

Pasarela en arco en celosía sobre la autovía A-6 en el nudo con la M-40 de Madrid

Arch truss footbridge over A-6 Motorway at M-40 Junction in Madrid

Arturo Ruiz de Villa Valdés^a, Christian Gallegos-Calderón^b

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. AR2V INGENIERÍA. Director General, Autor del Proyecto.

arturo.ruizdevilla@ar2v.com

^b Doctor Ingeniero Civil. AR2V INGENIERÍA. Ingeniero de Estructuras. christian.gallegos@ar2v.com

RESUMEN

El artículo presenta una nueva pasarela de tipología de arco en celosía que formalmente busca un encuentro entre las típicas celosías metálicas que cruzan la autovía A-6 en Madrid y el arco del cercano puente de El Barrial. La disposición de diagonales es marcadamente abierta, con un número reducido de nudos que aporta una gran claridad y rotundidad a la solución escogida. La estructura consta de un doble arco-celosía inclinado que salva un vano principal de 70.40 m sobre los quince carriles de la autovía A-6 sin mediación de ningún apoyo central. Situada en la frontera urbana de la capital, constituye un hito de acceso con sus diagonales en M que anticipan al viajero la entrada en la ciudad.

ABSTRACT

The paper introduces a new pedestrian bridge of a truss arch typology, which seeks to establish a formal dialogue between the typical steel truss girders crossing the A-6 motorway in Madrid and the arch of the nearby El Barrial bridge. The arrangement of the diagonals is notably open, with a reduced number of nodes that provide a high degree of clarity and structural simplicity to the chosen design. The structure consists of a double inclined truss arch spanning a main distance of 70.40 meters over the fifteen lanes of the A-6 motorway, without the need for any intermediate support. Positioned at the urban edge of the capital, it serves as a gateway landmark, with its M-shaped diagonals symbolically heralding the traveler's arrival into the city.

PALABRAS CLAVE: pasarela, autovía, metálica, acero, arco, celosía, estética, vibraciones, peatón

KEYWORDS: footbridge design, motorway, steel, arch, truss, aesthetics, vibrations, pedestrians

1. Introducción y contexto

La Dirección General de Carreteras del Ministerio MITECO impulsó las obras de remodelación del Enlace de la M-40 con la Autovía A-6 en el Municipio de Madrid. El proyecto incluye la eliminación de trenzados, reorganización de ramales de acceso y, entre otras estructuras, la construcción de una nueva pasarela sobre la Autovía A-6 que permita el acceso peatonal desde las oficinas de El Plantío

a la estación de Cercanías de El Barrial, conectando las calles Alsasua y Basauri.

La nueva estructura se configura como un portal de acceso a la ciudad y salva el tronco principal de una de las principales arterias de entrada (IMD 150.000), que en la sección donde se sitúa presenta 15 carriles en los dos sentidos sin posibilidad de apoyo en mediana.

2. Encaje geométrico

Las rampas de acceso están muy condicionadas en su lado Sur, calle Alsasua, por la presencia de un hotel-gasolinera y un edificio de oficinas que limitan la zona disponible para su desarrollo, que en este tipo de estructuras es muy significativo dado que las pendientes máximas se limitan al 6% para poder configurar un itinerario accesible.

El segmento principal se eleva por encima de la autopista unos 6 m para salvar el resguardo mínimo de 5.50 m bajo tablero, lo cual conduce rampas de acceso largas, de casi 100 m de longitud, tal y como se adelantaba anteriormente.

El trazado en planta de la rampa Sur se definió en zig-zag con el fin de concentrar su extensión y limitar su intrusión visual con los edificios aledaños. Incluso se aprovechó la diferencia de cotas entre el arranque de la rampa junto a la gasolinera y el desembarco en el tramo principal para solapar en planta dos tramos de rampa. No se buscó superponer más tramos para evitar un indeseado efecto de opacidad en la

solución y de cierto confinamiento que pudiera desincentivar el cruce de peatones.

En la rampa Norte se disponía de más espacio en un fondo de saco existente, sin uso, por lo que se mantuvo un trazado más rectilíneo con tres segmentos de rampa. En ambos accesos se situaron escaleras para un acceso directo y más rápido que por las rampas.

El segmento principal sobre la autopista se resuelve con un alzado en arco de círculo con una flecha en el centro de luz de 0.60 m. En los proyectos de pasarelas nos gusta dar cierta curvatura a los alzados porque confiere ligereza visual al tablero, incrementa el gálibo estricto y facilita el desagüe natural del agua en la zona de estribos, donde se arranca con una cómoda pendiente del 3%. Constructivamente no supone un sobrecoste pues la estructura necesita contraflechas y no se puede construir recta. La implantación de la estructura y sus rampas de acceso se muestra en Figura 1.

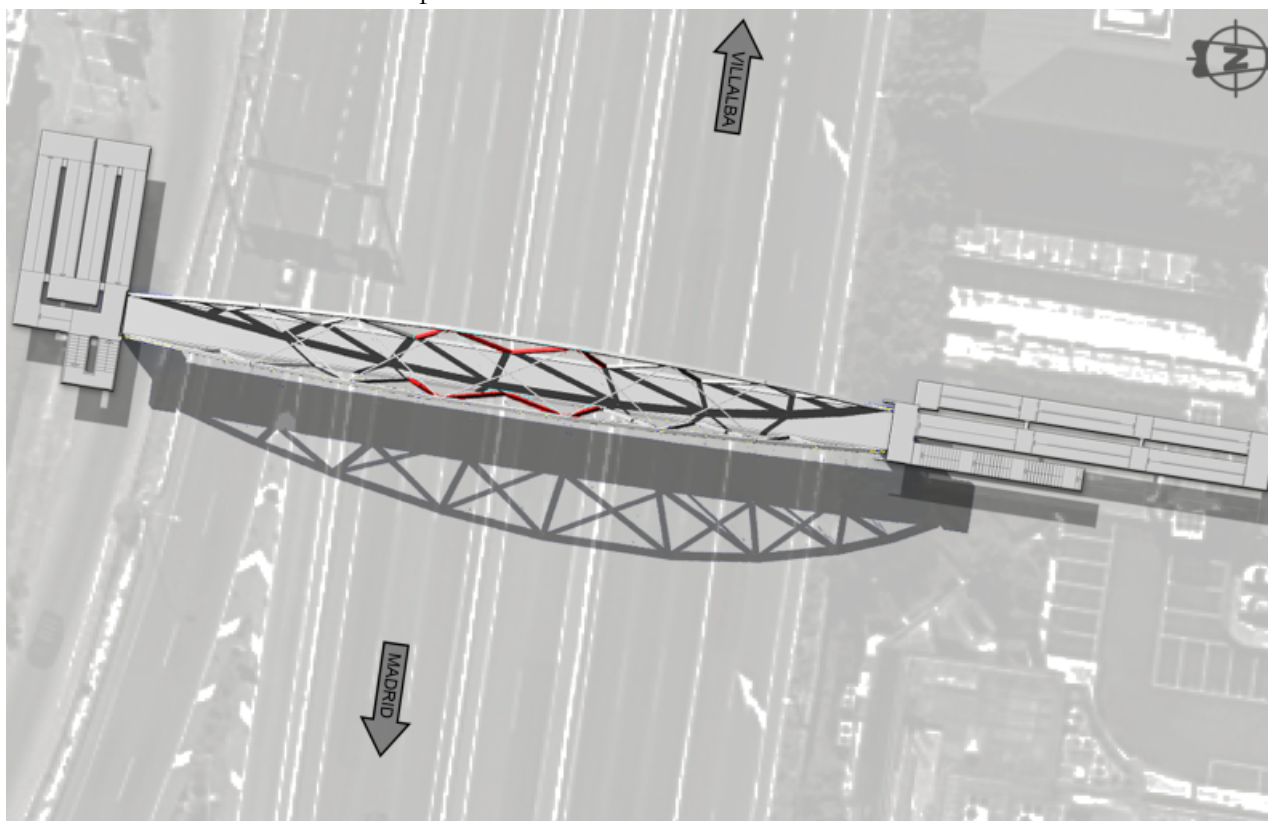


Figura 1. Implantación de pasarela y sus rampas de acceso.

3. Diseño

La nueva pasarela presenta una tipología de arco en celosía que formalmente busca un encuentro entre las típicas celosías metálicas que cruzan la A-6 y el arco del cercano puente de El Barrial. La disposición de diagonales es marcadamente abierta, con un número reducido de nudos que aporta una gran claridad y rotundidad a la solución escogida.

El cordón superior contribuye a su esbeltez adoptando una forma de arco quebrado que reduce el canto aparente en estribos. La selección de una celosía se debió a requisitos constructivos: en su concepción se planteó construirla por segmentos e izarla sobre torretas, por lo que se necesitaba una propuesta muy ligera que fuera estáticamente resistente en una configuración parcial. Esto descartó soluciones en arco superior que inicialmente obligaban a que estuviera estructuralmente cerrada para su montaje completo en una única operación. Con esta solución se daba flexibilidad al contratista en

la elección de un proceso constructivo en función de las disponibilidades de obra y las alternativas de corte de tráfico más oportunas. Con objeto de facilitar la construcción de la estructura metálica, se decidió el empleo de perfiles laminados en todas las secciones evitándose el armado de secciones metálicas complejas. Esto redujo los tiempos de fabricación y preparación de segmentos, que se conectaban con unas chapas muy sencillas de ejecutar.

La consecuencia de este criterio de proyecto es que el cordón superior tiene unas dimensiones limitadas a tubos laminados en caliente de dimensiones 400 x 400, por lo que el pandeo lateral del arco no se puede controlar incrementando su inercia de eje vertical. Por este motivo se decidió conectar los dos arcos con una triangulación horizontal que aportó la suficiente rigidez lateral a la estructura, incrementó su frecuencia de vibración y redujo los movimientos laterales y de torsión (ver Figura 2).

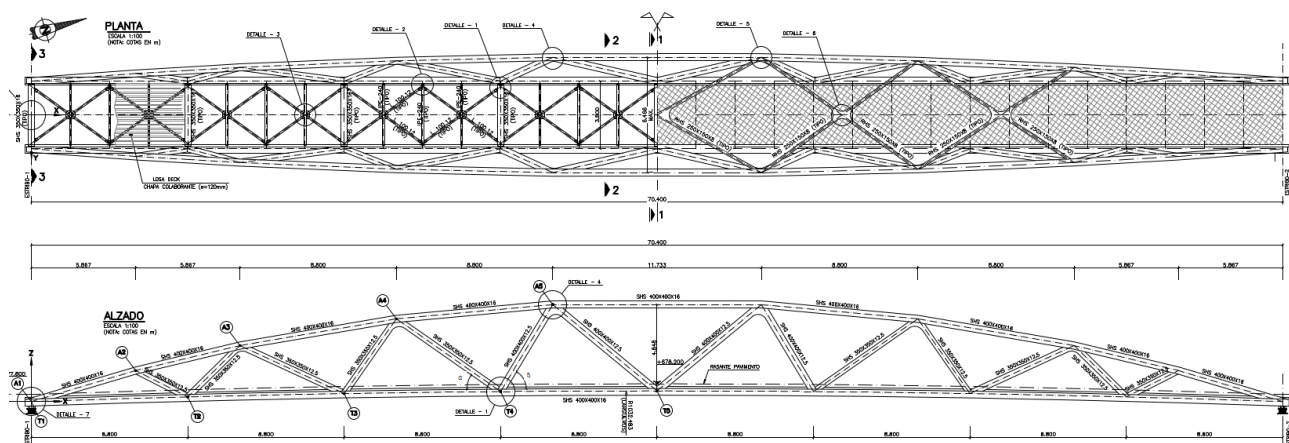


Figura 2. Geometría de la pasarela metálica.

Finalmente se inclinaron los dos arcos hacia afuera con una pendiente H0.275 / V1.00 para darles más fortaleza y dinamismo visual. Los dos arcos en celosía se construyen verticalmente y luego se inclinaron para conectarse al tablero, por lo que no se aumenta especialmente su complejidad.

El resultado formal es una estructura muy abierta, diáfana y ligera para el conductor, cuyo simbolismo de entrada en la ciudad se remarca destacando las diagonales centrales con una pintura RAL 5002 Azul Ultramarino sobre el resto de la estructura con RAL 7035 Gris Luminoso.

El peatón percibe una pasarela que, siendo formalmente sencilla y ligera, ofrece una gran volumetría y le envuelve al atravesarla, lo que visualmente le distancia del intenso tráfico de vehículos de la autopista inferior.



Figura 3. Celosía espacial

4. Características técnicas

La estructura consta de un doble arco-celosía central que salva un vano principal de 70.40 m sobre los quince carriles de la autovía A-6 sin mediación de ningún apoyo central, como se muestra en la Figura 1.

El tablero se prolonga en dos rampas de acceso de 87 y 90 m. Con una anchura útil de 3.50 m resuelve eficazmente el paso de peatones sin sensación de estrechez sobre una autovía de altísima capacidad. El doble arco inclinado envuelve al peatón ofreciendo protección durante el tránsito

La modulación de nudos del arco y del tablero es de 8.80 m, pero se decalan para configurar una triangulación de diagonales de inclinación variable que le da gran plasticidad formal. Los perfiles laminados en caliente del arco y del tablero son constantes de dimensiones SHS 400x400x16 y de calidad S355 J2H. En las diagonales se emplea tubería SHS 350x350x12.5 y SHS 400x400x12.5 (centrales) de igual grado.

Entre los nudos del tablero se disponen transversalmente perfiles tubulares SHS 350x350x16 que conectan las dos celosías y las rigidizan fuera de su plano. La luz parcial de 8.80

m entre nudos del tablero se subdivide en 4 segmentos mediante 3 vigas transversales de perfilera abierta IPE-240 que están trianguladas en planta con perfiles en L para rigidizar horizontalmente el tablero antes de la colocación de su losa.

Esta configuración permite una estructura en celosía muy abierta, con separaciones entre nudos amplias y perfiles en diagonal robustos que se diferencia de otras celosías presentes en la misma estructura, con perfiles más delgados y cortos, pero notablemente más tupidas y formalmente más anodinas.

El tablero se materializa con un forjado colaborante de 170 mm de espesor de hormigón HA-30 y chapa plegada de 59 mm de onda cada 150 mm. Se apoya cada 2.20 m en los perfiles transversales anteriormente indicados. Su acabado es en hormigón semipulido que le confiere un aspecto muy moderno y es muy sencillo de ejecución al evitar pavimentos posteriores. Se reforzó longitudinalmente para controlar la fisuración inducida por el tiro del arco sobre el cordón inferior.

Lateralmente, los 3.50 m de anchura del tablero se rematan en sendos zócalos de unos 10 cm de altura donde se instalaron unos focos que iluminan el paseo. El resultado fue muy acertado, pues recoge el agua de la plataforma, impidiendo su vertido hacia la autopista, e incrementa la sensación de seguridad del peatón que no se encuentra con un remate liso de la cornisa del tablero que cae hacia la carretera sin ninguna protección (ver Figura 4).

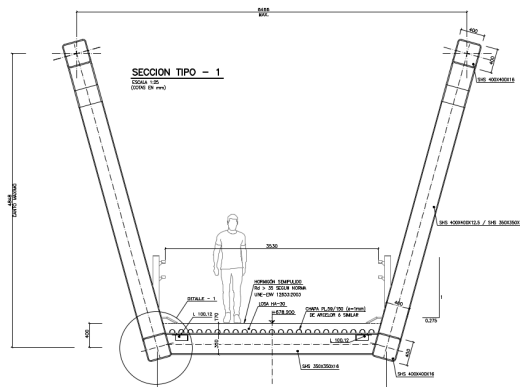


Figura 4. Sección transversal de la pasarela.

Las rampas de acceso son estructuralmente más discretas. Se formalizan con una viga metálica armada paralela a los paños de las rampas de la que salen unos jabalcones sobre los que se apoyan unas prelosas prefabricadas cada 2 m. Al situarse segmentos de rampa a ambos lados de la viga central, los torsos sobre pilares se equilibran. La rampa Sur se apoya en cuatro pilares, mientras que la Norte lo hace en sólo dos.

El tablero de las pasarelas tiene un canto de 200 mm (140 mm in situ + 60 mm de prelosa) cuyo acabado fue en hormigón peinado para mejorar su resbaladividad en una rampa con el 6% de pendiente.

Los aparatos de apoyo se formalizan con neoprenos zunchados D400 x 174 (126) situados bajo los arranques de los arcos. Su altura es significativa para la contenida longitud dilatable del tablero, pero obedece a las relativamente altas deformaciones longitudinales que experimenta el cordón inferior que actúa como tirante del arco. Esto les confiere una baja rigidez lateral, por lo que hubo de disponerse de sendos topes laterales sobre los estribos para controlar los movimientos laterales del arco y sus frecuencias de vibración (ver Figura 5).

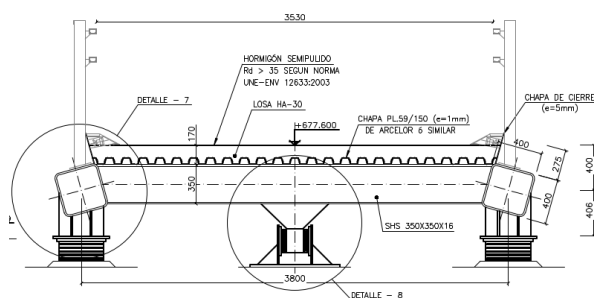


Figura 5. Aparatos de apoyo de la pasarela.

Bajo los apoyos se dispuso una pila pantalla en Estribo Norte y una pila con doble fuste y cargadero de conexión en Estribo Sur. La estructura se cimentó superficialmente sobre el terreno competente que existe en la zona consistente en arenas tosquizas con una tensión admisible de 400 kN/m². En el Estribo Norte se detectó una gran arqueta con instalaciones

difíciles de recolocar, por lo que se puenteó con un encepado micropilotado.

5. Análisis estructural

El análisis estructural de la pasarela se desarrolló empleando el software de elementos finitos SOFiSTiK [1]. En la Figura 6 se muestra el modelo numérico de la estructura, en la cual se utilizaron elementos tipo barra para representar los distintos perfiles metálicos y muelles para modelizar los aparatos de apoyo.

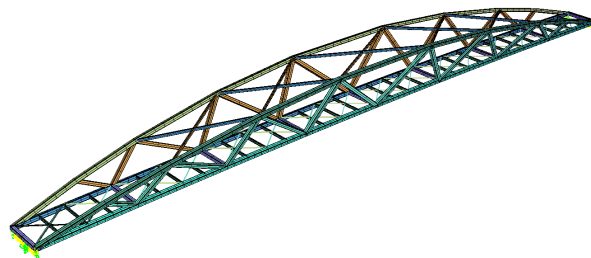


Figura 6. Modelo numérico de la pasarela

Los perfiles metálicos, las conexiones entre elementos, y el forjado cumplen con los distintos requisitos de Estado Límite Último establecidos en los Eurocódigos [2-4].

En cuanto al Estado Límite de Servicio de Deflexiones, una flecha vertical máxima de $L/880$ (i.e. 80 mm), correspondiente al valor frecuente de la sobrecarga de uso, se consideró en el proyecto.

Finalmente, para el Estado Límite de Servicio de Vibraciones, se pronosticó una aceleración vertical de 0.80 m/s² (confort medio) ante un caso extremo de 0.6 peatones/m² (i.e. 145 personas) caminando sobre la pasarela. El modo vibración de la estructura al ser excitado por los peatones es un modo de flexión vertical y se muestra en la Figura 7.

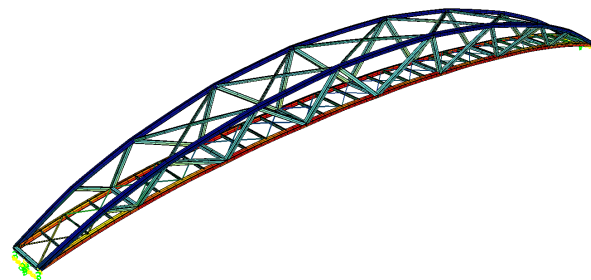


Figura 7. Modo de vibración vertical a 1.56 Hz.

6. Construcción

La estructura se fabricó en los talleres metálicos de Metalizard en Venta de Baños y fue trasladada a la obra en segmentos que se unieron apoyándose en castilletes provisionales emplazados en una campa junto a la autopista (ver figura 8).



Figura 8. Castilletes de montaje en obra

El izado se pudo realizar con toda la pasarela en un único segmento gracias a que se pudo habilitar un acceso a la autopista. Esto facilitó la ejecución de los trabajos y evitó costosos y molestos cortes de carril para habilitar torretas provisionales en la A-6. La maniobra se ejecutó con un corte nocturno total de la autopista mediante el empleo de dos grúas de 500 y 1000 t que elevaron las 90 t del vano principal desde unas plataformas rodantes. Una vez colocada con precisión milimétrica se soldaron las chapas de los aparatos de apoyo a la estructura metálica y se colocaron los topes laterales. En la Figura 9 se muestra la estructura completa, así como el proceso de izado nocturno.

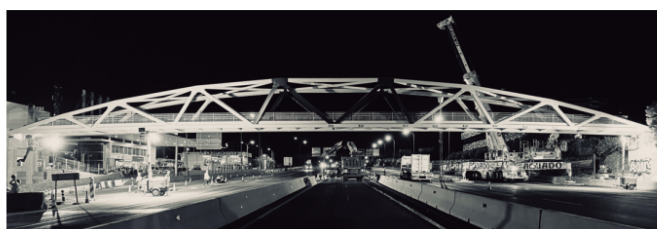


Figura 9. Pasarela completa y proceso de izado.

7. Pruebas de carga

Con el objetivo de comprobar el adecuado comportamiento estructural de la pasarela, se

realizó una prueba de carga estática. Empleando bañeras de agua se alcanzó una carga uniformemente distribuida de 3 kN/m^2 sobre el tablero, como se muestra en la Figura 10. La flecha máxima vertical registrada en el centro de vano de la pasarela fue 21 mm ($L/3300$).

De manera similar, se realizó una prueba de carga dinámica que involucró peatones caminando sobre la pasarela. Este ensayo fue dividido en cinco fases.



Figura 10. Prueba de carga estática.

Las pruebas, así como las vibraciones registradas en el centro de vano de la pasarela, se indican en la Tabla 1. Las aceleraciones máximas verticales obtenidas en todas las fases no superaron los 0.50 m/s^2 . Por lo tanto, el nivel de confort obtenido durante los ensayos fue máximo.

Tabla 1. Aceleraciones verticales máximas registradas durante la prueba de carga dinámica.

Fase	Descripción	$a_{\text{máx}} \text{ (m/s}^2\text{)}$
1	Un peatón andando	0.07
2	Dos peatones andando	0.10
3	Tres peatones andando	0.10
4	Tres peatones corriendo	0.26
5	Quince peatones andando	0.15

Conclusiones

La nueva pasarela es un ejemplo de cómo pueden encontrarse soluciones con un diseño estructural eficiente, visualmente atractivo y con un coste de fabricación similar a otras estructuras más convencionales. Situada en la frontera urbana de la capital, constituye un hito de acceso con sus diagonales en M que anticipan al viajero la entrada en la ciudad.

Agradecimientos

El autor del proyecto quiere agradecer al Director de Obra Alfredo García por su sensibilidad y buen hacer en este proyecto, a Sacyr por su ejecutoria y a la Comunidad de Propietarios de Alsasua 14-16 por su paciencia y comprensión por todas las molestias causadas.

Referencias

- [1] SOFiSTiK (2020). *Manual de usuario de SOFiSTiK*, Núremberg, Alemania.
- [2] UNE-EN 1990. *Eurocódigo 0: Bases de cálculo de estructuras*.
- [3] UNE-EN 1991-2. *Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Cargas de tráfico en puentes*.
- [4] UNE-EN 1993. *Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero*.