

Sustitución de tirantes de la pasarela de Marqués de Zafra (Calle 30, Madrid)

Stay-cables replacement in Marques de Zafra footbridge (Calle 30, Madrid)

Ignacio Rueda Sastre^a, Tomás Ripa Alonso^b y Héctor Sánchez Martínez^c

^a Ing. de Caminos, Canales y Puertos. LRA Infraestructures Consulting. Director de Estructuras. nachorueda@lraingenieria.es

^b Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos. LRA Infraestructures Consulting. Socio-Director. tomasripa@lraingenieria.es

^c Ing. de Caminos, Canales y Puertos. LRA Infraestructures Consulting. Jefe de proyecto. hectorsanchez@lraingenieria.es

RESUMEN

La pasarela peatonal de Marqués de Zafra, construida en 1979, es la única estructura atirantada con la que cuenta la vía. En una Inspección Especial en 2020 se detectaron deterioros en uno de los tirantes, con rotura de la vaina de protección, perdida de lechada y corrosión en los alambres. Se reparó provisionalmente el sistema de protección de este tirante, y acometieron los trabajos de Inspección Especial para la evaluación el estado de conservación del resto. A la vista de los resultados de la inspección, y puesto que los tirantes se encuentran al final de su vida útil, se redactó el proyecto de sustitución de los tirantes y mejora de la durabilidad de la pasarela.

ABSTRACT

Marqués de Zafra footbridge, built in 1979, is the only cable-stayed structure on Calle 30 (Madrid). During a special inspection in 2020, a degradation was noticed in one of the stay cables, with a break of the sheath, loss of grout and corrosion in the wires. The protection system was provisionally repaired, and special inspection works were undertaken to evaluate the conservation of the remaining. In the light of the results of the inspection, and as the cables are at the end of their life cycle, a project was drawn up to replace the stay cables and improve the durability of the footbridge.

PALABRAS CLAVE: pasarela peatonal, estructura atirantada, sustitución de tirantes, inspección.

KEYWORDS: pedestrian footbridge, cable-stayed structure, cable replacement, inspection.

1. Descripción de la estructura

La estructura se sitúa en el arco este de la circunvalación Calle 30, en el entorno del p.k. 8+650 de la vía, entre los nudos de Ventas y O'Donell. Se trata de una pasarela atirantada de hormigón, proyectada por la oficina de Fernandez Casado y construida en el año 1979; ésta resuelve la conexión peatonal entre el Paseo de Marqués de Zafra (interior de la Calle 30) y la calle de Ricardo Ortiz (exterior de la circunvalación).



Figura 1. Vista general de la pasarela.

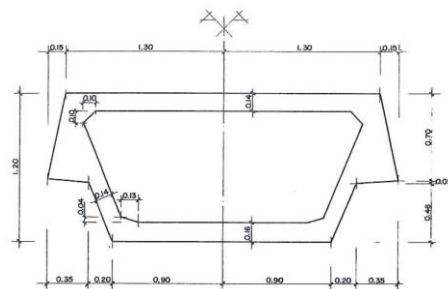
La longitud total a salvar es de 127.8 m, divididos en 3 vanos de luces 21-85.8-21 metros; el dintel cuelga de la parte superior de los pilonos con 6 parejas de cables, dos verticales en el plano de las pilas y 4 en el vano principal, dividiéndolo en luces del orden de los 17 m, quedando de este modo una distribución de vanos: 21-17-17-17.8-17-17-21.

El sistema empleado en los cables es el habitual de la época, compuestos por barras lisas de 7 mm de diámetro y 1070 MPa de carga a rotura, dispuestas en el interior de una vaina de PEAD rellena de lecha; los anclajes pasivos se sitúan en el pilono y los activos en el tablero, quedando todos ellos inaccesibles.

El dintel está formado por una sección cajón de 1.20 m de canto, constante a lo largo del eje, y 2.60 m de anchura en la cara superior. El espesor de las paredes es de unos 14 cm y por las tablas superior e inferior discurren los pretensados rectos; el dintel está ejecutado con vigas prefabricadas de 20.25 y 27.10 m de longitud, dando continuidad al pretensado *in situ* tras el montaje de éstas sobre apeos provisionales.

Las pilas rondan los 25 m de altura y presentan una forma triangular de V invertida, formando un triángulo isósceles unido en cabeza de forma natural y en la parte inferior por una viga. Cada una de las patas descansa sobre una rótula metálica que permite el giro de la pila en su extremo inferior, en un eje perpendicular al del tablero, y que permitió su montaje en el suelo y posterior izado hasta su posición definitiva. El dintel es pasante a través de los pilonos, y

únicamente cuenta con un apoyo lateral para absorber las fuerzas horizontales transversales del tablero.



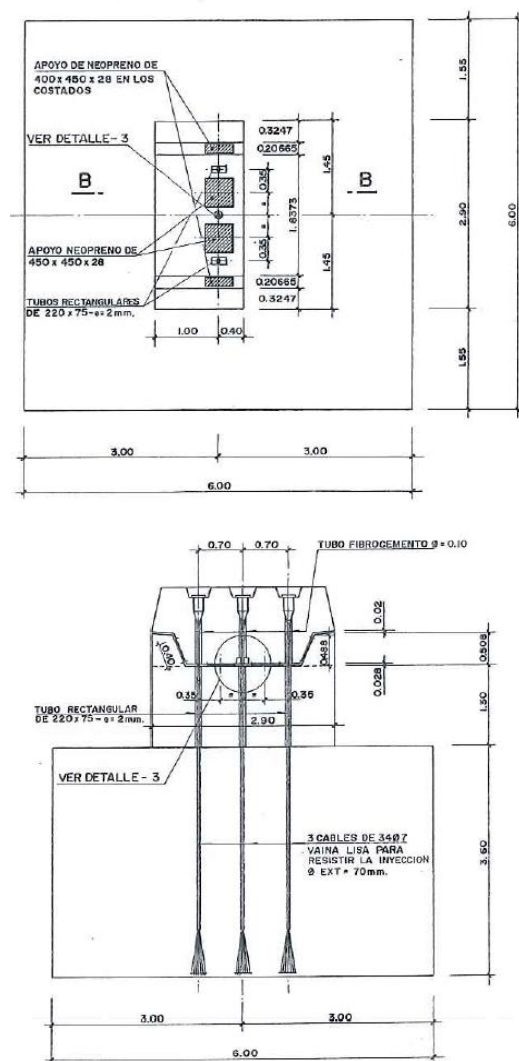
[illegible]

Figura 5. Planta y alzado estribo móvil (E-1).

En la Inspección Principal, llevada a cabo por EMESA en febrero 2020, se detectó una fisura de aproximadamente 1.0 m de longitud en la vaina de uno de los tirantes largos del vano principal. El inicio de la fisura describía una alineación longitudinal, coincidiendo con la generatriz inferior, para terminar siendo perimetral en el extremo. En la zona inferior se observaba una falta de lechada, con alambres de pretensado a la vista y una corrosión avanzada.

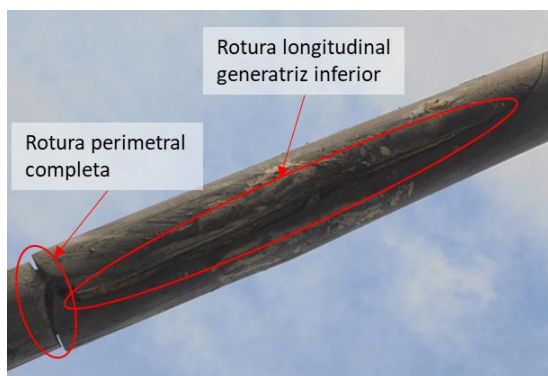


Figura 7. Fisuración de la vaina del tirante.



**Figura 8. Vista del interior de la vaina.
Falta de inyección y corrosión de los alambres.**

En la reparación, llevada a cabo por Freyssinet, se retiró un tramo de la vaina en la zona afectada y se picó manualmente la lechada hasta descubrir completamente los alambres. La lechada se encontraba completamente disgregada, y la corrosión era uniforme y avanzada, con una reducción significativa de la sección resistente. En la inspección de la zona descubierta se registraron 12 alambres con corrosión y pérdida de sección (los perimetrales, ya que la lechada interior no se retiró para no dañar más alambres), uno completamente roto y otro con falta de tensión.



**Figura 9. Estado de los alambres.
Corrosión generalizada y rotura de 1 alambre.**

Tras la inspección visual se procedió con la reparación provisional del tirante, siguiendo los siguientes pasos:

- Aplicación de producto pasivante.
- Instalación o soldadura de un nuevo trozo de vaina de PEAD.
- Inyección de la vaina con lechada rellenando por gravedad.

- Sellado de los agujeros de inyección.
- Protección del segmento reparado con una membrana autosellante.

Además de la inspección y reparación del tirante afectado, Freyssinet llevó a cabo un mapeo de todos los tirantes. Mediante golpes con un martillo se detectaron zonas con posibles huecos; en ellas se realizó un orificio para confirmar si realmente existía un llenado incompleto de lechada. En los casos que fue posible, se introdujo un boroscopio en el interior de la vaina para inspeccionar la longitud libre.

Las patologías que se detectaron en el interior de las vainas fueron:

- Huecos concentrados en los primeros metros de la parte superior de los tirantes, que afectan a más del 50% de los tirantes.
- Cordones descubiertos en esos huecos.
- Humedad en los hilos de todos los tirantes en los que se detectó hueco. Esta humedad se explicaba por la infiltración del agua de escorrentía a través de la conexión del tubo metálico de la parte superior y el pilono.
- Corrosión superficial en alambres en 3 tirantes.
- Lechada de baja consistencia en 1 tirante.

Los anclajes no resultan accesibles, por lo que no se procedió a su inspección; del mismo modo, tampoco pudieron inspeccionarse los pretensados verticales de los estribos.



Figura 10. Detalle de la unión del tubo de acero en extremo superior.



Figura 11. Inspección con boroscopio del interior de la vaina.

2. Estimación de la fuerza en los tirantes

Los trabajos de inspección de los tirantes incluyeron la medición de la fuerza en la totalidad de los mismos, estimándola a partir de ensayos de cuerda vibrante en la totalidad de los cables. Los resultados de fuerza obtenidos en los tirantes están por debajo del límite superior normativo, que se establece en un 45% de la fuerza garantizada de rotura (Tabla 1). La medición de la tensión de los tirantes permite un mayor conocimiento del funcionamiento estructural de la pasarela, así como la identificación de posibles descompensaciones en la fuerza de los tirantes.

Puesto que los pilonos cuentan con una articulación en su base, el momento generado en este punto por los tirantes del vano principal y los de retenida debe ser nulo; si analizamos las fuerzas estimadas a partir de los ensayos observamos que no existe dicho equilibrio.

La ley de momentos del dintel frente a cargas permanentes consta de dos partes: la primera se corresponde con los esfuerzos que se producen en una viga biapoyada con una luz igual a la longitud total del tablero, y la segunda a los producidos en la misma viga bajo la acción de las fuerzas puntuales ejercidas por los tirantes.

De acuerdo a lo anterior, fijando unos esfuerzos “objetivo” en la ley de momentos frente a cargas permanentes, podemos obtener las cargas puntuales anteriores. Proyectando las fuerzas en la dirección de los tirantes y tomando momento nulo en la base del pilono podemos estimar la fuerza “objetivo” de los tirantes frente a cargas permanentes.

En el artículo de la revista Hormigón y Acero [1], el Proyectista aporta gran cantidad de información sobre la concepción estructural de la pasarela y, en concreto, incluye una gráfica con la ley de momentos flectores de peso propio, a tiempo cero e infinito (Figura 12).

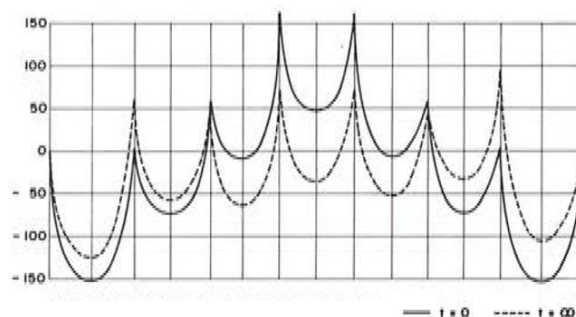


Figura 12. Leyes de momentos flectores de peso propio. (Extracto del artículo [1]).

Tabla 1. Resultados de los ensayos de cuerda vibrante.

Pila	Tirante	nº alambres por tirante (ud)	Capacidad máxima (kN)	Frecuencia media (Hz)	Fuerza bi- articulado (kN)	%GUTS	Fuerza bi- articulado (kN)	%GUTS
OESTE	NCL	34	2224	2.88	705	32%	694	31%
	SCL	34	2224	3.00	766	34%	755	34%
	NCC	24	1570	4.87	557	35%	546	35%
	SCC	24	1570	5.10	610	39%	599	38%
	VN	16	1047	-	-	-	-	-
	VS	16	1047	-	-	-	-	-
	NRL	30	1963	4.45	725	37%	712	36%
	SRL	30	1963	4.69	806	41%	792	40%
	NRC	30	1963	4.39	593	30%	580	30%
	SRC	30	1963	4.35	582	30%	569	29%
ESTE	NCL	34	2224	2.95	749	34%	738	33%
	SCL	34	2224	2.94	749	34%	738	33%
	NCC	24	1570	4.86	554	35%	543	35%
	SCC	24	1570	4.95	575	37%	565	36%
	VN	16	1047	6.90	336	32%	321	31%
	VS	16	1047	7.39	385	37%	369	35%
	NRL	30	1963	4.38	700	36%	687	35%
	SRL	30	1963	4.69	798	41%	784	40%
	NRC	30	1963	4.61	647	33%	633	32%
	SRC	30	1963	4.50	608	31%	595	30%

3. Descripción de la solución

3.1 Medios auxiliares

En el marco de la inspección especial se evaluó el incremento de tensión producido en los tirantes por la eventual rotura accidental de un tirante, con el objetivo de determinar si debía apearse la pasarela de forma urgente. En caso de el tirante más afectado llegara a romperse, su pareja vería incrementada su fuerza en torno a un 14% del GUTS, llegando su tensión al 47%, lo que se considera admisible al tratarse de una situación accidental. Del mismo modo se analizaron las deformaciones producidas en el dintel, y por ende los esfuerzos, en dicha situación, considerándose admisibles.

La comprobación anterior abre la puerta a la posibilidad de sustituir los tirantes uno a uno, sin ningún tipo de sostenimiento adicional. Al analizar el incremento de tensión producido en el resto al retirar el tirante a sustituir observamos que, en el caso de los verticales, el incremento de la sollicitación es mayor, llegando a alcanzar el 64% del GUTS. El valor anterior supera el límite normativo, fijado en el 45%, y además no se trata de una situación accidental, si no una situación transitoria que se prolongará hasta que finalicen los trabajos. Por estos motivos, unidos a la incertidumbre sobre el estado de conservación real de los tirantes, se adoptó la decisión de apearse el dintel durante los trabajos.

Una de las posibilidades es disponer un sistema de apeo modular a partir de torres instaladas en las zonas de mediana, tercianas y terraplenes y apoyar el dintel de forma continua sobre celosías metálicas, creando un sistema porticado. En los pilonos, se colocará un andamiaje tubular para garantizar la estabilidad de los mismos durante los trabajos. Por otro lado, puede plantearse la posibilidad de emplear un sistema de atirantamientos provisionales que reduzcan la fuerza en los tirantes y permitan acometer la sustitución de estos sin necesidad de apearse por completo el dintel. Al no resultar necesario instalar torres de apeo en mediana y tercianas, se reducen las afecciones al tráfico, un aspecto clave a la vista de la elevada IMD de Calle 30.

Finalmente se optó por una solución híbrida, que aportara las ventajas de cada uno de los sistemas planteados. En las secciones de pilas se instaló un sistema de torres de apeo, junto con los andamios que se elevan hasta el extremo superior del pilono; el vano central se sostiene con una pareja de tirantes provisionales dispuestos a 1/3 de la luz, coincidiendo con la sección maciza de la junta de montaje de las vigas.

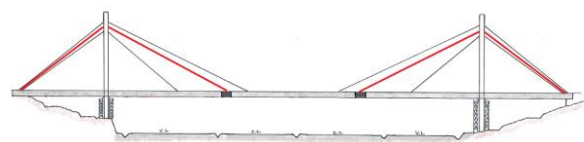


Figura 13. Esquema de medios auxiliares.

3.2 Pretensados verticales y tirantes

3.2.1. Ampliación de estribos y riostra transversal

Los anclajes verticales existentes no eran sustituibles, por lo que se planteó la ejecución de unos nuevos por el exterior de la estructura original, a una distancia de 2.0 m a cada lado del eje del tablero. Para alojar los nuevos pretensados verticales fue necesario ampliar el estribo y ejecutar una riostra transversal en el extremo del tablero, coincidiendo con la zona macizada. La dimensión longitudinal de estos recrecidos es de 1.80 m, y en sentido transversal dan una anchura total de 2.50 m a cada lado del eje del tablero.

Los nuevos elementos se cosen a los existentes anclando con resina epoxi parte de su armado. El armado transversal de la riostra, formado por 3 capas de $\phi 16$ cosidas a la sección maciza del tablero, es el encargado de transferir al tablero la componente horizontal de la fuerza de los tirantes, a través de un mecanismo de rasante.

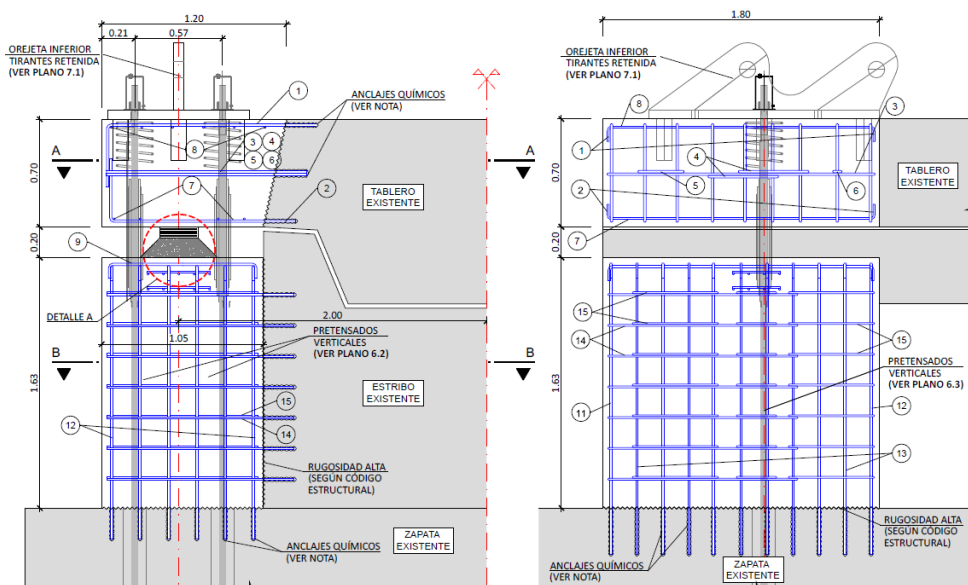


Figura 14. Alzado y sección de recrecidos en estribo E-2.

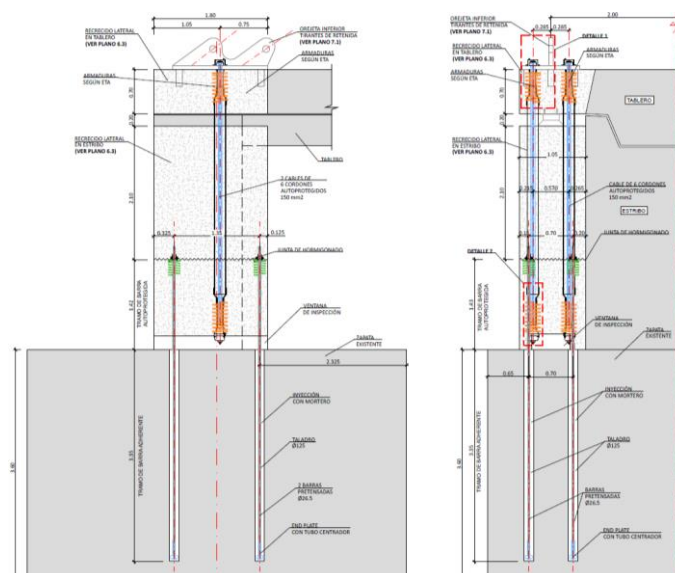


Figura 16. Alzado y sección de anclajes verticales en estribo móvil (E-1).

3.2.3. Sistemas de atirantamiento

Según los datos indicados en los planos del proyecto original, los tirantes están formados por alambres de 7 mm de diámetro y tensión de rotura de 170 kg/mm^2 , lo que resulta razonable atendiendo a la época de construcción de la pasarela. Los nuevos cables estarán formados por torones de 150 mm^2 , conformados con acero de 1860 MPa de tensión de rotura.

Tomando como referencia la capacidad de los tirantes existentes, podemos estimar el número de cordones de los nuevos. No obstante, se llevó a cabo un análisis estructural de la pasarela en fase de servicio, aplicando las cargas y coeficientes de combinación y mayoración definidos en el Eurocódigo. Limitando la tensión en los tirantes al 45% de su resistencia última garantizada (GUT) para la combinación pésima en ELU, hemos obtenido los siguientes números de cordones:

Tabla 2. N° de cordones por tirante.

Tirantes	n° cordones
Retenida	9
Verticales	7
Principales cortos	7
Principales largos	10

Entre los sistemas disponibles en el mercado, se optó por el H1000 de Freyssinet (o equivalente). Este sistema presenta una excelente protección frente a la corrosión, al estar los cordones formados por hilos de acero galvanizado recubiertos por una vaina de PEAD extrusionada; además, cuenta con un sistema de horquillas en sus extremos, que nos permite anclar el tirante a unas orejetas dispuestas en el tablero a tal efecto, resultando menos intrusivo en la estructura que un anclaje convencional.

Los anclajes serán terminales en horquilla tipo CE 1860, activo en el tablero y fijo en el pilono; la carrera de los terminales activos es de 200 mm.

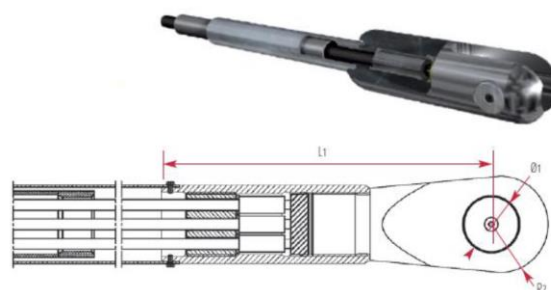


Figura 17. Detalle de anclaje fijo.

Los cordones están compuestos por 7 hilos de alta resistencia de acero galvanizado de grado 1860 MPa , con un diámetro de 15.7 mm . Cordones revestidos con vaina de polietileno de

alta densidad PEAD rellena con cera. El sistema presenta una protección frente a la corrosión con un grado de calidad suficiente, que permite el empleo de los cordones en tirantes exteriores sin sistemas de protección adicionales.

La vaina global consta de un tubo continuo, dentro del cual se enfilarán los cordones; en este caso no se prevé ningún tipo de relleno de las vainas, lo que simplifica las operaciones de sustitución e inspección de los tirantes.

3.2.4. Anclaje de tirantes a tablero y pilonos

Las horquillas se unen mediante unos bulones a unas orejetas metálicas, previamente instaladas en el tablero y los pilonos. Las orejetas forman parte de unas placas de anclaje específicamente diseñadas para este proyecto; estos elementos cuentan con una serie de casquillos y elementos auxiliares que permiten garantizar la transferencia de carga al tablero y los pilonos. Se ha optado por un sistema de estructuras metálicas frente a recercados de hormigón, con el objetivo de reducir los tiempos de instalación, eliminando los tiempos muertos de fraguado de soluciones con mortero.

El anclaje de las placas se materializa con barras rígidas de pretensado, tesadas a una fuerza superior a la de los tirantes, con el objetivo de que no sufran en ningún caso fenómenos de fatiga.

Las barras de anclaje de la cabeza del pilono se sitúan en posición horizontal, respetando la posición de los anclajes existentes, para así permitir su instalación antes de la retirada de los tirantes originales. Estas barras tienen en ambos extremos una placa con orejeta, para el anclaje del extremo superior de los tirantes de retenida y del vano principal. Los anclajes al tablero se resuelven con barras rígidas enfiladas en la posición de los tirantes existentes, reperforando el tramo de vaina perdido en el interior del tablero. En el extremo superior tienen una placa con orejeta para el anclaje del extremo inferior de los tirantes, y en la cara inferior del tablero una contraplaca que transmite los esfuerzos al dintel.

Referencias

- [1] Carlos Fdez. Casado, Javier Manterola, Leonardo Fdez. Troyano, Pasarela colgada en la Avda. de la Paz. Madrid, Hormigón y Acero nº 124 (1977) 87–103.
- [2] C. Fernández Casado, L. F. Troyano, J. Manterola, Pasarela colgada en Avenida de la Paz (Madrid), Hormigón y Acero nº 130-131-132 (1979) 345–348.

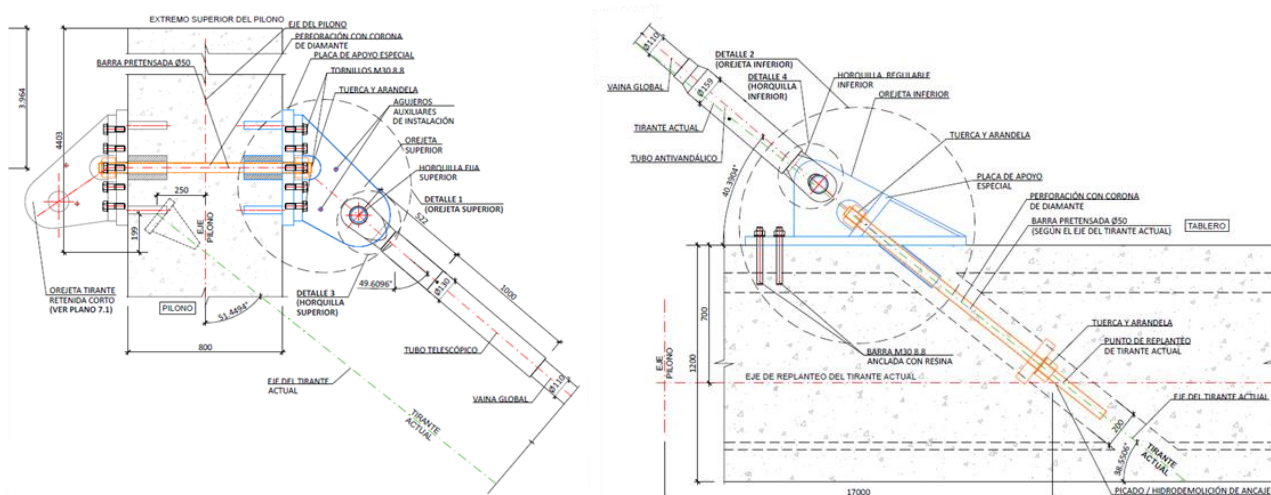


Figura 18. Anclaje de tirantes del vano principal.