

Puente Cumbre Vieja en la isla de La Palma. Aspectos constructivos relevantes.

“Cumbre Vieja” bridge on the island of La Palma. Relevant construction aspects.

Luis Sopeña Corvinos^a, Juan Jesús Álvarez Andrés^b, Óscar Ramón Ramos Gutiérrez^c, Ricardo Pereira de Sousa^d, Conchita Lucas Serrano^e

^a Ingeniero de Caminos, C. y P. DRAGADOS. Dirección Técnica. Ingeniero Senior. lsopenac@dragados.com

^b Ingeniero de Caminos, C. y P. DRAGADOS. Dirección Técnica. Jefe Servicio. jjalvarez@dragados.com

^c Dr. Ingeniero de Caminos, C. y P. ORRAMOS INGENIERÍA. Universidad de Cantabria. CEO. oramos@orramoseng.com

^d Ingeniero de Caminos, C. y P. ORRAMOS INGENIERÍA. Ingeniero de puentes. Jefe de Proyecto. rpereira@orramoseng.com

^e Ingeniera de Caminos, C. y P. DRAGADOS. Dirección Técnica. Jefa Departamento. clucass@dragados.com

RESUMEN

La situación de la obra, en la isla de La Palma, en la zona afectada por la erupción del volcán de Cumbre Vieja, condicionó completamente la ejecución de esta estructura, desde las altas temperaturas del terreno durante la ejecución de las cimentaciones hasta la logística de suministro de materiales y medios auxiliares. Teniendo en cuenta los condicionantes logísticos y el plazo de obra, el tablero, de 243 m de longitud y 14 m de ancho, con vanos tipo de 33 y 31 m, se ejecutó in situ, mediante cimbra porticada, y hormigonado vano a vano. La cimbra porticada con sistema de cuelgue, el premontado de módulos de ferralla y el control de curado de probetas para optimizar los tesados fueron algunos de los aspectos constructivos relevantes.

ABSTRACT

The location of the project, on the island of La Palma, in the area affected by the Cumbre Vieja volcano eruption, completely conditioned the execution of this structure, from the high ground temperatures during the execution of the foundations to the logistics of supplying materials and auxiliary means. Taking into account the logistical conditions and the work deadline, the deck, 243 m long and 14 m wide, with typical spans of 33 and 31 m, was executed on site, using frame scaffolding, and concreting span by span. Frame scaffold and falsework with hanging system, pre-assembled rebar modules and curing control of test tubes to optimize posttensioning of the deck were some of the relevant construction aspects.

PALABRAS CLAVE: construcción de estructuras, cimbra, cuelgues, prefabricación, postesado, ciclo.

KEYWORDS: construction of structures, frame scaffold, hangers, prefabrication, post-tensioning, cycle.

1. Introducción

Dentro de las obras necesarias para la restitución de la conexión norte-sur en el oeste de la isla de La Palma, tras la erupción del volcán de Cumbre Vieja acaecida entre el 19 de

septiembre y el 13 de diciembre de 2021 en el municipio de El Paso, se encuentra un viaducto de 243 m de longitud, ya descrito desde el punto de vista del proyecto en otra Comunicación. El

hecho de tener que trabajar en una zona completamente anegada de coladas de lava relativamente recientes, con altísimas temperaturas del terreno, emisión de gases nocivos, así como riesgo de tubos lávicos activos (ver figura 1), se unió a las condiciones propias de trabajar en una isla de reducido tamaño, lo que complica más aún cualquier aspecto de logística de obra que se considere, como disponibilidad de materiales, medios auxiliares e incluso mano de obra. Para completar el paquete de condicionantes y requisitos exigentes, el plazo de ejecución debía ser mínimo con el objetivo de permitir a la población de la zona una vuelta a la normalidad lo más pronta posible. Todo ello obligó a analizar el proceso constructivo de principio a fin, buscando un equilibrio entre la eficiencia y rapidez de los sistemas constructivos, la logística de medios auxiliares y la mano de obra, ajustándose al presupuesto adjudicado.



Figura 1. Tubos lávicos encontrados durante campaña de reconocimiento.

2. En tierra inhóspita

No podemos hablar de los aspectos relevantes de la ejecución de esta estructura sin hablar del panorama que se encontró el equipo de obra al “aterrizar” en la zona. En palabras de

los trabajadores que tuvieron la misión de entrar por primera vez para realizar los primeros trabajos de replanteo, “era como estar en otro planeta, completamente inhóspito y agresivo, surrealista, distópico”. La visión, un mar negro de rocas (ver figura 2 a modo de ejemplo) con todas las formas imaginables, el calor que subía de manera inmisericorde, los gases, visible e invisibles, el olor, el riesgo de encontrar tubos lávicos, en definitiva un entorno en el que la conquista del terreno que supone cualquier obra lineal adquiriría tintes realmente épicos y extremos.



Figura 2. Colada de lava volcánica antes de entrar la maquinaria.

Fue fundamental la colaboración en esas primeras tareas (y a lo largo de toda la obra) de las diferentes instituciones locales, regionales y nacionales, como el PEVOLCA (Plan de Emergencias Volcánicas de Canarias) o el IGME (Instituto Geológico y Minero de España), puesto que la zona de trabajo, en gran parte, estaba aún calificada como zona de exclusión.

Durante el desarrollo de la obra, se llevó a cabo una extensa campaña de reconocimiento geológico y geotécnico de toda la traza, intensificada a lo largo de las áreas de cimentación de los muros y en todos los apoyos del viaducto.

Se realizaron termografías aéreas (ver figura 3) para la identificación, chequeo y control de zonas potenciales de altas temperaturas. Esta campaña permitió detectar diversos puntos de la

traza con temperaturas realmente elevadas a cota superficial (superiores a los 350 °C), coincidentes con zonas donde el espesor de lava era mayor.



Figura 3 – Mapa termográfico de la obra completa vuelo DRON y espesores de lava

3. Características generales del viaducto.

Con objeto de reducir al máximo la afección producida por la nueva carretera, se decide ubicar un viaducto en la zona entre coladas generada por la montaña de Todoque,

entre los PK 2+537 y PK 2+780, con una longitud total de 273 m y 8 vanos, mejorando la permeabilidad transversal en la zona, disminuyendo la afección a las plantaciones existentes, y dando paso a la antigua carretera de la costa y a los caminos agrícolas pre-existentes (ver figura 4).



Figura 4. Planta del trazado de la nueva carretera. Entre coladas, el viaducto.

Se trata de una estructura continua hiperestática de 8 vanos, siendo la distribución de la luz de los vanos la siguiente: 24,0 m + 33,0

m + 33,0 m + 33,0 m + 31,0 m + 31,0 m + 31,0 m + 27,0 m (ver figura 5).

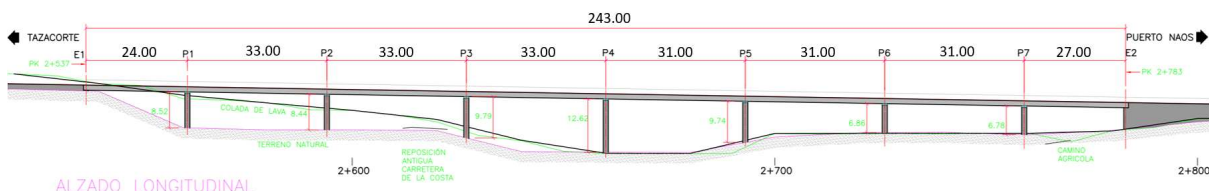


Figura 5. Alzado y distribución de vanos del viaducto.

4. Cimentaciones

Debido a los problemas de disponer de maquinaria pesada, así como las características del terreno volcánico (el pre-existente a la erupción), la mejor solución para las cimentaciones era la profunda mediante micropilotes, salvo para el estribo 1 y la pila 1, donde se podían disponer cimentaciones directas mediante zapatas.

Los trabajos comenzaron con la excavación de la colada de lava residual situada parcialmente en los vanos 1 y 2, realizada con el objetivo de cimentar el viaducto en su totalidad sobre el terreno original, y no sobre el producto de la propia erupción volcánica. Los sondeos realizados en todos los apoyos confirmaron una secuencia muy característica, de manera que, una vez atravesado el relleno de bancal, el empotramiento de los micropilotes se produce en una colada antigua (que consiste en una alternancia de niveles métricos de escorias con capas de basaltos, y de forma puntual, un nivel más arenoso, formado por escorias, piroclastos y cenizas).

Los micropilotes tienen un diámetro de perforación de 200 mm, con armadura tubular de 139,7 mm de diámetro y 9 mm de espesor.

Los trabajos de ejecución de los micropilotes comenzaron en octubre de 2022, hormigonándose el primer encepado el 29 de diciembre de 2022. Los trabajos de ejecución de cimentaciones (micropilotes y encepados) se solaparon con la de ejecución de alzados de estribos, pilas e incluso del tablero.



Figura 6. Máquina de micropilotes trabajando



Figura 7. Vista de encepado en ejecución. Hormigón de limpieza con micros ya ejecutados.

4. Alzados de pilas y estribos

Los estribos son cerrados, con aletas en vuelta. Su ejecución se realizó mediante sistemas convencionales de ferrallado y encofrado in situ.

Las pilas, de entre 6,0 y 13,0 m de altura, son de hormigón armado, con un alzado monofuste que se abre en su parte superior en 2 brazos, figurando la forma de una palmera y permitiendo el doble apoyo vertical del tablero sobre la pila.

La ejecución de las pilas fue in situ, disponiendo de un juego de encofrados para la parte de monofuste (ver figura 8) que permitía adaptarse a la altura variable, y otro juego de encofrados de dimensiones fijas para los brazos superiores (ver figuras 9 y 10), común para todas las pilas.



Figura 8. Ejecución de pilas. Ferralla y encofrado para primera fase (monofuste).

Esto permitió ir avanzando en una primera fase con la ejecución del monofuste, y

por detrás con el equipo de encofrado de la parte superior, solapando ambas actividades y optimizando el uso de recursos y el plazo de ejecución.

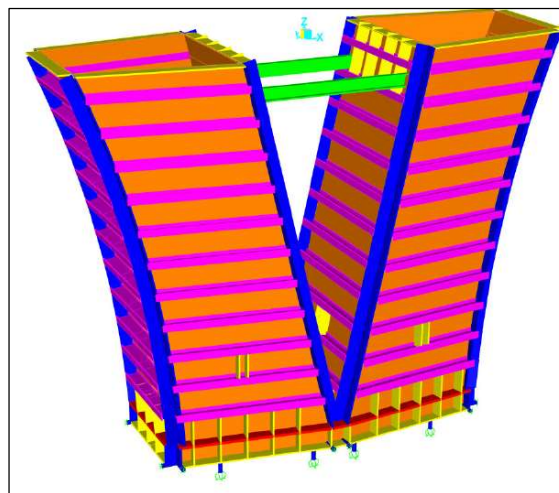


Figura 9. Modelo 3D para cálculo de encofrado de zona superior de pilas.

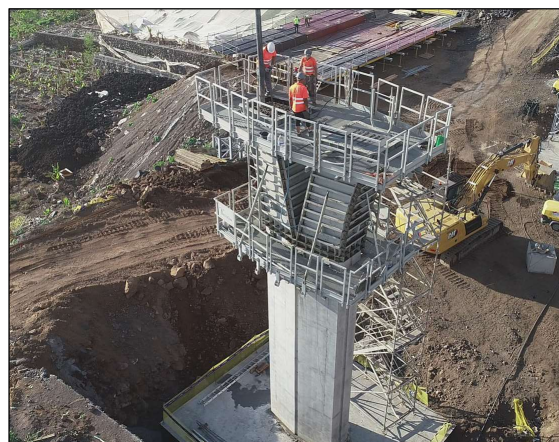


Figura 10. Hormigonado de zona superior de alzado de pilas.



Figura 11. Vista de alzado de pila 1 terminado.

5. Ejecución del tablero.

Como en cualquier estructura, el diseño del tablero estuvo fuertemente vinculado al sistema constructivo. En este caso, por las condiciones particulares propias de la insularidad, los sistemas de ejecución disponibles estaban muy restringidos, tanto por motivos de fabricación y transporte dentro de la propia isla, como de disponibilidad de maquinaria y mano de obra.

Tras desechar opciones como tableros prefabricados o parcialmente prefabricados se optó por un tablero in situ ejecutado con una cimbra porticada. Todo el sistema de cimbra porticada (torres, celosías y sistema de encofrado), así como la mano de obra especializada para ejecución del tablero (cimbra, encofrado, ferralla y hormigonado) fue necesario traerla de fuera de la isla.

5.1 Cimbra

Como se ha indicado anteriormente, la cimbra era porticada, evitando así apoyos intermedios, con los incrementos de coste y plazo que su ejecución (cimentaciones incluidas) habrían implicado, aprovechando las cimentaciones de las propias pilas y estribos para realizar los apoyos de las torres.

Debido a la luz que tenían salvar las celosías, 30,5 m en los vanos de 33 m, 27,5 m en los de 31 m, y 23,5 y 24,0 m en los vanos extremos, las celosías eran de canto variable, teniendo 2,00 m en las zonas laterales y 2,60 m en la zona central (ver figuras 12 y 13).

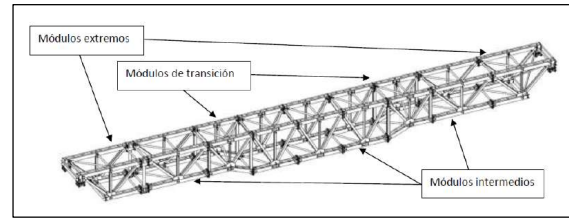


Figura 12. Vista 3D de celosía de cimbra.

Se disponían 4 celosías en transversal, dos laterales de 2,0 m de ancho (separación entre cuchillos), y dos centrales de 1,40 m de ancho, cubriendo unos 12 m de los 14 m de ancho totales del tablero (ver figura 14).

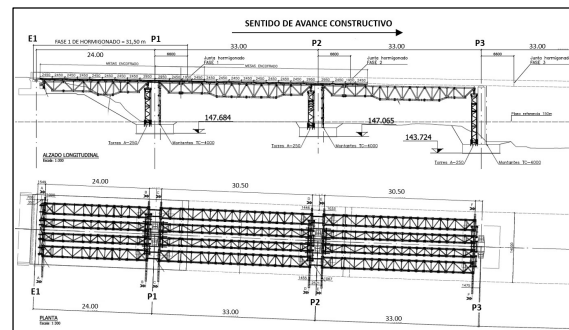


Figura 13. Alzado y planta de las 3 primeras fases de tablero.

En dirección longitudinal la ejecución del tablero se dividió en 7 fases de hormigonado (ver figura 14), de forma que las juntas de hormigonado se establecían a 6,60 m de la pila.

- Fase 1: desde estribo E1 hasta 6,60 m pasados la pila P1, 31,15 m de longitud.
- Fases 2 a 4: desde 6,60 m pasado pila P1, P2 o P3 hasta 6,60 m pasado pilas P3, P4 o P4 respectivamente, con una longitud de 33 m.
- Fases 5 a 6: desde 6,60 m pasado pila P4 o P5 hasta 6,60 m pasado pilas P5 o P6, con una longitud de 31 m.
- Fase 7: desde 6,60 m pasados P6 hasta estribo E2, con una longitud de 51,95 m.

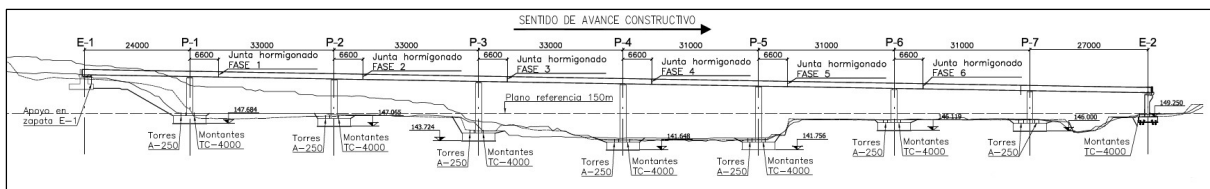


Figura 14. Alzado y distribución de vanos.

Además del canto variable, otra medida que ayudaba a las celosías en el momento de máxima carga era el sistema de cuelgue (ver figura 15): las celosías se colgaban del extremo del voladizo anteriormente ejecutado (a 1,10 m de la junta de hormigonado) de forma que se reducía la luz de flexión de forma significativa (en el vano más grande, de 30,5 m a 25,0 m, casi un 20%), reduciendo así tanto solicitaciones como deflexiones en las celosías.

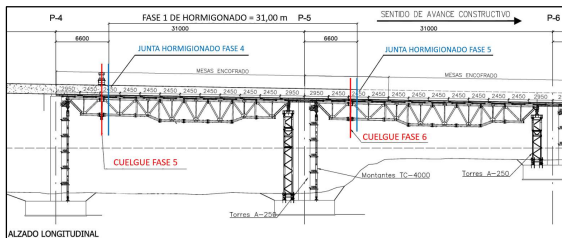


Figura 15. Sistema de cimbra. Sección longitudinal.

Aunque este sistema tiene sus bondades, hay que tener en cuenta las posibles interferencias de los elementos que materializan el cuelgue (barras de pretensado de 36 mm de diámetro) con los elementos del propio tablero (armado, vainas de postesado, aligeramientos,...). Es decir, el proyecto del tablero debe desarrollarse teniendo en cuenta la posición de dichos cuelgues, tanto en longitudinal como en transversal (ver figura 16), haciendo compatible en el espacio los elementos estructurales del tablero con los elementos temporales de la cimbra. Adicionalmente, el sistema de cuelgue introduce una carga durante la construcción en el borde del voladizo que debe ser comprobada por el proyectista del puente, teniendo en cuenta resistencias del hormigón por debajo de los 28 días, lo que puede resultar en la necesidad de refuerzos tanto a nivel local (bajo los gatos de tesado del cuelgue sobre el tablero) como a nivel global (flexión y/o cortante del tablero).

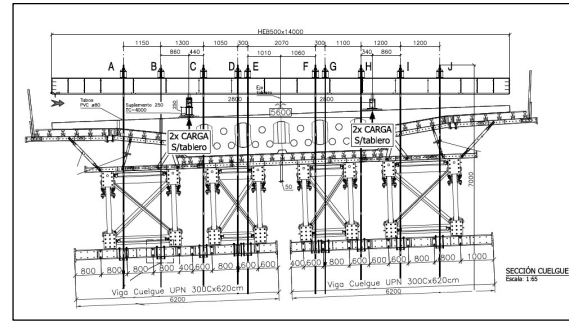


Figura 16. Sistema de cuelgue. Sección transversal.

La secuencia de ejecución del tablero seguida fue la siguiente:

- Instalación de torres de cimbra y de celosías (en la fase en cuestión y en fases siguientes, permitiendo el solape de actividades, optimizando recursos y reduciendo el plazo).
- Instalación de los “barcos” de encofrado, a ancho completo (en la fase en cuestión y en fases siguientes, idem a las torres y celosías).
- Instalación de la ferralla (esta actividad se desarrolla en detalle más adelante).
- Hormigonado de fase N.
- Tesado longitudinal. Primero un tesado de retracción (para evitar fisuración en edades tempranas del hormigón), con un hormigón de no menos de 25 MPa (mínimo 48 horas), y luego el tesado final con un hormigón de no menos de 35 MPa (mínimo 96 horas).
- Instalación del cuelgue y tesado de barras.
- Hormigonado de fase N+1.
- Según se va liberando material de cimbra y encofrado, se va moviendo hacia las fases siguientes. La cantidad de material empleada buscó un equilibrio entre economía (traslado desde la Península incluido) y plazo.

En las figuras 17, 18 y 19 se muestran diferentes elementos auxiliares y fases de ejecución descritas anteriormente.



Figura 17. Vista aérea. Fase 3 de hormigonado.

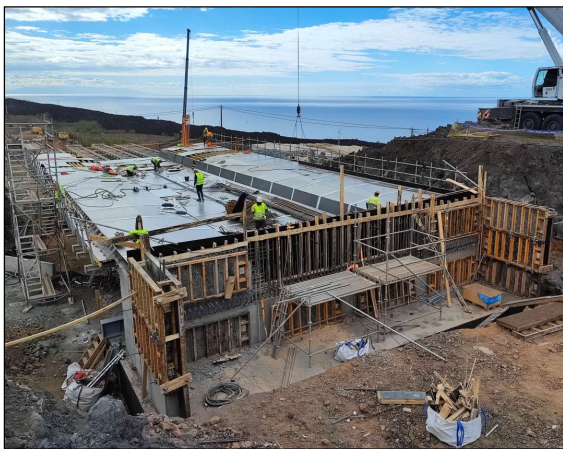


Figura 18. Vista del estribo 1 y primera fase de tablero de cimbra y encofrado.



Figura 19. Instalación de paneles de encofrado sobre los barcos de la cimbra.

5.2 Prefabricación de ferralla

En la construcción de un elemento de hormigón armado la actividad que normalmente consume más tiempo y condiciona tanto el ciclo

de ejecución como el plazo total es la del ferrallado. En un tablero de estas características, con la complejidad adicional de instalación de vainas de postesado y de los aligeramientos, el plazo puede verse todavía más penalizado.

A pesar de no poder optar por un tablero prefabricado, lo que normalmente reduce significativamente los plazos de ejecución, se tomó la decisión de industrializar al máximo la actividad de fabricación e instalación de ferralla, con el objeto de optimizar los recursos, como la mano de obra, maximizar la eficiencia y el control de calidad, así como reducir al máximo los plazos.

Para ello, se instaló un parque o zona de prefabricación de ferralla (ver figura 20), con el objeto de poder prefabricar módulos de armadura de 12 m de longitud y ancho completo, con una dimensión tal que permitiera fabricar 2 módulos de ferralla de forma simultánea. Dichos módulos no incluían únicamente la ferralla, sino también los aligeramientos de porexpán, así como las vainas de postesado en su posición definitiva, dejando para ejecutar sobre el tablero únicamente los solapes de ferralla y los empalmes de vainas. Con el objeto de asegurar la máxima calidad, el parque de prefabricación se configuró con barcos de encofrado idénticos a los empleados sobre el tablero.

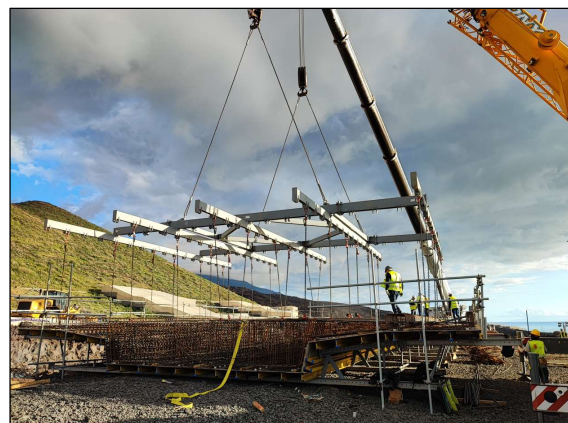


Figura 20. Módulo de ferralla en parque de prefabricación.

La prefabricación de los módulos de ferralla fuera del tablero implicaba la necesidad

de izado y transporte hasta su posición definitiva en el tablero, para lo cual se diseñó y fabricó un balancín de izado (ver figura 21), que además de permitir la elevación mediante una única grúa, garantizaba que la forma de cada módulo se mantuviera, minimizando las actividades a realizar una vez depositado sobre el tablero.

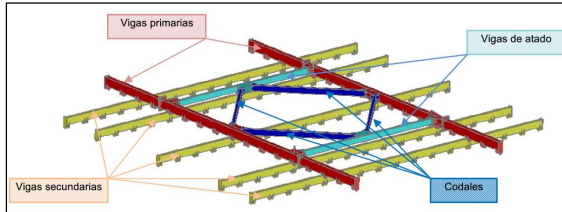


Figura 21. Modelo 3D del balancín de izado para cálculo.

El balancín de izado se diseñó y fabricó para módulos de hasta 26 t de peso, con 35 puntos de izado posibles. Adicionalmente, para garantizar la forma y la seguridad durante el izado de los módulos, se definieron unos criterios de atado de ferralla específicos, así como elementos adicionales que dotaban al módulo de la rigidez necesaria (pates, etc.).

En las figuras 22 y 23 se muestran distintas fases de izado y colocación de los módulos de ferralla empleando el balancín de izado arriba descrito.

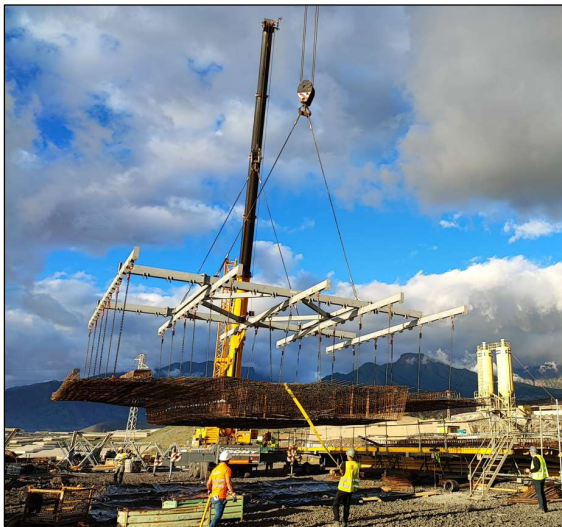


Figura 22. Módulo de ferralla en el momento del izado.

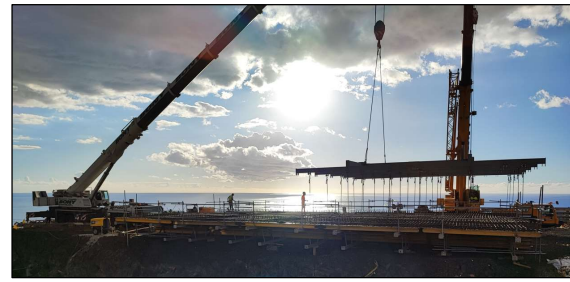


Figura 23. Módulo de ferralla en el momento de colocación sobre el tablero.

6. Conclusiones

En unas condiciones de gran complejidad, extremas en muchos aspectos, el Equipo de Obra de Dragados, con la ayuda de la Dirección Técnica de Dragados, junto con la Dirección de Obra y los Proyectistas, fue capaz de sacar adelante un proyecto que a vista de muchos expertos parecía imposible. Temperaturas extremas, gases tóxicos, tubos lávicos, fueron solo algunas de las adversidades que hubo que vencer para abrir brecha a la nueva carretera. Y en medio de las dos principales coladas, en el “oasis” provocado por la montaña de Todoque, se emplazó un viaducto de 243 m, añadiendo más dificultad todavía al proyecto, con objeto de minimizar la afección al entorno y mejorar la permeabilidad de la zona. Una estructura a la vez poco singular y de lo más singular, con cimentaciones mediante micropilotes, pilas imitando las palmeras locales, y un tablero tipo losa aligerada postesada buscando esbeltez y practicidad.

Los medios auxiliares de ejecución fueron implementados y desarrollados dentro de las posibilidades que dan las condiciones insulares, buscando la máxima eficiencia de procesos, industrialización, optimización de recursos como la mano de obra y reducción del plazo.

Destacan entre ellos la cimbra porticada, con celosías de canto variable, y sistema de cuelgue, optimizando al máximo el comportamiento estructural de la misma, así como el parque de prefabricación de módulos de

ferralla del tablero, transformando un sistema de ejecución in situ en un sistema industrializado a pie de obra, optimizando plazos, calidad y coste, que permitió reducir un ciclo tipo de entre 3 y 4 semanas por vano (duraciones estándar para este tipo de tablero y proceso constructivo) a 11 días por vano, de forma que el primer vano se tesa el 11 de febrero, y los dos últimos vanos se tesan de forma conjunta el 1 de mayo de 2023. En total, 30 semanas desde el comienzo de las

cimentaciones, lo que significa todo un hito en la construcción de estructuras, más aún teniendo en cuenta todos los condicionantes del lugar ya comentados (coladas de lava recientes, insularidad, etc).

En la figura 24 puede observarse el estado de la obra terminada, destacando el viaducto en la zona entre coladas.



Figura 24. Vista aérea lateral del viaducto terminado.

Agradecimientos

En primer lugar, al equipo de obra de DRAGADOS, por sacar adelante un proyecto de gran complejidad técnica y logística, realizando enormes sacrificios, además de por toda la documentación y ayuda que han proporcionado para elaborar este documento. Mención especial a las diferentes áreas de la Dirección Técnica de DRAGADOS que se han involucrado en el proyecto, desde Obras Lineales, Materiales, Topografía, Geotecnia; Planificación y Métodos y Estructuras. Dirección de obra ejercida por el jefe de la Demarcación de Carreteras en Cantabria, D. Fernando Hernández Alastuey, como integrante del Grupo de Trabajo de Seguimiento de Medidas a Adoptar en el Plan de Ayudas a la

Palma, junto con el MITMA, y con ORRAMOS Ingeniería, encargada de la redacción del proyecto de la estructura y de la asistencia técnica a la obra de emergencia. También agradecer su entrega y buen trabajo a empresas involucradas en el proyecto como TECOZAM (suministro y operación de sistema de cimbra y encofrados, ferrallado y hormigonado de tablero) y VSL (suministro del sistema de postesado y ejecución de operaciones de tesado), encargadas de elementos de vital importancia para la obra.