve, con el doble de elementos que una malla simple y la mitad de separación entre elementos.

La conexión del diagrid al tablero y al arco se realiza mediante la soldadura de los perfiles a estos elementos. En el caso del tablero, se prolongan hacia el exterior las dos almas centrales del tablero mediante una chapa en forma de peine, a las que se sueldan todos los perfiles de la malla. En el caso del arco, la unión se realiza directamente, soldando los perfiles tubulares a las chapas exteriores del arco. La conexión mediante soldaduras en ángulo laterales de las aristas de los tubos, trabajando longitudinalmente, es segura y muy sencilla de ejecución y control en obra.

La rigidez en un plano de los 4 planos de diagrid elimina prácticamente cualquier problema de inestabilidad del arco en su plano. A su vez, los dos planos del diagrid de cara lateral de la espina estructural, se arriostran lateralmente entre si mediante triangulaciones, para evitar vibraciones laterales bajo la acción del viento. Dichas triangulaciones se disponen en planos inclinados a 45°, coincidiendo con las diagonales del diagrid, por lo que no resultan visibles exteriormente ni alteran la iluminación interior del diagrid. De esta forma se dota de rigidez transversalmente los paneles de diagrid, tanto durante el montaje como bajo las acciones del viento sobre dichos planos de celosía.



**Figura 9. Detalle del 'diagrid'**

Las dos familias del diagonales de cada cara del diagrid tienen un trabajo estructural independiente. No obstante deben disponerse en los puntos de cruce unos pequeños dispositivos, ocultos, de tipo pasador/abrazadera, que sin alterar su trabajo estructural, ni coacciona los movimientos y giros relativos entre diagonales, los vincula transversalmente para evitar roces y traqueteos parásitos bajo la acción del viento.

#### **4.4. Sistema de empotramiento del arco. Contrapeso**

Como ya se ha comentado, el puente queda equilibrado en sus extremos mediante la disposición de un contrapeso de hormigón, dispuesto a todo ancho del tablero.

En el punto superior del contrapeso se produce el equilibrio de la fuerza de tracción transmitida por el tablero, la fuerza vertical generada por el contrapeso y la compresión transmitida por la biela de hormigón que conecta el contrapeso con el punto de apoyo del arco.



Para facilitar esta transmisión de esfuerzos, los últimos metros del tablero, ocultos dentro del estribo, se han diseñado en hormigón pretensado, consiguiendo de esta forma transmitir adecuadamente las tracciones del tablero metálico, sobre el que se anclan directamente los cables de pretensado, y permitiendo crear un nudo macizo en la cabeza del contrapeso.

La reacción de levantamiento del tablero se recoge con un tope antilevantamiento y 6 apoyos esféricos o similar. En el contrapeso E2 se disponen, al ser fijo, unos topes longitudinales.



**Figura 10. Maqueta del puente**