

**Premio a la mejor comunicación española PRAGA 2023
otorgado por la ATC**

Conexión con LP-213 – conexión con LP-215 dentro de las obras de emergencia para la reconstrucción o restitución de infraestructuras de carreteras en la isla de La Palma, con motivo de la erupción volcánica de septiembre de 2021.

Un camino entre el volcán, la lava y el mar



A road between volcano, lava and sea

Rosendo Martínez Fernández
DCE de Cantabria, MTMS

Fernando Hernández Alastuey
DCE de Cantabria, MTMS

Antonio Nievas Guadix
DRAGADOS

Óscar Ramón Ramos Gutiérrez
ORRAMOS INGENIERÍA
Universidad de Cantabria

El 19 de septiembre de 2021, a las 15:10 horas (hora canaria) comenzó una erupción volcánica en la zona de Cabeza de Vaca en la isla de La Palma, en el municipio de El Paso. La erupción expulsó una colada de lava intensa con graves perjuicios, entre ellos, la afección a la red de carreteras. El día 13 de diciembre de 2021 se da por finalizada la erupción volcánica tras 85 días y 8 horas de actividad.

On September 19, 2021, at 15:10 hours (Canary Islands time) a volcanic eruption began in the area of Cabeza de Vaca on the island of La Palma, in the municipality of El Paso. The eruption expelled an intense lava flow with serious damages, among them, the affection to the road network. On December 13, 2021 the volcanic eruption ended after 85 days and 8 hours of activity.

El 19 de septiembre de 2021, a las 15:10 horas (hora canaria) comenzó una erupción volcánica en la zona de Cabeza de Vaca en la isla de La Palma, en el municipio de El Paso. La erupción expulsa una colada de lava intensa con graves perjuicios, entre ellos, la afección a la red de carreteras. El día 13 de diciembre de 2021 se da por finalizada la erupción volcánica tras 85 días y 8 horas de actividad.

El área de la colada de lava ocupa una superficie de aproximadamente 1219 hectáreas, con un espesor medio estimado de 12 m y espesores máximos de hasta 70 m.

Las carreteras LP-2, LP-212, LP-213, LP-211, LP-2132 y LP-215 han quedado parcialmente sepultadas por la colada. Por lo tanto, la comunicación Norte – Sur en esta zona de la isla ha quedado completamente interrumpida, aislando núcleos poblacionales y explotaciones agrícolas de los municipios de Los Llanos de Aridane, Tazacorte y El Paso.

Particularmente la población al sur de la colada no puede acceder a la capital (Santa Cruz de La Palma) a través de la ruta habitual LP-2 y LP-3, sino que tiene que dirigirse hacia el sur a través de la LP-2 circunvalando la isla.

Las siguientes imágenes y figuras muestran el alcance de la afección de la erupción. (figuras 1, 2 y 3)

Con fecha 14 de marzo de 2022 el Jefe de 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, en el que participa el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA) solicita la declaración de emergencia para las obras necesari-



Figura 1. Vista satelital antes y después de la erupción

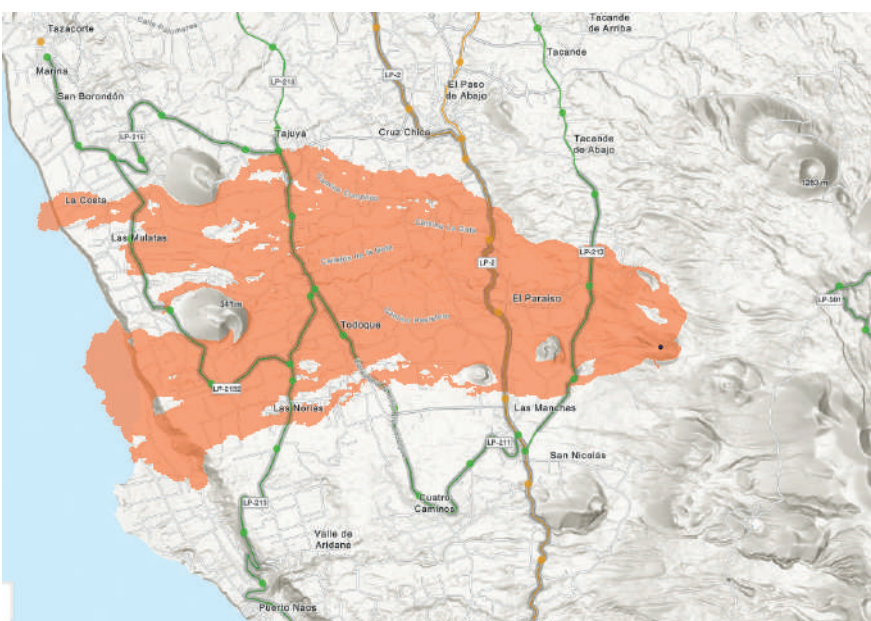


Figura 2. Infraestructuras viarias afectadas por la colada



Figura 3. Vista de la zona afecta por la colada desde la montaña de La Laguna

rias de reconstrucción o restitución de infraestructuras de carreteras en la Isla de La Palma, con motivo de la erupción volcánica comenzada en septiembre de 2021, en atención a la naturaleza catastrófica existente.

Con fecha 22 de marzo de 2022 la Secretaría de Estado de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana dicta una Resolución por la que se ordena la declaración de emergencia y habilitación de un crédito de 38.096.360,00€ a la Dirección General de Carreteras para la ejecución de dichas obras.

El objetivo de la obra de emergencia es restaurar en la medida de lo posible la conexión entre la carretera LP-2 en el núcleo poblacional de Los Llanos de Aridane con la zona Sureste de la colada restableciendo, de esta forma, el principal itinerario de movilidad afectado por la colada.

Definición del corredor y parámetros generales de la carretera

De acuerdo con la información disponible, en las zonas situadas al Este de las montañas de La Laguna y Todoque, en la zona central o superior de la colada, los espesores de colada alcanzan en algunos puntos los 30 m. Este hecho, unido a la incertidumbre acerca de la capacidad técnica para trabajar sobre el propio material de la colada, aconsejaba acometer las obras de emergencia en zonas alejadas del núcleo central de la colada.

Por este motivo, de común acuerdo con la Dirección General de Infraestructuras Viarias del Gobierno de Canarias, el Cabildo Insular de La Palma y los Ayuntamientos afectados, se determinó como opción preferente para restablecer la comunicación Norte – Sur actuar de manera emergente en la parte más cercana a la franja costera, al Oeste de las montañas de La Laguna y Todoque. En esta zona los espesores de colada son más reducidos e, in-

cluso, la actuación de emergencia discurriría en parte sobre terrenos no afectados por la colada.

La obra finalmente construida es una carretera convencional de 3,912 km m longitud y velocidad de proyecto de 70 km/h con una sola calzada y un carril por sentido definida por un eje situado en la línea de separación de ambos carriles. El inicio del Tramo se sitúa en la conexión de la antigua carretera de la costa LP-2132 con la LP-213 (PK 0+950 del documento constructivo), y finaliza en el PK 4+862, en la conexión con la carretera LP-215.

La mayor parte del tronco (2460 m) discurre sobre las distintas coladas de lava (Colada Norte, Colada Intermedia y Colada Sur). El resto del trazado atraviesa terreno agrícola (600 m) – tanto en el inicio del tramo como en la zona entre coladas y a la salida de la Colada Sur – y, en su parte final, se apoya sobre terrenos sin cultivar procedentes de una antigua erupción (502 m). Los primeros 370 m del trazado se apoyan sobre la carretera existente LP-2132



Figura 4. Definición general del corredor

En la zona entre la Colada Intermedia y la Colada Sur el trazado discurre sobre una zona agrícola con una altura de rasante considerable. Entre los PK 2+537 y PK 2+780 se ha construido un viaducto de 243 m de longitud que permite mejorar la permeabilidad transversal en esa zona, disminuir las afecciones y poder dar paso a la antigua carretera de la costa y a los caminos agrícolas

La sección transversal de la carretera, de una sola calzada con un carril por sentido, cuenta con carriles de 3,50 m, arcenes de 1,50 m y berma izquierda (lado este) de 0,75 m. La berma derecha (lado oeste) se ha construido de 3,00 m de anchura (donde ha sido posible), con el fin de que pueda ser empleada – si fuera necesario – para alojar servicios y también para facilitar el acceso a las tareas de mantenimiento. En el tramo de viaducto la berma se repone por el trazado de la carretera existente, y a partir del PK 4+120 la berma discurre al pie del terraplén para reducir el volu-

men de relleno (dada la importante altura de terraplenes en esa zona).

La sección en el viaducto consta también de carriles de 3,50 m y arcenes de 1,50 m, además de ace-
ras de 2,00 m en ambos lados.

El trazado en planta del tronco está formado por 14 alineaciones (con 7 alineaciones rectas). Se ha dispuesto un radio mínimo de 300 m (en el tramo final de conexión con la LP-213) y un radio máximo de 1.100 m.

El trazado en alzado viene conformado por una sucesión de rampas y pendientes. Tiene en total 11 alineaciones. La pendiente mínima es del 0,69 % (correspondiente a la carretera existente), y la máxima es del 9,00 % (en el tramo final de conexión con la LP-213). El Kv de acuerdo cóncavo mínimo es de 2300 y el Kv de acuerdo convexo mínimo es de -714 (ambos en el tramo final de conexión con la LP-213).

El único nudo considerado es la glorieta al final del trazado que co-

necta con la LP-213. Se trata de una glorieta de 20 m de radio interior y dos carriles de 4 m, con arcén interior de 0.5 m y arcén exterior de 1.0 m. Se ha dotado a la glorieta de un carril segregado para que el tráfico procedente de la nueva carretera pueda acceder a la LP-213 sentido sur directamente.

Se han construido 11 obras de drenaje transversal mediante tubos de hormigón prefabricado de 1800 mm de diámetro, distribuidas a lo largo de la traza, con una longitud media de 30 m. Adicionalmente, en el PK 4+416 se ha construido un marco rectangular de hormigón armado, de dimensiones libres interiores de 4 m, en horizontal y vertical. El marco tiene una longitud en planta de 29,79 m, con una pendiente del 11%.

La carretera cuenta con un viaducto, situado entre los PK 2+537 y PK 2+780, con una longitud total de 243 m, tal como se describirá más adelante.

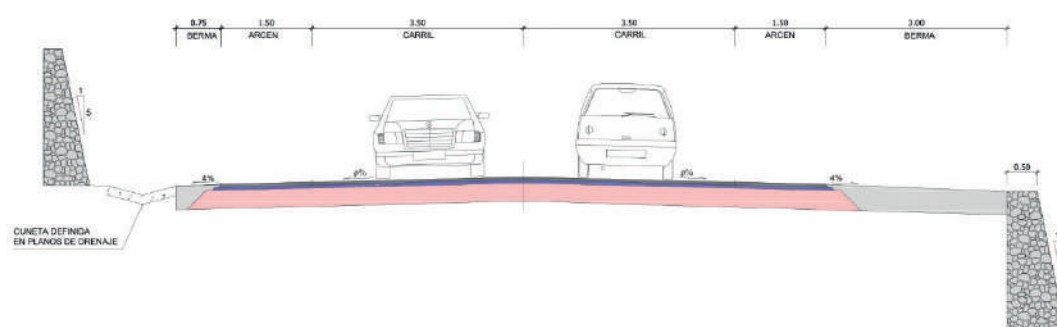


Figura 5. Sección transversal tipo de la carretera

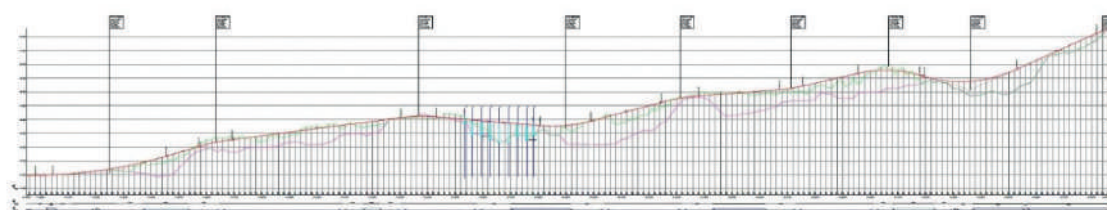


Figura 6. Trazado en alzado

Principales retos afrontados en el diseño y construcción de la carretera

No se conocen mundialmente precedentes en el ámbito de la ingeniería civil acerca de la construcción de carreteras sobre coladas de lava de tan reciente creación y espesor.

Son muchas las incertidumbres asociadas, por ejemplo, a las altas temperaturas en las coladas de lava (tanto en fase de construcción como en fase de servicio y explotación), potenciales problemas geotécnicos derivados de la presencia de tubos lávicos, o a la posible emisión de gases a altas temperaturas. Asimismo, el relieve y la orografía resultantes tras la erupción volcánica dificultan también la propia definición geométrica de una carretera que se pretendía que tuviera los estándares habituales de una obra de la Dirección General de Carreteras.

Desde el inicio del planteamiento de las condiciones de la obra de emergencia se ha perseguido también un diseño altamente sostenible, priorizando el uso de los materiales pétreos procedentes de la erupción para la formación de los terraplenes, fabricación de hormigones y firmes, limitando la alteración de las propias coladas de lava y minimizando las afecciones a los terrenos agrícolas.

Junto con todo ello hay que destacar que estos trabajos se han llevado a cabo bajo una situación de emergencia, en un tiempo realmente reducido, y también en un contexto nacional e internacional de no pocas dificultades en el acceso y suministro de determinados materiales. A esto se añade el reto logístico propio de la insularidad, que ha obligado a una constante reorganización de los trabajos en función de



Figura 7. Orografía resultante de la erupción. Presencia de tubos lávicos.

la disponibilidad real de materiales básicos, medios auxiliares, etc. provenientes de otras islas, la península y el extranjero. Puede afirmarse, sin género de dudas, que la puesta en servicio de la carretera supone un hito relevante en la ingeniería de construcción de carreteras.

Retos y tareas iniciales

De manera inmediata a la declaración de Obra de Emergencia comenzaron los trabajos de definición de la ingeniería de detalle del diseño de la carretera y, en paralelo, se plantearon los trabajos previos de campo.

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.

Investigación geofísica.

Inicialmente la investigación geotécnica se centró en el reconocimiento del terreno realizado mediante el método geofísico del Georadar, para poder identificar (o descartar) la presencia de tubos lávicos u oquedades que pudieran poner en riesgo el posterior desarrollo de los trabajos. La profundidad de investigación alcanzada por las medidas superó los 10 m, con lo cual se cumplió el principal objetivo del estudio, esto es, diferenciar de forma cualitativa entre las masas de basaltos y otros materiales más homogéneos en términos geofísicos tales como escorias. Se detectaron anomalías asociadas a posibles huecos en diversas zonas de la colada, desde una profundidad de 0,5 a 3 m. Estas anomalías estaban asociadas, principalmente, a huecos y tubos lávicos dentro de la denominada colada Hawaiana. También se detectaron otras anomalías puntuales interpretables como probables huecos pero, en su conjunto, ninguno parecía tener importancia relevante ni por sus dimensiones ni por su posible continuidad lateral, como para poner en

riesgo los trabajos de movimiento de tierras (como así se comprobó durante la obra).

Dada la irregularidad de la orografía de las coladas de lava fue necesario construir pistas de acceso en las coladas, ejecutadas con maquinaria ligera, para poder llevar a cabo el propio reconocimiento geofísico en condiciones suficientes de seguridad.

Posteriormente, durante el desarrollo de la obra, se ha llevado 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.

Medición de gases potencialmente tóxicos.

La presencia de gases tóxicos que aún emanan con posterioridad al fin de la erupción es un hecho bien conocido y descrito en este tipo de coladas de lava. Era imperativo llevar a cabo, por tanto, una campaña exhaustiva y continua de medición y control de los valores máximos de concentración de dióxido de carbono, y control de gases inflamables (Oxígeno, Monóxido de Carbono, y Sulfuro de hidrógeno), realizada con medidores tipo G7C EU2.



Figura 8. Trabajos de reconocimiento geotécnico

VALORES MAXIMOS Y MINIMOS					
	INFLAMABLES (EX)	OXIGENO (O2)	MONOXIDO DE CARBONO (CO)	SULFURO DE HIDROGENO (H2S)	DIOXIDO DE CARBONO (CO2)
VALOR MINIMO	10 % LEL	19%	30 ppm	10 ppm	4000
VALOR MAXIMO	30 % LEL	23%	60 ppm	20 ppm	ppm

Figura 9. Límites de concentración de gases tóxicos

Topografía.

Para la elaboración de la cartografía se han utilizado tecnologías LIDAR de última generación, embarcadas en dispositivos UAVs. El ancho de banda realizado para el levantamiento ha sido de 200 m (100 m a cada lado del eje previamente diseñado), lo que supone una área de 240 hectáreas. Como elemento "comparador" de los estados previos a la erupción se ha utilizado la nube de puntos LIDAR oficial proporcionada por el IGN, correspondiente al vuelo realizado en 2017. De esta forma ha sido también posible deducir de forma precisa los espesores de lava resultantes en cada punto de la traza.

Identificación de zonas de alta temperatura.

Se han realizado termografías aéreas para la identificación, chequeo y control de zonas potenciales de altas temperaturas que, posteriormente, se han integrado dentro del modelo cartográfico realizado mediante el sistema LIDAR. Esta campaña permitió detectar diversos puntos de la traza con temperaturas realmente elevadas a cota superficial (superiores a los 300 °C).

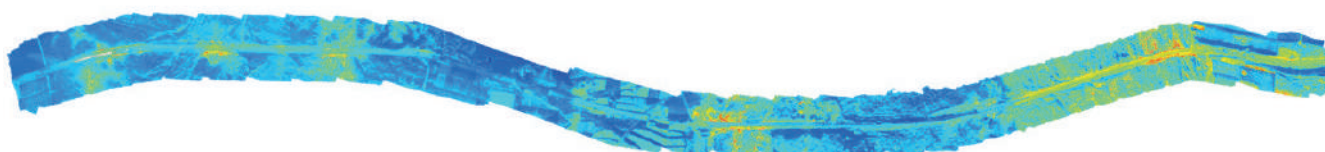


Figura 10. Termografía con vuelo dron

Principales retos durante la construcción

Vigilancia Medioambiental

A pesar de contar la obra de emergencia con un expediente de excepción de trámite ambiental, se ha elaborado un programa de vigilancia ambiental y documento ambiental en obra para integración y minimización impacto.

Los principales vectores analizados y controlados han sido los siguientes: Seguimiento zonas sensibles, Seguimiento de las ocupaciones territoriales, Seguimiento de la gestión de tierras y préstamos, Seguimiento de la vegetación y Especies Exóticas Invasoras, Seguimiento de Fauna, Seguimiento de la calidad del ambiente atmosférico, Patrimonio cultural, Seguimiento de la calidad de las aguas superficiales, Seguimiento del ruido, Gestión de residuos y, finalmente, Restauración e integración paisajística.

Movimiento de tierras. Excavabilidad en lava a altas temperaturas.

Ha sido necesario movilizar un total de 107.000 m³ de desmonte en roca, de los que más de 100.000 m³ han correspondido a desmonte en lava, a altas temperaturas. El volumen de terraplén ha ascendido hasta los 253.000 m³, en parte como producto del propio material volcánica derivado de la erupción.

Las labores de desmonte en zona de lava han significado un reto desde el punto de vista productivo y logístico, toda vez que las altas temperaturas de la roca imposibilitaban un desarrollo normal de los trabajos, llevando en ocasiones hasta la incandescencia los martillos hidráulicos y cazos de las retroexcavadoras.

Principio de mínima afección.

El diseño y construcción de la carretera se ha realizado con una especial sensibilidad en el tratamiento tanto de los terrenos no afectados por la colada de lava

como también de la propia colada.

En la mayor parte del trazado que discurre sobre terrenos no afectados por la lava se han construido muros eslingados de escollera hormigonada (una tipología muy común en la isla), lo que ha permitido reducir la superficie ocupada con respecto a las previsiones iniciales, y con un volumen construido de muros de 16.000 m³. Asimismo, como ya se ha citado anteriormente, en la zona entre la Colada Intermedia y la Colada Sur se ha construido un viaducto de 243 m de longitud (que no estaba previsto en las primeras definiciones del corredor), precisamente para disminuir la afección a las fincas y facilitar la permeabilidad transversal de la carretera.

En cuanto al trazado dentro de la colada de lava también se han pretendido preservar en la medida de lo posible los valores ambientales de la colada, con una rasante ajustada a la morfología resultante de la erupción volcánica y mínima afección lateral.

Maquinaria e instalaciones auxiliares

La maquinaria empleada en la obra para el desarrollo de los diferentes trabajos ha sido la siguiente: 14 retroexcavadoras de diferente capacidad, 22 camiones, 2 dumpers de gran tonelaje, 6 palas cargadoras, 3 grúas de gran tonelaje, 3 grúas sobre camión, 3 machacadoras tipo Terex Pegson L106, 3 molinos de cono tipo Metso L106 y 1 criba tipo Metso ST4.8.

Ha supuesto también un reto la fabricación del hormigón (en particular para el tablero de hormigón pretensado del viaducto), para el que se ha instalado en obra una planta de hormigonado propia con central dosificadora por pesos con capacidad de 80 m³/h.



Figura 11. Trabajos de excavación en lava

También se ha instalado en obra en la fase final de construcción en una planta asfáltica discontinua de tipo modular y capacidad de producción de 120 t/h, con la que se han fabricado las mezclas asfálticas.

Viaducto Cumbre Vieja

Tal como ya se ha expuesto, se adoptó la decisión de diseñar y construir un viaducto entre los PK 2+537 y PK 2+780, favoreciendo la permeabilidad transversal y minimizando la afección a esta zona agrícola no afectada directamente por la colada de lava.

El viaducto tiene una longitud total de 243 m. 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 .

La plataforma del tablero es de 10,0 m, y dispone de aceras a ambos lados de 2,0 m, siendo, por tanto, 14,0 m la anchura total del tablero.

El tablero es una sección tipo losa aligerada de hormigón pretensado hormigonado in situ. El núcleo de la sección es de 6,0 m de ancho, con voladizos laterales de 4,0 m. El canto de la sección en la zona del núcleo es de 1,20 m.



Figura 12. Planta asfáltica discontinua de tipo modular



Figura 13. Vista general del viaducto

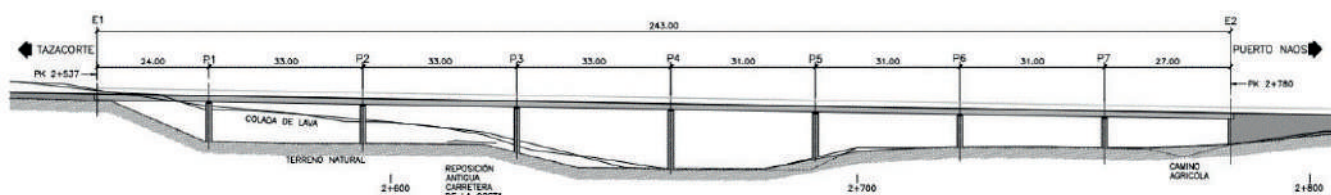


Figura 14. Alzado y distribución de vanos

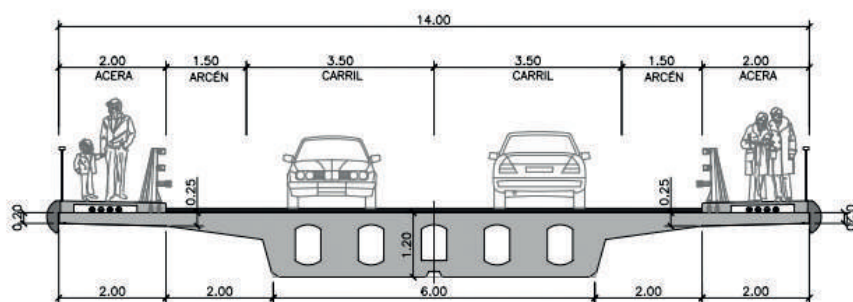


Figura 15. Sección transversal tipo del tablero

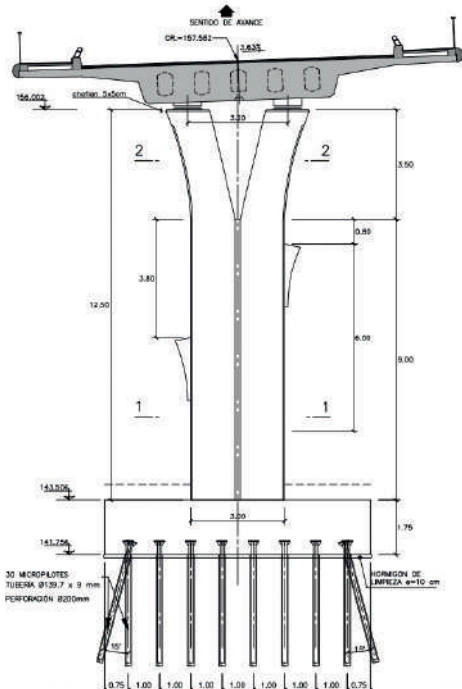


Figura 16. Alzado por pila

Las pilas, de entre 6,0 y 13,0 m de altura, son de hormigón armado, con un 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 cimentación de las pilas se resuelve con cimentación profunda mediante micropilotes, excepto para la pila 1, que se resuelve mediante cimentación directa. Los micropilotes tienen un diámetro de perforación de 200 mm, con armadura de tubular de 139.7 mm de diámetro y 9 mm de espesor.

Los estribos son cerrados, con aletas en vuelta. La cimentación del estribo 1 se resuelve mediante cimentación directa, mientras que la cimentación del estribo 2 se resuelve mediante cimentación profunda con micropilotes.

De nuevo el diseño y construcción del viaducto en un plazo tan reducido ha supuesto un reto significativo. 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 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 la 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 trabajos de ejecución de los micropilotes comenzaron en octubre de 2023, hormigonándose el primer encepado el 29 de diciembre de 2023.

La construcción del viaducto se realizó mediante cimbra porticada, construyéndose vano a vano,



Figura 16. Fases de construcción del viaducto

en diferentes etapas constructivas. El hormigonado de la primera fase fue el 9 de febrero de 2023, concluyéndose la última fase el 24 de abril de 2023 (las fases centrales se construyeron a ritmo de 10 días por fase).

Diseño y construcción de firmes

La configuración del paquete de firme a disponer sobre la coronación de la explanada, así como

las propias características de la coronación de la explanada, debían adecuarse a las particulares y excepcionales condiciones que representan el hecho de proyectar y construir la carretera sobre lava de reciente creación. El notable espesor de lava en algunas secciones, y la presencia de canales lávicos a profundidad no completamente inactivos, hace que, en efecto, haya zonas en las que la lava aún mantiene una alta temperatura superficial, que puede llegar a ser superior

a los 80 – 100 °C en determinadas secciones.

Dada la escasa o nula experiencia en el comportamiento de paquetes de firme en estas condiciones (condiciones que también escapan a cualquier marco normativo), se decidió construir un área de pruebas y ensayos, adyacente a la traza de la carretera, entre los PK 3+500 y 3+640 (por ser una de las zonas aún con altas temperaturas superficiales de la lava). En este



Figura 17. Vista aérea del tramo de pruebas



Figura 18. Termopares en el tramo de pruebas

tramo de pruebas se ha estudiado el comportamiento a lo largo del tiempo de las distintas configuraciones de coronación de explanada y paquete de firme que se plantearon. A tal fin se han dispuesto termopares en las distintas interfaces entre capas de explanada y firme para poder llevar a cabo un seguimiento monitorizado en tiempo real de la evolución de las temperaturas a través de dichas capas. Esta zona de pruebas y ensayos también ha permitido investigar las condiciones de puesta en obra de las diferentes alternativas de coronación de explanada y paquete de firme, y su comportamiento frente a cargas de tráfico pesado.

Con respecto a la coronación de explanada, en base a los ensayos de laboratorio previos realizados se ha determinado que la solución más eficaz ante la existencia de una difusión activa del calor consiste en la ejecución de una mezcla de cemento de aluminato de calcio y zahorra artificial fabricada con el mismo material pétreo procedente de la erupción volcánica.

Con respecto al paquete de firme en base al tráfico de vehículos pesados estimado al inicio de la obra, los ensayos de laboratorio previos realizados se ha determinado que la solución más eficaz ante la existencia de una difusión activa del calor consiste en la ejecución de un paquete de firmes con veinticinco centímetros de zahorra artificial y una mezcla base de grava tratada con ligante (BGL) que haga la función drenante y disipadora del calor sobre la se coloca una mezcla SMA 16 (Stone Mastic Asphalt) y una SMA 11 en rodadura. Dichas mezclas bituminosas se han fabricado utilizando betún 35/50 al que se le adicionan polímeros específicamente desarrollados para incrementar la rigidez de la mezcla.

Conclusiones

La puesta en servicio de la carretera de conexión LP-213 – LP-215 en la Isla de La Palma, que discurre en su mayor parte sobre la lava expulsada por la erupción volcánica acaecida entre septiembre y diciembre de 2021, ha supuesto un reto sin precedentes en el diseño y construcción de infraestructuras.

A las severas condiciones que impone el trabajo sobre las coladas de lava de muy reciente formación (altísimas temperaturas en superficie, presencia de gases tóxicos, orografía irregular, presencia de tubos lávicos...) se une el hecho de que los trabajos se han llevado a cabo bajo una situación de emergencia, en un tiempo realmente reducido (14 meses desde el acceso a las coladas de lava), y también en un contexto nacional e internacional de no pocas dificultades en el acceso y suministro de determinados materiales (a lo que se añade el reto logístico propio de la insularidad).

Se ha llevado a cabo un diseño altamente sostenible, priorizando el uso de los materiales pétreos procedentes de la erupción para la formación de los terraplenes, fabricación de hormigones y firmes, limitando la alteración de las propias coladas de lava y minimizando las afecciones a los terrenos agrícolas. Especial mención merece el diseño del firme de la carretera, sometido a unas condiciones térmicas del todo inusuales. Se han ensayado diferentes configuraciones de materiales y composición de capas, buscando las configuraciones óptimas que pudieran satisfacer los objetivos de difusión térmica, aislamiento y capacidad estructural. ❖