

# PASARELA MIXTA HELICOIDAL MOSTOLES TECNOLOGICO

**Santiago Pérez-Fadón Martínez**

Ingeniero de Caminos  
Ferrovia-Agroman S.A.  
Director Técnico  
sp.fadon@ferrovial.es

**José Emilio Herrero Beneitez**

Ingeniero de Caminos  
Ferrovia-Agroman S.A.  
Jefe de Área de Estructuras de Obra Civil  
j.e.herrero@ferrovial.es

**Juan José Sánchez Ramírez**

Ingeniero de Caminos  
Ferrovia-Agroman S.A.  
Jefe de departamento de EOC  
j.j.sanchez@ferrovial.es

## Resumen

En este artículo se describe el proyecto y construcción de la Pasarela Mixta Helicoidal Móstoles Tecnológico, incluida en las obras de urbanización correspondiente al plan de sectorización PAU-5 y plan parcial en el municipio de Móstoles en Madrid. La estructura se plantea como una celosía tubular espacial de acero S355 que se configura mediante el entrelazado de 4 helicoides en dos direcciones formadas por tubos de 139.7 mm. de diámetro, y cuatro tubos longitudinales continuos de 193.7 mm. de diámetro. El forjado se ha diseñado en hormigón armado con chapa plegada colaborante. Las pilas son fustes verticales de sección circular de acero rellenas de hormigón de diámetro variable, cuyas cimentaciones se resuelven mediante encepados de cuatro micropilotes. Los estribos son cargaderos de hormigón armado cuya cimentación está constituida por dos pilotes de hormigón armado "in situ", de  $\phi 0.80$  m.

**Palabras Clave:** Pasarela mixta, tubos, celosía espacial, helicoidal.

## 1. Descripción

### 1.1 Estructura Principal

La pasarela de aproximadamente 95 metros de longitud consta de 4 vanos, siendo los dos centrales de 35 metros de luz bajo los que discurren los carriles centrales y vías de servicio de la A5, y dos vanos extremos de 12.64 m. La plataforma peatonal se ha proyectado con un ancho libre entre barandillas de 2.5 m.



*Fig. 1 Alzado general de la pasarela*

La celosía espacial conforma una viga continua de sección circular que está compuesta por cuatro tubos longitudinales de sección circular de 193.7 mm de diámetro y acero S355, con espesores de 10 y 8 mm. según las zonas, unidos mediante dos celosías verticales y dos horizontales resultantes de la intersección de 4 helicoides de 7.778 metros de paso, con otras tantas que giran en sentido contrario. Estos helicoides están constituidos por tubos de sección circular de 139.7 mm. de diámetro y acero S355, con espesores de 4 y 10 mm. según el tramo. Dado que curvar un tubo según la directriz de un helicoides era mecánicamente imposible, ya que sólo es posible curvar siguiendo directrices planas, para discretizar la directriz de cada uno de los 8 helicoides se encajó un arco de círculo cuyo plano se abatía mediante quiebros en las intersecciones para ajustarse lo más posible a la directriz helicoidal teórica. Por tanto cada tramo de tubo curvo entre intersecciones es un arco de círculo de radio 2766 m. que se repite a lo largo de toda la estructura.

La sección transversal queda pues configurada por los cuatro tubos longitudinales continuos dispuestos en las esquinas de un teórico cuadrado de 2.75 m. de lado, y las cuatro celosías formadas por los tubos curvos de desarrollo helicoidal que se intersectan con los tubos longitudinales en las esquinas de este teórico cuadrado cada  $\frac{1}{4}$  de paso del helicoides.

La intersección de los diferentes tubos genera dos tipos de uniones:

- Uniones en "X" de los tubos helicoidales en la parte central de las celosías verticales y horizontales
- Uniones tipo "DK", que son las uniones que materializan la intersección de los tubos longitudinales rectos con los tubos helicoidales de las celosías verticales y horizontales. En las uniones inferiores además se produce la unión con las correas cuadradas que soportan el forjado.



*Fig. 2 Uniones en "X"*



*Fig. 3 Uniones en "DK"*

Las uniones en "X" están constituidas por la intersección de los cuatro tubos curvos  $\phi 139.7$  mm de los helicoides formando un ángulo entre ejes de tubos de  $64^\circ$  y  $116^\circ$ , y de  $5^\circ$  con el plano horizontal. En el interior de la unión se disponen cuatro chapas elipsoidales acarteladas, de espesores diferentes en función del espesor de los tubos de la unión, que tienen una doble función, por un lado rigidizar la unión, y por otro servir de chapas de respaldo a la soldadura de los tubos helicoidales entre sí, configurándose así una unión en ángulo en lugar de una unión a tope.

Las uniones en "DK" se forman por la intersección de los cuatro tubos curvos  $\phi 139.7$  mm de los helicoides con los tubos longitudinales rectos  $\phi 193.7$  mm., que son pasantes. En el interior de la unión se han dispuesto también unas chapas con forma de media luna que sirven de respaldo a la soldadura de la intersección de los tubos curvos helicoidales entre sí y se fabrican con espesores de #8 y #15 mm. en función del espesor de los tubos curvos para las que sirven de respaldo.

Las correas de forjado se disponen en las uniones tipo DK inferiores y están formadas por perfiles rectangulares huecos de #120x80 mm., y hay de dos tipos:

- Las que sirven exclusivamente de apoyo para el forjado, que son de #8 mm. de espesor, y se sueldan sólo las almas de la correa por lo que su intersección es la correspondiente a una parte de las almas del mismo contra el tubo recto longitudinal.
- Las que sirven de riostra o tirante en estribos y pilas, que son de # 10 mm. de espesor y se sueldan en todo su contorno

En zonas localizadas, estas uniones "DK" se han rigidizado interiormente mediante una chapa circular interior de espesor #12 mm.



*Fig. 4 Chapas de rigidización y respaldo en uniones "X"*



*Fig. 5 Chapas de respaldo en uniones "DK"*

Como forjado se ha dispuesto una chapa colaborante tipo PL59/150 de #0.7 mm. de espesor de acero galvanizado, con una capa de compresión de hormigón armado de 4 cm. por encima de la onda. Para apoyar este forjado se disponen como se ha dicho correas de tubo cuadrado de 120x80x8, cada 2 metros aproximadamente, que atacan a los tubos longitudinales inferiores de la estructura de la pasarela en sus intersecciones con los tubos helicoidales. A modo de pavimento se ha colocado una tarima de de madera de ipé mecanizada hembra-hembra en laterales para su colocación con grapa atornillada a rastrel de pino cuperizado que se fijan a su vez al forjado.



Fig. 6 Forjado de chapa colaborante



Fig. 7 Pila mixta

## 1.2 Pilas y estribos

Cada una de las tres pilas de la pasarela consta de un fuste vertical y de la coronación superior formada por cuatro brazos inclinados. La zona superior da continuidad en alzado al desarrollo de la celosía vertical de los helicoides, y se empotra en los tubos longitudinales en la misma posición que lo haría la correspondiente celosía inferior que desaparece en esta zona. Se trata de tubos de acero S355 y sección circular variable de  $\phi$  139.7 mm. a  $\phi$  250 mm., con un espesor de chapa de 12 mm.

El fuste vertical de sección mixta acero-hormigón tiene forma circular de diámetro variable de  $\phi$  420 mm. en su conexión con los brazos superiores, hasta  $\phi$  640 mm. en su empotramiento en la cimentación, con un espesor de chapa de 8 mm. Interiormente dispone de los conectores necesarios para asegurar el trabajo de la sección mixta.

Las cimentaciones de las mismas se resuelven mediante encepados de hormigón de 3x3 metros con cuatro micropilotes de  $\phi$  260 mm. Los fustes se fijan a dichos encepados mediante 8 barras roscadas de 20 mm de diámetro.

Los estribos se han diseñado como cargaderos de hormigón armado sobre los terraplenes de las rampas de desembarco de la pasarela. Debido a los condicionantes geotécnicos de la ubicación de la pasarela sobre un relleno artificial, la cimentación está constituida por dos pilotes de hormigón armado "in situ", de 0.80 m de diámetro, uno bajo cada apoyo, con una longitud de 15.00 m. Por razones de disponibilidad de espacio para el futuro planeamiento de la zona, la berma delantera se ha recortado mediante un muro de keystone, que consiste en elementos prefabricados que se anclan al relleno mediante láminas de geotextil.



*Fig. 8 Muro de keystone*

### 1.3 Acabados

En pasarelas peatonales urbanas es importante invertir en los acabados de la estructura pues es donde el usuario fija más su atención. Por ello, se ha puesto un especial cuidado en los siguientes elementos:

- Pintura: Se ha aplicado un sistema bicapa antigraffiti de acabado de polisiloxano de alta durabilidad.
- Barandilla: Se ha dispuesto una barandilla con pasamanos de acero inoxidable y cristal de seguridad montado sobre un bastidor de acero, con montantes cada 2 metros.
- Cubierta: la cubierta, colocada por petición expresa del cliente, es de policarbonato alveolar tintado en azul.
- Afirmado: para el firme se ha acudido a la calidez que proporciona la madera colocando una tarima de IPE que es una madera tropical de alta densidad y gran dureza, que se fija al forjado de hormigón mediante rastreles de pino cuperizado.
- Iluminación: la iluminación del interior de la pasarela se ha diseñado como balizamiento para el viandante y se ha resuelto mediante fluorescentes alojados en el interior de un tubo cuadrado dispuesto bajo la barandilla y que alternativamente dispone de ventanas de cristal translúcido.
- También se ha cuidado el acabado de las rampas de acceso disponiendo un afirmado de loseta cerámica y báculos verticales para la necesaria iluminación de las mismas.



*Fig. 9 Rampas de acceso*



*Fig. 10 Barandilla y cubierta de policarbonato*



*Fig. 11 Tarima de IPE*



*Fig. 12 Iluminación*

## 2. Análisis estructural

### 2.1 Ensayo en túnel de viento

Para obtener las cargas producidas por el viento sobre todos los elementos de la pasarela, se ha construido un modelo a escala 1/20 en el Instituto Universitario de Microgravedad "Ignacio Da Riva". La elección de la escala ha estado condicionada en primer lugar por criterios de índole aerodinámica (el área frontal del modelo no puede ocupar más de un 12 % del área frontal de la cámara de ensayos, para evitar fenómenos de bloqueo), y en segundo lugar por la facilidad de construcción e instrumentación del modelo de ensayos. Para su construcción se han empleado principalmente aglomerado MDF (un material isotrópico ampliamente utilizado en carpintería), chapa de acero y tubo de poliamida, también se han empleado, para hacer las tomas de presión, tubo de latón y tubo de plástico para aplicaciones hospitalarias. El modelo, según se puede apreciar en la figura, consta de tres partes: la pasarela propiamente dicha, la cubierta y la barandilla.



Fig. 13 Modelo a escala 1/20



Fig. 14. Túnel de viento

El modelo de ensayos está instrumentado con treinta y ocho tomas de presión, dispuestas como sigue: hay nueve tomas en el extradós de la cubierta y otras nueve en el intradós, y cinco tomas en cada una de las caras de los parapetos (el de barlovento y el de sotavento).

El modelo ha sido ensayado para distintos valores del ángulo de ataque de la corriente, comprendidos entre  $\alpha = -9^\circ$  y  $\alpha = +9^\circ$ , y para dos posiciones relativas de la celosía y la barandilla; en la posición 1 las secciones donde están las tomas del cristal de la barandilla coinciden con el hueco de la celosía, mientras que en la posición 2 tales tomas están apantalladas por la misma.

A partir de las distribuciones de presión se han calculado los coeficientes de fuerza por unidad de longitud de pasarela, sumando, con el signo apropiado, los coeficientes de cada par de superficies multiplicados por sus longitudes de influencia; de este modo se han determinado, para la cubierta el coeficiente de sustentación  $c_l$ , y el de resistencia aerodinámica  $c_d$ .

Para los parapetos se han calculado los coeficientes de fuerza normal a la superficie de cristal,  $c_n$ , positivos cuando la acción del viento tiende a arrastrar al cuerpo según la corriente incidente.

A la vista de los resultados se concluye que, en general, sobre la cubierta la carga es mayor cuando las secciones de medida quedan en la posición 2, que sobre la cubierta significa una posición más expuesta, por lo que los coeficientes a emplear para calcular los efectos del viento fueron los obtenidos para esta posición. Por el contrario sobre los parapetos la posición más expuesta es la 1, que es la que proporciona cargas mayores.

Para calcular la carga aerodinámica sobre la estructura helicoidal de la pasarela se puede considerar, lo cual es conservador, que éste se comporta como si estuviera aislado, de modo que la carga aerodinámica sobre el entramado es la carga sobre cada uno de los tubos que lo conforman. Como en la realidad los otros elementos de la pasarela sí existen, los tubos de la pasarela situados a sotavento resultan apantallados por el resto de elementos, de forma que para determinar las cargas sobre el entramado helicoidal basta con considerar los tubos situados a barlovento.

## 2.2 Análisis global

El cálculo general de la estructura se realizó mediante un modelo espacial tridimensional realizado mediante ANSYS/CIVILFEM con el cual se obtenían esfuerzos y tensiones normales para cada estado de carga y combinaciones de ellas.

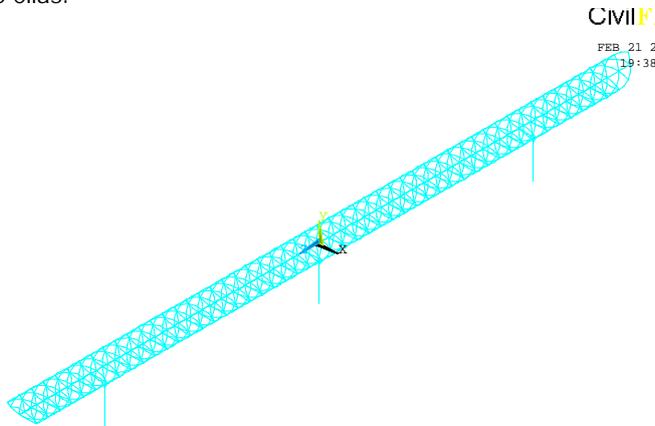


Fig. 15 Modelo de cálculo

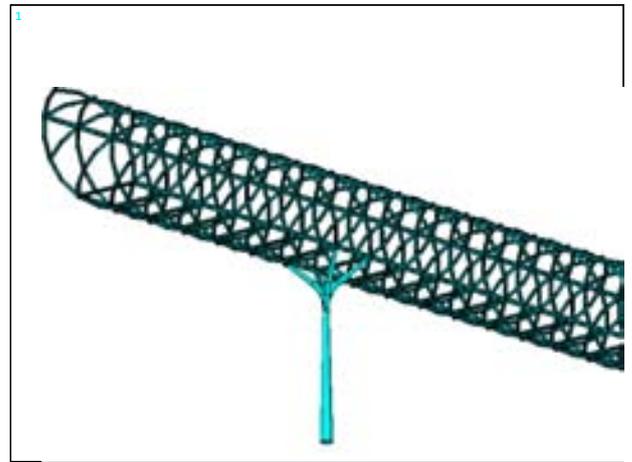


Fig. 16 Detalle de la pila en el modelo

La resistencia de las secciones transversales de acuerdo con criterios plásticos debería verificarse a través de la obtención de una distribución de tensiones que equilibre los esfuerzos de sollicitación sin que se supere el límite elástico del material. Sin embargo como método aproximado y conservador, para secciones de clase 1 y 2, sometidas a la acción combinada de  $N_{Sd}$ ,  $M_{y,Sd}$ ,  $M_{z,Sd}$ , se ha aplicado una suma lineal de la contribución de los esfuerzos resultantes:

- Compresión más flexión esviada más cortante (secciones clase 1 ó 2)

$$\frac{N_{Sd}}{N_{c,Rd}} + \frac{1}{(1-\rho)} \cdot \frac{M_{y,Sd}}{M_{pl,Rd}} + \frac{1}{(1-\rho)} \cdot \frac{M_{z,Sd}}{M_{pl,Rd}} \leq 1 \quad (1)$$

- Tracción más flexión esviada más cortante (secciones clase 1 ó 2)

$$\frac{N_{Sd}}{N_{t,Rd}} + \frac{1}{(1-\rho)} \cdot \frac{M_{y,Sd}}{M_{pl,Rd}} + \frac{1}{(1-\rho)} \cdot \frac{M_{z,Sd}}{M_{pl,Rd}} \leq 1 \quad (2)$$

Donde  $N_{c,Rd}$ ,  $N_{t,Rd}$ ,  $M_{y,Rd}$ ,  $M_{z,Rd}$  son los valores de cálculo de la resistencia de la sección frente a los esfuerzos axil (de compresión o de tracción) y flector, y que dependen de la clasificación de la sección transversal.

En base a este criterio, y una vez fijados los diámetros de los tubos por razones estructurales y estéticas, se determinaron los espesores de los tubos para cada sección. Sin embargo esta discretización de espesores no fue definitiva ya que estaba sujeta a otros condicionantes como eran:

- Fue necesario adaptarse a los diámetros y espesores comerciales.
- Por otro lado era necesario realizar una discretización realista de espesores, ya que resultaba antieconómico disponer de mucha variedad de espesores.
- En algunas de las uniones tipo "DK" el espesor del tubo longitudinal, que es pasante en este tipo de uniones, fue necesario incrementarlo, con respecto al obtenido en el cálculo general, para disponer en el mismo de capacidad suficiente como para soportar y transmitir los esfuerzos transmitidos por los tubos helicoidales. En las uniones en "X", dado que se rigidizaban interiormente, no fue necesario modificar el espesor por este motivo.
- Reducir lo más posible el número de soldaduras a tope a realizar en los tubos longitudinales, lo que hacía que fuese más económico el prolongar la longitud de un tubo de un determinado espesor en lugar de cortar y soldar otro de espesor menor.

Por estas razones existen secciones en las que el criterio de dimensionamiento descrito se encuentra alejado del óptimo que es la unidad, y muchas se acercan al 0.7-0.8.

### 2.3 Comprobación de uniones

Para el cálculo de las uniones y zonas de apoyo se realizaron diferentes modelos de elementos finitos con el programa ANSYS, y se hizo una doble comprobación. La primera consistió en comprobar que en ELS no se superaba la tensión de límite elástico del acero, y la segunda, que en ELU se verificase el equilibrio en el modelo aunque se permitían plastificaciones locales.

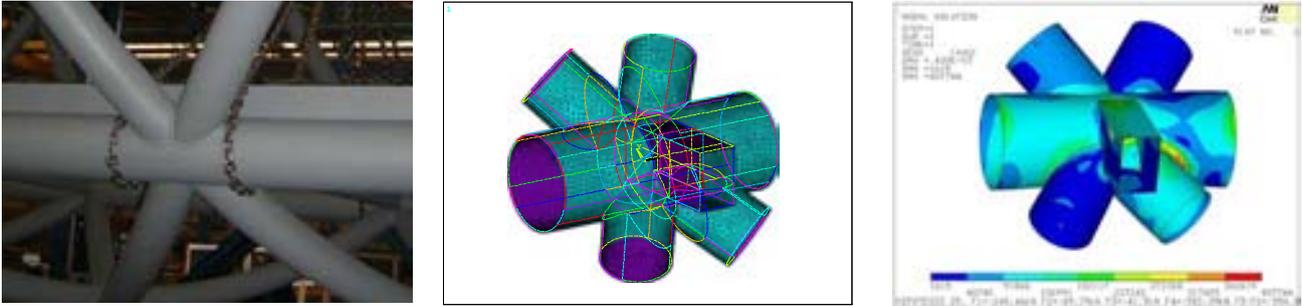


Fig. 17 Modelo y Tensiones en nudo tipo "DK" con correa

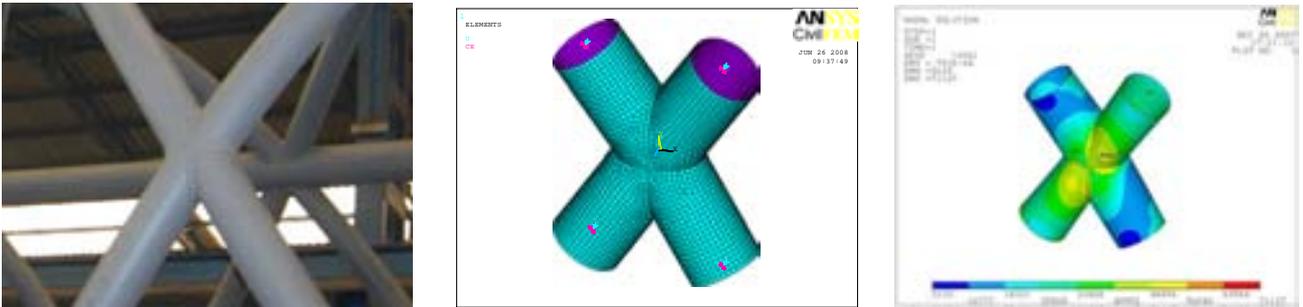


Fig. 18 Modelo y tensiones en nudo tipo "X"

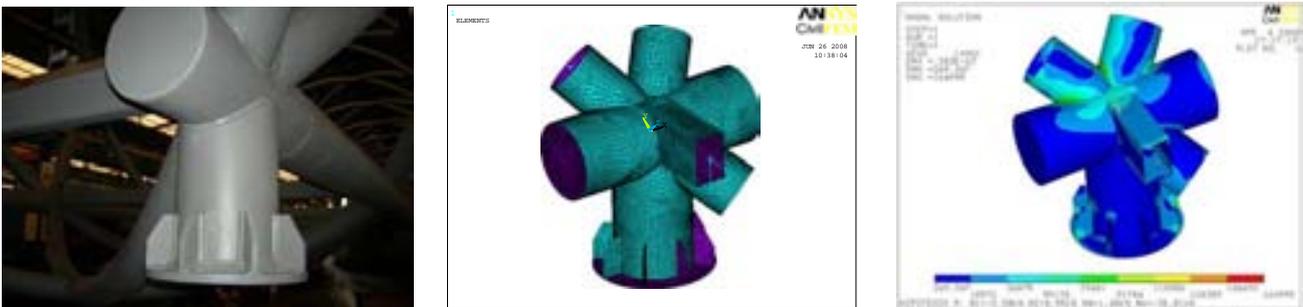


Fig. 19 Modelo y tensiones en nudo de apoyo en estribos"



Fig. 20 Modelo y tensiones en unión de brazos de pilas

### 3. Fabricación y proceso constructivo

#### 3.1 Fabricación en taller

En la fase de fabricación de la estructura metálica cabe destacar que se inició en un pequeño taller que tuvo muchos problemas. El primer problema importante se detectó en el montaje del primer módulo fabricado, que presentaba una geometría incorrecta de manera que la sección transversal se ovalizaba, por lo que tuvo que desmontarse y rehacerse. El siguiente problema detectado, y más grave, fue de defectos en la mayor parte de las soldaduras ensayadas, tanto defectos leves, como la presencia de algún poro, como defectos graves como la falta de fusión en muchas de ellas. Debido a estos problemas y a la complejidad de la estructura se decidió rescindir el contrato con dicho, y se contrató con un nuevo taller de probada experiencia en estructuras tubulares, que comenzó el trabajo desde el principio.



*Fig. 21 Modulo de prueba*

En este taller se inició el trabajo realizando un modelo tridimensional mediante el programa TEKLA, que serviría para elaborar los necesarios planos de despiece.

Cuando se trata de estructuras que sean repetitivas en sí mismas como ésta, es imprescindible que el jefe de taller trabaje sobre un módulo de prueba a escala real con el objeto de detectar los problemas que se va a encontrar y planificar metodologías de trabajo sencillas. En dicho estudio se pensó cómo se podía mecanizar algunos cortes de tubos, se diseñó un elemento auxiliar que ayudaba a presentar de manera adecuada diferentes piezas, e incluso se fabricó un útil que permitía rotar el módulo completo sobre su eje para facilitar la soldadura de cualquier elemento sea cual sea su posición.



*Fig. 22 Útil para el corte de tubos*



*Fig. 23 Útil para el punteado de tubos*

Finalmente, y antes de su transporte, se realizó un premontaje de los cuatro tramos que se transportarían a pie de obra comprobándose su buen ajuste.



*Fig. 24 Útil para girar el módulo*



*Fig. 25 Premontaje en taller*

### 3.2 Proceso constructivo

Una vez concluida la fabricación se procedió al transporte a pie de obra de los cuatro tramos fabricados y a soldarlos in situ dos a dos para su posterior izado.

Previamente en obra se ejecutaron los estribos y cimentaciones de pilas para a continuación ubicar en su posición definitiva los fustes verticales de las pilas, para lo cual se dispuso un sistema de tuerca y contratuerca en la base de los mismo que, junto con la sobremedida de los agujeros de la base de los fustes, sirvió para colocar cada uno de ellos en su correcta posición.

Fue necesario disponer además de unos apeos provisionales en las tercianas de la autovía que servirían de apoyo provisional de la estructura durante la fase de construcción.



*Fig. 26 Montaje del primer tramo*



*Fig. 27 Montaje del segundo tramo*

Antes del izado de cada uno de los dos tramos, y dado que el peso del forjado de chapa colaborante no era muy importante, se decidió izar el tramo ya hormigonado para evitar así tener que hacerlo sobre la propia autovía, lo cual hubiera necesitado varios cortes nocturnos y disponer de una planta de hormigón abierta durante la noche.

Las operaciones de izado de los tramos se realizaron mediante una grúa de gran tonelaje, y las operaciones de soldadura se realizaron sobre una plataforma dispuesta al efecto para garantizar una zona de trabajo adecuada para el soldeo de los tubos.



*Fig. 28 Zona de unión de tramos izados*



*Fig. 29 Soldadura de brazos superiores de pila a su fuste*

La unión de los dos tramos se hizo encasquillando y soldando los tubos longitudinales, para a continuación presentar y soldar los cuatro tramos en "X" de las celosías que se llevaron desmontados para las necesarias disponer de las necesarias holguras de montaje. Al mismo tiempo se soldaron las cabezas de las pilas a los fustes verticales.

Una vez finalizadas las operaciones de soldadura, y hormigonado el forjado en la zona de conexión, se procedió al desapeo de la estructura y a las operaciones de acabado comentadas en el primer punto.

Antes de la colocación de la tarima de madera se realizó la reglamentaria prueba de carga que consistió en diferentes posiciones de carga sobre el tablero. El tren de pruebas se materializó mediante la combinación de palés de madera de 1000 x 1200 mm cargados con 48 sacos de cemento de 35 kg de peso cada uno de ellos, lo que proporcionaba una carga total de 17 kN/Palé. Dichos palés se colocaban en posición mediante un toro de acuerdo a la secuencia de entrada de cargas fijadas en el proyecto de prueba de carga. Como la tarima aun no se había colocado para evitar que se deteriorase durante la prueba de carga, hubo de reemplazarse el peso de la misma por sacos de cemento dispuestos junto a la barandilla. Para la medida de las flechas se emplearon comparadores digitales que se suspendían de los puntos de control establecidos sobre los tubos longitudinales de la pasarela mediante cables de acero.



*Fig. 30 Palés en posición*



*Fig. 31 Comparador digital*

#### 4. Conclusiones

Desde el punto de vista del proyecto es importante emplear un tiempo suficiente en el diseño de las uniones para este tipo de celosías espaciales de tubos, sobre todo en lo que se refiere a la rigidización de las mismas y a los detalles de manufacturación, ya que conviene evitar las uniones a tope estudiando la forma de disponer chapas que permitan hacer uniones en Angulo.

Desde el punto de vista de la fabricación se demuestra, una vez más, que estructuras metálicas complejas, alejadas de las constituidas por soldadura de perfiles convencionales, sólo deben ofrecerse a talleres de experiencia probada y con capacidad técnica suficiente como para poder resolver detalles de difícil manufactura e incluso aportar ideas que simplifiquen o mejoren algunos de éstos. De otra manera se corre el riesgo de recibir en obra elementos que adolezcan de defectos geométricos fuera de las tolerancias, soldaduras mal ejecutadas, o de sufrir patologías una vez la estructura esté en servicio. En cualquier caso, cuando se trate de estructuras que sean repetitivas en sí mismas, como ésta, es imprescindible que el jefe de taller trabaje sobre un módulo de prueba con el objeto de detectar los problemas que van a surgir para encontrar metodologías de trabajo adecuadas, como puede ser mecanizar el corte de tubos mediante algún útil, diseñar elementos auxiliares que ayuden a presentar de manera adecuada diferentes piezas, etc.

Finalmente recalcar que se debe prestar atención a los acabados para que nuestras estructuras, además de funcionales, capten la atención del usuario por la calidad de las mismas.

#### 5. Agradecimientos

Se agradece la confianza depositada en este proyecto por el Consorcio Urbanístico Móstoles Tecnológico representado por D. Leonardo Torres-Quevedo, así como de su asistencia técnica representada a su vez en la persona de D. José María Olaguibel.

De forma personal destacar a D. Jose Luis Beltrán y a D. Jorge Moreno de Ferrovial-Agromán S.A., responsables de la obra en la que se incluye esta singular pasarela, por su dedicación y esfuerzo para que ésta saliera adelante. También a D. Enrique de los Reyes de la Dirección Técnica de Ferrovial-Agromán, por su trabajo para conseguir plasmar en planos la complicada geometría de esta estructura

Del mismo modo queremos reconocer al taller metálico ANRO su colaboración para racionalizar la fabricación aportando ideas que demostraron ser muy valiosas.