

PASARELAS SOBRE LA R-3 Y LA M-40 ENTRE LOS DISTRITOS DE VICÁLVARO Y SAN BLAS EN MADRID

Leonardo FERNÁNDEZ TROYANO

Dr Ingeniero de Caminos

Carlos Fernández Casado, S.L.

cfcsl@cfcsl.com

José CUERVO FERNÁNDEZ

Aparejador

Carlos Fernández Casado, S.L.

jcuervo@cfcsl.com

Guillermo AYUSO CALLE

Ingeniero de Caminos

Carlos Fernández Casado, S.L.

gayuso@cfcsl.com

Resumen

Estas dos pasarelas forman parte de una comunicación peatonal y de bicicletas, entre el distrito de San Blas y el de Vicálvaro. Pasan sobre la Autopista Radial 3, y sobre la autopista M-40. Las dos pasarelas están muy próximas entre sí, y en las dos se ha utilizado la misma solución de estructura y forma, aunque las diferentes condiciones del paso sobre una y otra autopista generan algunas diferencias dentro de la misma solución.

La pasarela sobre la M-40 tiene una luz de 90 metros con un canto mínimo para elevarla lo menos posible sobre la M-40. Esto obliga a hacer una pasarela con una estructura superior que sostenga el tablero.

La pasarela sobre la R-3 se ha resuelto con un tramo principal de tres vanos de 40+110+40 metros de luz, que se prolonga con dos estructuras, una a cada lado, de hormigón pretensado de 16+14+10 metros de luz.

Después de un estudio de soluciones, en ambas pasarelas se ha adoptado la solución colgante, por una razón fundamental: esta solución necesita un altura de torres del orden de la mitad que la atirantada.

Palabras Clave: Pasarelas colgantes, tirantes negativos.

1. Planteamiento general

Estas dos pasarelas forman parte de una comunicación peatonal y de bicicletas, entre el distrito de San Blas y el de Vicálvaro, a través del Parque de la Cuña Verde de Vicálvaro. Este parque está dividido en dos por la Autopista Radial 3, y bordeando en su lado Noroeste por la autopista M-40 que lo aísla del distrito de San Blas. Por ello la nueva comunicación tiene que pasar por encima de las dos autopistas mediante pasarelas de gran luz, y sirve además para comunicar entre sí las dos zonas del parque, y comunicar éste con los distritos periféricos. Estas pasarelas deben permitir que ocasionalmente pasen por ellas vehículos ligeros (5 Tn).

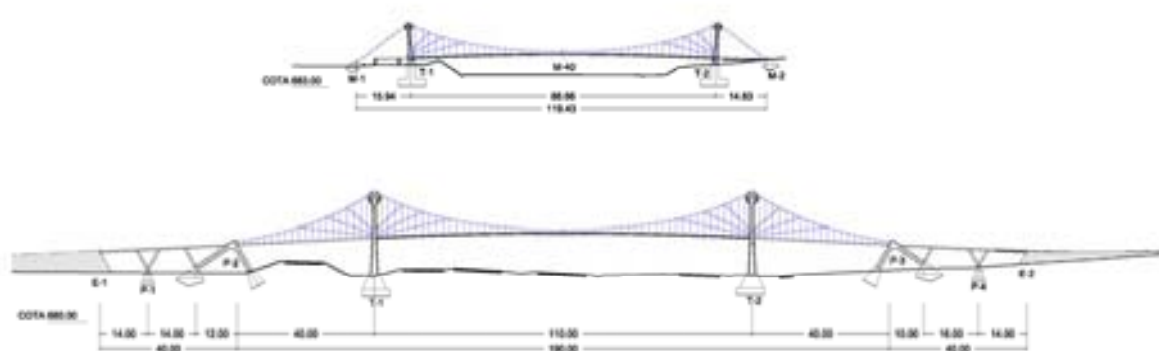


Fig. 1 Pasarela sobre la M-40 y la R-3 (Situación actual)

Las dos pasarelas están muy próximas entre sí, y en las dos se ha utilizado la misma solución de estructura y forma, aunque las diferentes condiciones del paso sobre una y otra autopista generan algunas diferencias dentro de la misma solución. Se trata por tanto de "variaciones sobre un mismo tema". Por todo ello pensamos que las dos pasarelas se pueden considerar una unidad formada por dos estructuras análogas pero no iguales, unidas por un tramo corto de vía sobre tierra.

1.1 Pasarela sobre la M-40

La autopista M-40 pasa en trinchera con una profundidad del orden de 3 metros bajo el nivel actual del entorno en el tramo donde está situada la pasarela. Las ampliaciones previstas de esta autopista, obligan a dejar un espacio libre entre bordes del orden de 80 metros, sin posibilidad de apoyos intermedios. Por ello la pasarela se ha proyectado con un vano único de 90 metros. La trinchera de la autopista de 3 metros de profundidad, obliga a levantar la rasante del orden de 2 metros, lo que permite adaptarse rápidamente al terreno actual en las dos márgenes de la autopista. En el lado de la calle Versailles será necesario elevar 2 metros la vía ciclista existente en el borde de la calle para acceder a la pasarela, y en el lado opuesto, el terreno sube a partir del borde de la autopista, y por tanto se llega rápidamente a nivel del suelo.



Fig. 2 Pasarela sobre la M-40

La pasarela debe tener por tanto un solo vano de 90 metros, con un tablero de canto mínimo para elevarla lo menos posible sobre la M-40. Esto obliga a hacer una pasarela con una estructura superior que sostenga el tablero.

1.2 Pasarela sobre la R-3



Fig. 3 Pasarela sobre la R-3

La pasarela sobre la R-3 pasa sobre esta autopista en un lugar próximo a su intersección con la M-40. Por ello, además de pasar sobre el tronco de la autopista, ha de pasar también sobre los ramales del enlace entre las dos autopistas. En las ampliaciones previstas del enlace hay en esta zona dos niveles, lo que obliga a pasar la pasarela en un tercer nivel, a más de diez metros de altura sobre la autopista actual.

La zona ocupada por la autopista y los ramales, ha obligado a adoptar una luz de 110 metros en el vano principal de la pasarela. La altura de la pasarela sobre la autopista, del orden de 10 metros, obliga a prolongar el vano principal con unos vanos de

acceso hasta llegar a una altura razonable de estribos. Por ello la pasarela se ha resuelto con un tramo principal con tres vanos de 40+110+40 metros de luz, que se prolonga con dos estructuras de hormigón pretensado de 16+14+10 metros de luz en un lado y de 13.5+10.5+13 en el otro.

Igual que en la pasarela anterior, el tablero debe ser lo más delgado posible para que la elevación sobre la autopista sea mínima.

2. Soluciones estudiadas

Definidas las características funcionales y geométricas de las pasarelas, es necesario definir su estructura. Como hemos visto, tienen luces considerables, de 90 y 110 metros los vanos principales de ambas, y además se deben elevar lo menos posible sobre las autopistas para reducir al máximo las pendientes, lo que obliga a hacer un tablero lo más delgado posible. Esta condición lleva a una estructura superior de la que se suspenda el tablero. Tres son las soluciones clásicas de estructura superior para conseguir un tablero de canto mínimo:

- a) Pasarela colgante.
- b) Pasarela atirantada.
- c) Pasarela en arco superior o bowstring.



Fig. 4 Tirantes negativos

La solución de arco superior puede resolver bien la pasarela sobre la M-40, que tiene un solo vano, pero resuelve mal la pasarela sobre la R-3, que necesita dos vanos de compensación de 40 metros. Por ello, se ha descartado esta solución, quedando únicamente la solución colgante y la solución atirantada.

Se han hecho encajes y tanteos de ambas soluciones, y rápidamente se ha visto que la que mejor encajaba en este caso es la solución colgante, por una razón fundamental y es que la pasarela colgante necesita un altura de torres del orden de la mitad que la atirantada. En una pasarela colgante las torres deben tener una altura sobre el tablero del orden del 0,1 de la luz, y en una atirantada del orden del 0,2. Se puede reducir la altura de las torres de la solución atirantada, pero esto crea mayores momentos flectores en el tablero, lo que obliga a mayor canto.

En la pasarela sobre la M-40, es necesario reducir la altura de las torres, porque en el lado Norte los cables de compensación hay que anclarlos a una distancia del orden de 15 metros de la torre por la distancia entre la autopista y la calle Versailles. Esto obligaría en la pasarela atirantada a una inclinación excesiva de los tirantes de compensación, y formalmente quedarían mal. En la estructura colgante, al tener la torre la mitad de la altura, este problema se reduce. También formalmente, al ser una pasarela de vano único, pensamos que quedan mejor las torres más bajas de la pasarela colgada que las más altas de la atirantada.

No quiere esto decir que siempre sea mejor solución la colgante que la atirantada, pero pensamos que en este caso concreto sí lo es.

También nos parece más adecuada la solución colgante en la pasarela sobre la R-3, aunque por razones diferentes:

En este caso nos encontramos con una pasarela cuyo tablero debe pasar a más de 9 metros sobre la autopista actual; por tanto a la altura de la torre sobre el tablero hay que sumarle 10 metros bajo él. Esto lleva en la solución atirantada a una altura de torres de 34 metros, y en una colgada de 23.

Comparando ambas siluetas pensamos que la altura de las torres de la solución colgada resulta más proporcionada al conjunto que la de la solución atirantada, en la que la altura de las torres resulta desmesurada.

3. Estructura de la solución colgante adoptada

Adoptada la solución de pasarelas colgantes, es necesario definir su estructura, teniendo en cuenta las similitudes y diferencias entre ambas pasarelas.

Un primer problema que se presenta es el tablero. Como hemos dicho, debe ser lo más delgado posible y para ello es necesario reducir en él los esfuerzos al máximo posible.

El problema de los puentes colgantes es que la falta de rigidez de los cables principales produce momentos flectores de sobrecarga grandes en los cuartos de luz del tablero más próximos a las torres. Para reducir estos momentos caben diferentes sistemas de rigidización de los cables principales. El más adecuado consiste en añadir tirantes en los cuartos de la luz próximos a las torres. Estos tirantes pueden ser positivos o negativos. Se llaman positivos a los que van de la cabeza de la torre al tablero, es decir, los que se utilizan en un puente atirantado normal y negativos a los que van desde la torre a los cables principales, que normalmente parten de la torre a la altura del tablero. La eficacia de la rigidización de ambos sistemas es análoga en la reducción de flexiones en el tablero.

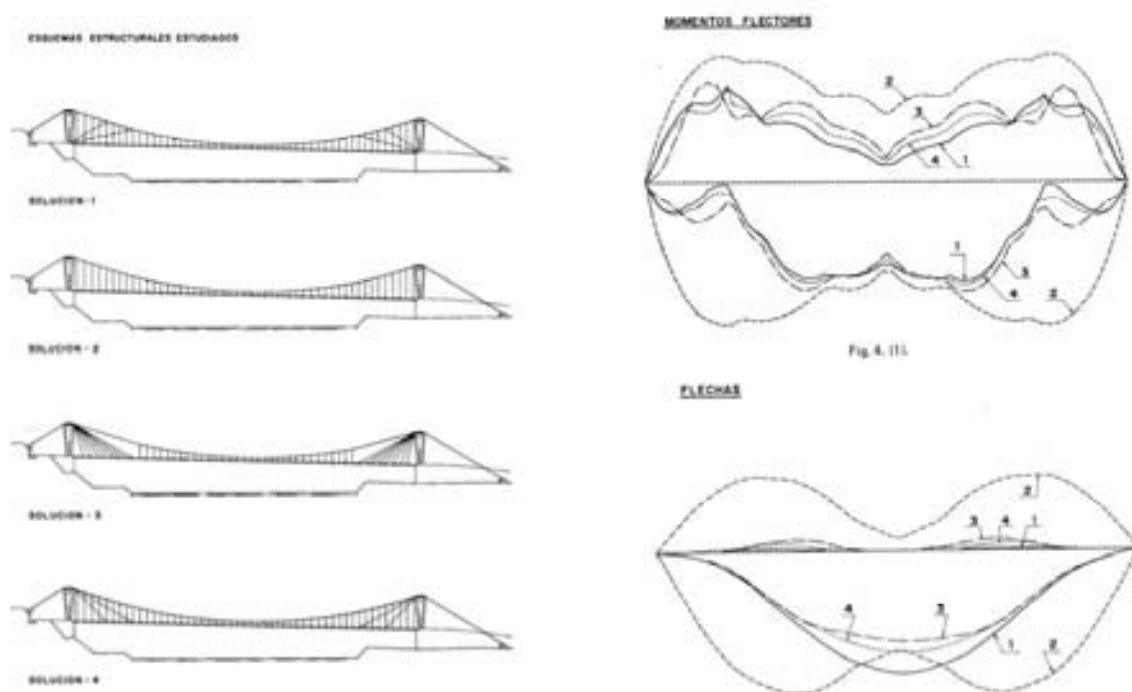


Fig. 5 Soluciones de rigidización estudiadas de los puentes colgantes

A lo largo de la Historia se han utilizado los tirantes llamados positivos en muchos puentes colgantes, porque disminuyen la carga en los cables principales e introducen una compresión en el tablero. Los cables negativos, en cambio, se han utilizado en contadas ocasiones porque aumentan la carga en los cables principales y requieren una unión potente entre los tirantes y los cables principales.

A pesar de las ventajas que, en general, tienen los tirantes positivos, hemos adoptado en estas pasarelas los tirantes negativos porque no afectan para nada el tablero, que estará colgado únicamente de las péndolas. Conseguir un tablero lo más simple posible y de montaje sencillo se ha considerado prioritario en estas pasarelas, por ello se ha adoptado la solución de tirantes negativos, que ya hemos utilizado en cuatro puentes colgantes ligeros con luces comprendidas entre 70 y 102 metros, construidos en 1984 sobre el río Segre. Estos puentes tenían tableros de hormigón prefabricado formado por dovelas que se colgaban de las péndolas, se empalmaban in situ homigonando las juntas, y se solidarizaban mediante un pretensado longitudinal. El prefabricado de las dovelas de los cuatro puentes se hizo en un parque central y de allí se llevaron a las cuatro obras. También se prefabricaron las torres, y las piezas de anclaje de los cables principales.

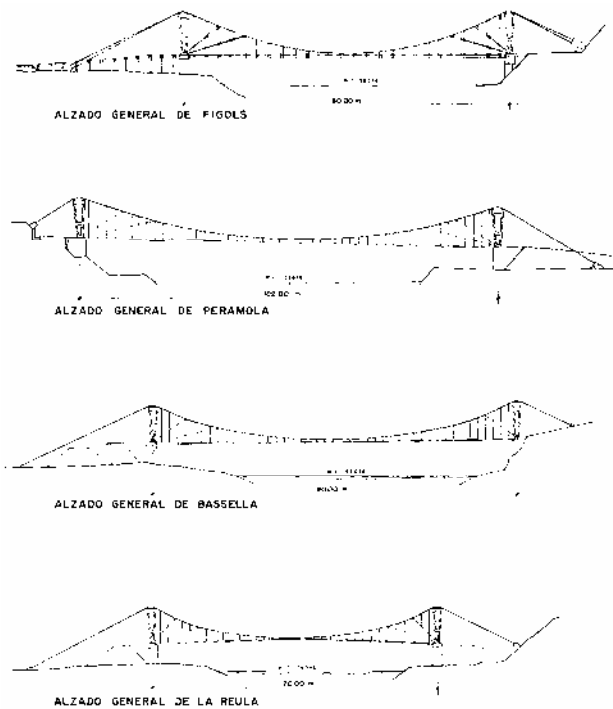


Fig. 6 Luces de los puentes ligeros del Segre

tensiones de incurvación que se produce en los alambres de los cables cerrados no obliguen a aumentar excesivamente el área de la sección de dichos cables. Esto nos ha llevado a adoptar un radio mínimo en las sillas de 2 metros, lo que obliga a que tengan una longitud horizontal del orden también de 2 metros. Este ensanche necesario de

En el proyecto de estos puentes se hizo un estudio comparativo entre las distintas soluciones de puentes colgantes: a puente sin tirantes, puente con tirantes positivos superpuestos a las péndolas (puentes de J.A. Roebling) con tirantes positivos en las zonas próximas a las torres, y péndolas en la zona central del tablero (puentes de F. Arnodin), y puentes con tirantes negativos. Del estudio se dedujo que ambas rigidizaciones eran efectivas en la reducción de esfuerzos en el tablero, y que los momentos resultantes en él eran prácticamente los mismos en las tres soluciones de rigidización planteada.

El tablero de las dos nuevas pasarelas de Madrid se ha hecho también con piezas prefabricadas de hormigón, que se cuelgan de cuatro péndolas y se empalman a posteriori. La diferencia de peso de estas piezas con las de un tablero metálico no justifica en este caso la diferencia de costo entre los dos materiales, con la ventaja que supone el mayor peso del tablero de hormigón respecto de las vibraciones y estabilidad aeroelástica de las pasarelas.

El problema más difícil de resolver que se plantea en las torres de una pasarela de este tipo con cables principales formados por cables cerrados, es el del radio de las sillas que necesitan en cabeza para el apoyo de los cables. Estas sillas deben tener un radio suficiente para que las



Figols – 80 m.



Peramola – 102 m.



Basella – 90 m.



La Reula – 70 m.

Fig. 7 Puentes ligeros del Segre

las cabezas se ha resuelto en este caso con unos tambores circulares que rematan las torres, y en ellos se alojan las sillas.

Las torres, junto con el tablero y los cables, son los elementos visibles de las pasarelas. Por ello se ha tratado de hacerlas lo más esbeltas posible para armonizarlas con la ligereza de los cables y el tablero. Las formas adoptadas en ellas requieren unos encofrados de formas complejas que es difícil hacer con madera, y por tanto tendrían que ser metálicos. Este problema, unido a que los tambores de las cabezas tienen que ser metálicos, nos ha llevado a hacer las pilas metálicas rellenas de hormigón autocompactable, lo que sirve para reducir el acero de una pila exclusivamente metálica, y hacer resistente el encofrado que requeriría una pila de hormigón.



Fig. 8 Dovelas prefabricadas del tablero

El último elemento a definir en las pasarelas son los anclajes de los cables principales. Éstos terminan en unas mazarotas cilíndricas que se deben fijar a unos macizos de hormigón o metálicos que transmiten la carga al terreno. El anclaje de las mazarotas se resuelve mediante una caja y una ranura. La caja sirve para alojar y apoyar la mazarota, y la ranura para pasar el cable.

En la pasarela de la M-40 los anclajes están a la altura del terreno, y se resuelven con un macizo triangular de hormigón. En la pasarela de la R-3 los anclajes de los cables están a una altura del orden de 9 metros sobre el suelo, por lo que se ha resuelto con unos bípodes metálicos.



Fig. 9 Vista inferior del tablero

Los cables principales, las torres y las péndolas se han situado en planos inclinados para dar una mayor amplitud visual al paso sobre ellas, porque al estar inclinados, el espacio definido entre los planos de cables y péndolas se va abriendo al ir elevando la visual.

4. Descripción de las pasarelas

4.1 Tablero

El tablero es el mismo en ambas pasarelas. Tiene un ancho total de 6,48 metros, y es un tablero de hormigón pretensado, formado por dos vigas principales longitudinales de sección rectangular, situadas en los bordes de la plataforma. En estas vigas se anclan las péndolas, y están entre sí unidas por nervios transversales cada dos metros, y por la losa de la plataforma. El canto de las vigas longitudinales es de 0,30 metros.

La construcción del tablero se hizo mediante piezas prefabricadas de 3,4 metros de longitud con juntas entre ellas de 0,60 metros que se hormigonaban in situ. Una vez unidas todas las piezas se cosieron mediante un pretensado centrado. El tablero se apoya únicamente en los estribos en la pasarela de la M-40. En la de la R-3 se apoyan en las torres intermedias y en los bípodes. Estos apoyos se materializan mediante neoprenos anclados y apoyos de neopreno teflón también anclados.

El tablero del tramo colgado de la pasarela de la R-3 se ha hecho continuo, aunque los momentos flectores que se generan en el tablero continuo son mayores que los que se producen en un tablero discontinuo en las torres; pero evitar las juntas sobre ellas nos ha parecido ventaja suficiente para hacerlo continuo, a pesar de los mayores esfuerzos.

4.2 Torres

Las torres están formadas por dos pilas inclinadas de sección rectangular, variable con la altura, y rematadas con los tambores circulares donde se alojan las sillas de apoyo de los cables principales.



Fig. 10 Tambores circulares de la torre

Estas pilas son metálicas rellenas de hormigón autocompactable.

Las torres de la pasarela de la M-40 tienen una altura de 11,5 metros, y las dos pilas de cada torre tienen doble inclinación, tanto en el plano transversal al eje como en el plano longitudinal. La inclinación en el plano longitudinal se debe a la dirección de la resultante de las fuerzas que produce el cable sobre ella, porque la distancia de la cabeza de la torre al anclaje trasero de los cables es reducida. La inclinación en el plano transversal se debe, como hemos visto, a que los cables principales se han situado en planos inclinados.



Fig. 11 Torre de la Pasarela sobre la R-3

Las torres de la R-3 tienen una altura de 24 metros y las dos pilas inclinadas están unidas por una riostra donde se apoya el tablero.

Los tambores superiores tienen un diámetro de 2,10 metros en la M-40, y de 3,50 metros en la R-3. En ellos están alojadas las sillas para el apoyo de los cables principales. Estas sillas permiten el libre deslizamiento de los cables sobre ellas durante la construcción, pero una vez terminada la construcción de la pasarela los cables se fijan a las sillas mediante unas abrazaderas.

4.3 Cables principales, tirantes y péndolas

Los cables principales son cables cerrados de 90 milímetros de diámetro en la M-40, y de 114 milímetros en la R-3. Son cables del tipo OZZZ, es decir, tienen un núcleo de alambres de sección circular, y tres capas exteriores de alambres en Z. Todos los alambres están galvanizados.

Los cables se anclan mediante mazarotas cilíndricas exteriormente, con huecos interiores cónicos donde se deslían los cables y se rellenan con resina epoxi, lo que sirve de anclaje de los alambres que forman el cable.

Los tirantes y las péndolas son cables monotorón normales, que se anclan a los cables principales mediante unas abrazaderas formadas por anillos metálicos divididos en dos piezas, unidas con tornillos pretensados para conseguir el rozamiento necesario entre el cable principal y las abrazaderas.



Fig. 12 Cable principal, tirantes y péndolas

La longitud y el número de tornillos de cada abrazadera es función de las fuerzas normal y tangencial que se produce entre la péndola o tirante y el cable principal.

Las péndolas y los tirantes se unen a las abrazaderas del cable principal mediante mazarotas con orejetas, unidas a las orejetas de las abrazaderas mediante un bulón pasante.

En el otro extremo, la unión con el tablero de las péndolas, y con las torres de los tirantes, se hace mediante manguitos de extrusión terminados en roscas que permiten anclar las péndolas al tablero y los tirantes a las torres, mediante tuercas.

4.4 Anclajes de los cables principales

Como hemos visto, son diferentes en las dos pasarelas.

En la M-40 están formados por unos macizos triangulares de hormigón, anclados al terreno mediante anclajes pretensados con la longitud necesaria para soportar el tiro de los cables, y apoyados en micropilotes.

En la R-3 los anclajes están a una altura del orden de 9 metros y por ello el anclaje se hace mediante unos bípodes metálicos dobles, es decir, cada elemento del bípode está formado por dos pilas situadas en planos inclinados que coinciden con los planos inclinados de los cables principales. La transmisión de la carga de los bípodes se hace mediante micropilotes en las patas delanteras y mediante anclajes pretensados en las patas traseras.

Estos bípodes sirven también de apoyo de los extremos del tablero del tramo colgado, y de los tableros de los tramos de acceso al tramo colgado.

4.5 Tramos de acceso al tramo colgado de la pasarela sobre la R-3

La altura del tablero de la pasarela sobre la R-3 obliga a prolongar la estructura para evitar unos estribos excesivamente altos.

Como hemos visto, se trata de unos tableros continuos de tres vanos, apoyados en los estribos, en una pila en V, y en dos pilas inclinadas del bípode; por ello el tablero se subdivide en cuatro vanos de 11.30+4.50+8.02+12.97 en un lado y de 10+11+5.5+11.5.

El tablero está formado por una losa trapezoidal central de 0,40 metros de canto y 1,80 metros de ancho prolongado con costillas transversales cada 2 metros y una losa superior de 0,15 metros de espesor.

Estos tableros son de hormigón armado exclusivamente con armadura pasiva.



Fig. 13 Pasarela sobre la R-3. Bípode de anclaje y acceso a la pasarela colgada

5. Construcción

El problema mayor de la construcción de estas pasarelas se debe a que se han de construir sobre dos autopistas en funcionamiento con un tráfico intenso.

El problema más complicado se planteó en el tendido de los cables principales.



Fig. 14 Pasarela sobre la R-3 en construcción

En la M-40 se hizo mediante un coste nocturno de la autopista que permitió tender unas camas de madera sobre la autopista, y sobre ellas se arrastraron los cables hasta llegar al otro extremo. En la misma noche se levantó el cable mediante tres grúas y se dejó colocado en su sitio. Se montó un cable por la noche.

En la R-3 la mayor longitud y peso de los cables principales no permitía montar el cable en una noche, por lo que se montó una pasarela sobre la autopista, sobre la que se pasó el cable de un extremo al otro, y posteriormente se llevó a su sitio mediante un coste nocturno con tres grúas.

Una vez montados los cables principales, las abrazaderas de los cables, los tirantes, las péndolas, y las piezas prefabricadas del tablero, se montaron por la noche con grúas mediante cortes parciales de las autopistas,

Las piezas prefabricadas del tablero se hicieron en obra mediante un parque situado entre las dos pasarelas.

Una vez montadas las piezas se hormigonaron las juntas entre piezas mediante unos encofrados móviles, y se pretensó longitudinalmente el tablero.



Fig. 15 Pasarela sobre la M-40



Fig. 16 Pasarela sobre la R-3