



La revista de los
Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos

3624 OCTUBRE 2020

REVISTA DE
OBRAS PÚBLICAS

ROP



MONOGRÁFICO

Túneles y obras subterráneas

Número realizado en colaboración con AETOS



SUMARIO

- 50 **WESTCONNEX STAGE 2 EN SÍDNEY. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MEGAPROYECTO URBANO CON 20 ROZADORAS**
JAVIER VARELA GORGOJO
ALEJANDRO SANZ GARROTE
PAZ NAVARRO GANCEDO-RODRÍGUEZ
- 58 **PLAN DE MANTENIMIENTO ESTRUCTURAL DE TÚNELES URBANOS. TÚNELES DE LA M-30**
TOMÁS RIPA ALONSO
NOEMÍ CORRAL MORALEDA
CRISTINA HEREDIA IBÁÑEZ
SONIA SUÁREZ MORENO
SERGIO BARRAL GARCÍA
- 65 **EMISARIO SUBMARINO EJECUTADO MEDIANTE LA HINCA DE TUBERÍA PARA LA UBICACIÓN DE GASEODUCTO (ALTAMIRA, MÉXICO)**
HÉCTOR TRIGAL BÁRCENA
MARCOS PRIETO PAINCEIRA
- 74 **BREVE REPASO DEL ESTADO DE LA TECNOLOGÍA DEL PIPE JACKING. LECCIONES APRENDIDAS SOBRE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN PARA MICROTUNELADORAS HIDROESCUDOS EN TERRENOS ADVERSOS**
JUAN JOSÉ HOYO RODRÍGUEZ
- 82 **DISEÑO Y PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS EN UN TÚNEL SUBTERRÁNEO EN SUELOS GRANULARES. EL METRO DE WASHINGTON D.C.**
MONTSERRAT RODRÍGUEZ SEGURADO
- 92 **USO DE LODOS BENTONÍTICOS (SLURRY) EN TÚNELES CONSTRUIDOS CON TUNELADORAS TIPO HIDROESCUDO. PRINCIPALES INDICADORES DE RENDIMIENTO (KPI) Y CONTROL DE CALIDAD DE LOS MISMOS**
MANUEL VILLAMIL MILLÁN
- 104 **TÚNEL DE GUDAURI. INFLUENCIA DE LA GEOTECNIA Y DE LAS SOLUCIONES VENTILACIÓN EN EL TRAZADO Y EN EL DISEÑO DEL TÚNEL**
IGNACIO BALSA MARÍN
JAVIER BORJA LÓPEZ
MANUEL CUETO CASO
MIGUEL ÁNGEL FRÍAS
FRANCISCO PERAL ÁLVARO
JESÚS SANCHO CEBRIÁN

Túnel de Gudauri

Influencia de la geotecnia y de las soluciones ventilación en el trazado y en el diseño del túnel

IGNACIO
Balsa
Marín

JAVIER
Borja
López

MANUEL
Cueto Caso

MIGUEL ÁNGEL
Frías

FRANCISCO
Peral
Álvaro

JESÚS
Sancho
Cebrián

IDOM Consulting, Engineering,
Architecture

RESUMEN

El proyecto realizado íntegramente por IDOM consiste en el estudio de Factibilidad de un corredor de 110 km de carretera con una parte de mejora de carretera existente y un tramo central de nuevo trazado que se desarrollaba a nivel constructivo, cuyas principales características son: varios falsos túneles para protección de aludes; tres túneles en mina (dos en NATM de grandes dimensiones y uno con TBM de 9 km de longitud y 1100 m de recubrimiento sobre clave); siendo este último el más singular del proyecto. El tramo constaba además de 6 viaductos nuevos incluyendo uno en arco de 400 m de longitud y un puente de 14 vanos. Este proyecto presentó las siguientes singularidades de interés:

- La influencia de la geotecnia en las alternativas de trazado en una zona de alta montaña, con sismicidad y volcanismo reciente
- La influencia de la geotecnia, condicionantes de campaña y plazo de obra sobre el trazado del túnel y sobre las soluciones de evacuación y ventilación.
- Solución adoptada para la ventilación y su influencia en la sección tipo de túnel.

PALABRAS CLAVE

Túnel de Gudauri, TBM, NATM, Condicionantes geotécnicos, Sistema ventilación semi-trasversal

ABSTRACT

This project links Russia and Georgia through an economical and touristic area. It includes 3 mined tunnels; two with NATM method and one with a TBM which length will be around 9 km. This project includes also 6 viaducts, one of them with a 400 m arch bridge and another viaduct of 14 spans. The main characteristics of the project are:

- *Influence of geotechnics on alignment design in a mountainous area, with seismic and recent volcanos.*
- *Influence of geotechnics; constrains for field investigations and planning for the whole project on the final alignment and solutions selected for emergency evacuation and tunnel ventilation.*
- *Solution adopted for tunnel ventilation and its influence and matching in tunnel cross section.*

KEYWORDS

Gudauri Tunnel, TBM, NATM, Geotechnical challenges, Semi-trasversal tunnel ventilation system

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El corredor viario Jinali-Larsi (110 km, incluyendo en el alcance del proyecto a nivel de "Feasibility" tres secciones, Sección 1, 2 y 3) representa la principal infraestructura de conexión entre Georgia y Rusia. El principal objetivo del proyecto es mejorar la infraestructura a lo largo del corredor, estableciendo continuidad operacional entre Asia Central, el Este asiático, Rusia, Turquía y Europa.

El sector Kvesheti-Kobi (Sección 2) discurre a lo largo de un corredor existente (34 km) caracterizado por su dificultad geográfica y los cortes frecuentes durante el invierno debido a la orografía y a las difíciles condiciones meteorológicas (fig. 1). El tramo de carretera convencional tiene una intensidad de tráfico diaria de 3.000-4.000 vehículos de los que el 30 % son vehículos pesados. Además, los radios de curvatura existentes impiden el tráfico de los camiones de mayores dimensiones. Estas limitaciones y discontinuidades en la explotación de la carretera constituyen una gran problemática frente a la creciente demanda de transporte en el corredor norte-sur y a su vez están perjudicando el potencial desarrollo turístico del área Norte (Gudauri ski resort, Kazbegi National Park...). Como consecuencia, existía una fuerte voluntad política para diseñar y acometer esta obra en los menores plazos (de estudio y de obra) posibles.

Este proyecto tenía por objetivo realizar el estudio de detalle (cumpliendo con normativa EU para una velocidad de diseño 80 km/h) de la alternativa más eficiente desde el punto de vista ingenieril, medioambiental, social y económico. La opción seleccionada dispone el nuevo túnel de Gudauri (9 km) con 1.100 m de recubrimiento sobre eje, el más largo de Georgia y entre los 15 túneles más largos de Europa. La sección 2 (Kvesheti-Kobi) incluye la carretera de acceso al túnel donde destacan 2 túneles NATM de gran-



Fig. 1_ Problemática carretera actual

des dimensiones (1,5 km + 0,4 km) y un puente arco de 426 m de longitud (fig. 2) Además de incrementar la seguridad y garantizar una operabilidad continua, se disminuye el tiempo de recorrido a menos de la mitad del actual.

La sección del túnel de Gudauri tiene 172 m² de área de excavación y 14,4 m de diámetro exterior. Después del estudio detallado de las condiciones geológico-geotécnicas, se propone una tuneladora de escudo sim-



Fig. 2_ Variante de nuevo trazado en la Sección 2 (Kvesheti-Kobi) incluyendo el nuevo Túnel de Gudauri (9 km) con 1100 m de recubrimiento sobre eje

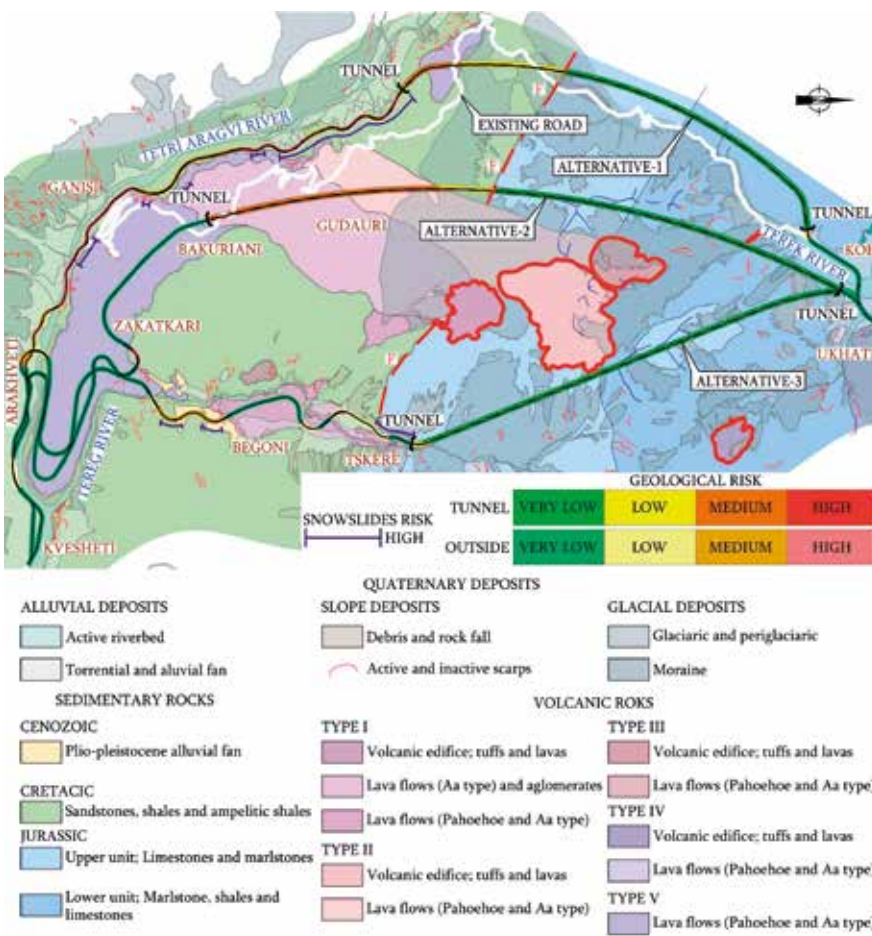


Fig. 3_ Alternativas de trazado sobre condicionantes geológico-geotécnicos

ple con un diámetro de 15 m. El túnel incluye una galería de emergencia paralela vehicular a construir mediante NATM para el cumplimiento de la Directiva Europea de Seguridad, así como entronques entre ambos tubos cada 500 m.

ESTUDIO DE ALTERNATIVAS

En la etapa de Pre-Factibilidad se identificó el Paso de Jvari como el principal cuello de botella para la Sección 2, siendo por lo tanto el principal condicionante. Como punto de partida se analizó la posibilidad de mejora del llamado camino militar actual (pavimento, barreras, galerías, refuerzo taludes y mejora de algunas curvas). Sin embargo, incluso con estas mejoras, la funcionalidad general, seguridad y resiliencia no cumplirían los Estándares Europeos, considerando el aumento de tráfico previsto. Los condicionantes geológicos determinaron el paso a través de un túnel largo y profundo; las dificultades geológicas y orográficas elevaron a casi 40 las variantes de trazado estudiado para encajar los accesos al túnel.

Durante la fase de Factibilidad se llevó a cabo un estudio de alternativas, con análisis detallado de tres corredores distintos (fig. 3): Aragvi River (Alt-1. 60 km/h), Gudauri (Alt-2. 60 km/h) y Khada Valley (Alt-3. 80 km/h). En el estudio, se han tenido en cuenta los siguientes factores:

- (i) Orografía (zona de alta montaña)
- (ii) Complejo contexto geológico con actividad volcánica reciente (hidrotermalismo)
- (iii) Riesgos naturales: flujos, deslizamientos, avalanchas de nieve, etc.
- (iv) El impacto en los núcleos de población y el patrimonio cultural.
- (v) Proximidad al Parque Nacional de Kazbegi y sus zonas de protección medioambiental.

Como conclusión, el estudio de la problemática geotécnica, de la longitud y complejidad de los túneles en cada caso, del coste de ejecución del proyecto y operabilidad de la carretera, permitió identificar y desarrollar la Alternativa 3 a través del valle de Khada como la más eficiente. Una vez seleccionando el Corredor 3 (Alt-3), nuevas alternativas de trazado fueron analizadas para este corredor en el Valle de Khada, determinando finalmente el Proyecto de Detalle de una nueva carretera con 22.6 km de longitud.

CAMPAÑA DE CAMPO Y ESTUDIO DE TRAZADO Y TIPOLOGÍA DE TÚNEL

La compleja orografía (Paso de Jvari a 2.400 m de altitud) y meteorología (trabajos de campo en zona de alta montaña) condicionaron la realización de la campaña geotécnica (fig. 4). Por las razones indicadas inicialmente, se disponía de únicamente una ventana de primavera y verano para realizar el encaje de trazado y la campaña de campo. De esta forma se llevó a cabo una investigación geológico-geotécnica multi-técnica contando con dos empresas españolas y 3 empresas locales (50 técnicos involucrados). Únicamente eran accesibles las zonas de ambos emboquilles durante las ventanas de buen tiempo en periodo estival, por lo que fue necesario llevar a cabo accesos con maquinaria pesada, recurriendo en la parte central del túnel de mayor montera, a geofísica, llevando a cabo tomografía eléctrica profunda a lo largo de 3600 m y alcanzando una profundidad de investigación de 400 m con alta resolución. También se contó con la colaboración del grupo de Geología Aplicada a la Ingeniería de la Universidad de Oviedo para el estudio geológico del túnel de Gudauri y cartografía de campo del túnel.

Además, los estrictos plazos de obra (4 años), impuestos por las restricciones políticas y la viabilidad de crédito internacional, condicionaron el tiempo

disponible para la redacción del proyecto, la preparación de documentos para licitación "Tender" y asesoramiento al cliente durante el proceso de cualificación.

El propio trazado para acceder a la parte de túnel principal contó con varias zonas de difícil encaje, como fue salvar el desnivel entre la carretera actual y el valle elegido para el nuevo trazado. Esto conllevó la materialización de un trazado que arranca con un "loop" (ver Fig. 2) para acceder mediante sucesión de viaducto-túnel hasta un "plateau" volcánico que era una de las pocas zonas geotécnicamente favorables y viables para encajar pendientes inferiores al 6 %. Se descartó acceder por la ladera sur al estar ésta compuesta por unas pizarras negras alteradas y con buzamiento desfavorable por lo que era de prever problemas severos de estabilidad de ladera en una zona donde la realización del posible camino de acceso para el sondeo ya era un desafío geotécnico. La carretera cruza a la margen izquierda del Khada Valley sorteando las áreas de mayor riesgo geológico y disponiendo

de estructuras de protección frente a las avalanchas de nieve.

Como desafío del proyecto es destacable el proceso iterativo de mejora de trazado a medida que se avanzaba con el desarrollo de las investigaciones geotécnicas hasta la fase de Diseño de Detalle, asegurando en todas las fases del estudio la seguridad y optimización de la obra. A la par se estuvo negociando con el cliente el propio trazado en función de sus intereses estratégicos (por ejemplo el acceso a la estación de esquí) y los condicionantes de accesibilidad en fase constructiva.

El diseño del propio túnel siguió un proceso muy similar. Uno de los principales condicionantes era el plazo de obra, lo que implicaba el uso de máquina(s) tuneladora(s). Sin embargo, en el emboquille sur donde existía una obra importante que realizar para acceder al emboquille se perdía esa ventaja de plazos por el tiempo necesario para poner en marcha la TBM en dicho emboquille y poder iniciar las excavaciones.



Fig. 4_ Trabajos de campo en el Túnel de Gudauri. Izquierda: perforación de sondeo en emboquille Sur (Tskere). Derecha: trabajos de adquisición de tomografía eléctrica profunda

El emboquille norte (Kobi, ver fig 2) estaba fijado en una de las pocas zonas asequibles del trazado con una gran plataforma próxima a la carretera existente, teniendo así accesos para materiales (excepto en ciertos periodos invernales en los que la carretera estaría previsiblemente cortada).

A nivel de Prefactibilidad se estudiaron muchas alternativas de tipologías de túnel, tanto monotubo o bitubo (se trata de una carretera convencional con un carril por sentido y, en el tramo de túnel principal, un carril lento en el sentido de subida). Se valoró presupuesto y plazo para realizar:

a) Túnel monotubo con 1 TBM desde la boca norte y galería NATM paralela desde ambas bocas

b) Idem (a) pero con una tuneladora desde ambas bocas

c) Túnel bitubo de menores dimensiones con 1 TBM por tubo

d) Túnel monotubo con NATM desde ambas bocas y ataque intermedio

o Desde el valle adyacente

o Utilizando la propia galería de evacuación que se realizaría con mayores rendimientos

e) Idem (d) con túnel bitubo y con o sin ataque intermedio desde el valle adyacente.

Las alternativas que consideraban túnel bitubo tenían la desventaja de ser globalmente más costosas. Los ataques intermedios que no fuesen desde la propia galería de evacuación intermedia eran de por sí un proyecto como tal y la magnitud de la obra restaba casi cualquier ventaja a nivel de cronograma. Dentro de las soluciones monotubos, la utilización de dos TBM aportaba pocas ventajas por el tiempo necesario para emplazar la máquina en el emboquille sur (que podía que-

dar parcialmente aislado en invierno) y la necesidad de abandonar una TBM o de realizar una caverna de desmontaje a gran profundidad. La solución más viable, dentro de los condicionantes mencionados, era la de un túnel monotubo con una única TBM desde el emboquille Norte (de fácil acceso y con espacio para acopios en caso de que se quedase cortada la carretera por el paso de Gudauri) y una galería de evacuación paralela con NATM desde ambas bocas.

Como se comentó anteriormente, debido a la orografía, los condicionantes climáticos y los plazos de estudios no fue posible disponer de sondeos en la parte central del túnel que fue estudiada por medios indirectos de geofísica profunda. Debido a las limitaciones anteriormente justificadas para la investigación geotécnica de la zona central del túnel, así como la complejidad geológica existente, discurriendo el túnel en unidades de calizas y margas Jurásicas próximas a conos volcánicos más recientes, se diseñó el proyecto sobre la base de la construcción de la galería peatonal de emergencia (NATM) en avance, para realizar un drenaje puntual del túnel principal antes de su excavación, evaluar el conjunto de riesgos y establecer medidas de actuación respecto a la ejecución del túnel principal.

Así pues, todo el cronograma y encaje global de la obra se fue realizando con esas premisas.

VENTILACIÓN DEL TÚNEL

Las características del túnel de Gudauri hicieron que la ventilación adquiriese protagonismo en el desarrollo del diseño, principalmente en su interfaz con la obra civil. Uno de los aspectos que hubo que solucionar fue ajustar el sistema de ventilación a la sección tipo del túnel monotubo, que ya venía marcada por el número de carriles y la anchura de la calzada. Sin embargo, las necesidades de ventilación eran

un condicionante principal, que podía llegar a determinar la sección de la TBM.

El sistema de ventilación más habitual en túneles de carretera es el longitudinal, el cual permite generar una corriente de aire entre sus bocas, en uno u otro sentido. Por lo general, este sistema suele estar basado en la utilización de ventiladores de chorro instalados en la clave de la sección o cerca de sus hastiales. Sin embargo, no es una opción aconsejable en túneles bidireccionales de gran longitud e intensidad de tráfico como Gudauri. Pueden destacarse dos razones:

- En caso de incendio, al existir tráfico bidireccional, podemos encontrarnos con usuarios atrapados a ambos lados del incidente. En estas situaciones, una ventilación longitudinal no puede extraer los humos hacia ninguna de las dos bocas sin afectar a un grupo de usuarios.

- Al preverse una intensidad de tráfico elevada, la dilución de la contaminación mediante un flujo longitudinal requeriría alcanzar velocidades muy altas del aire a lo largo de todo el túnel. Además, con más de 9 km, un sistema longitudinal presentaría una respuesta poco eficiente ante cambios en las emisiones de contaminantes o ante cambios en las condiciones de tiro natural o efecto pistón.

Siguiendo las recomendaciones de los principales organismos en la materia, como el Centre d'Études des Tunnels (CETU) o la Asociación Mundial de la Carretera (AIPCR), se optó por un sistema de ventilación semi-transversal, con control longitudinal mediante ventiladores de chorro. Este tipo de ventilación permite insuflar aire fresco a lo largo del túnel en funcionamiento normal, diluyendo las emisiones de los vehículos localmente. En caso de incendio, el sistema permite extraer los humos en las cercanías del foco, favoreciendo la estratificación y reduciendo

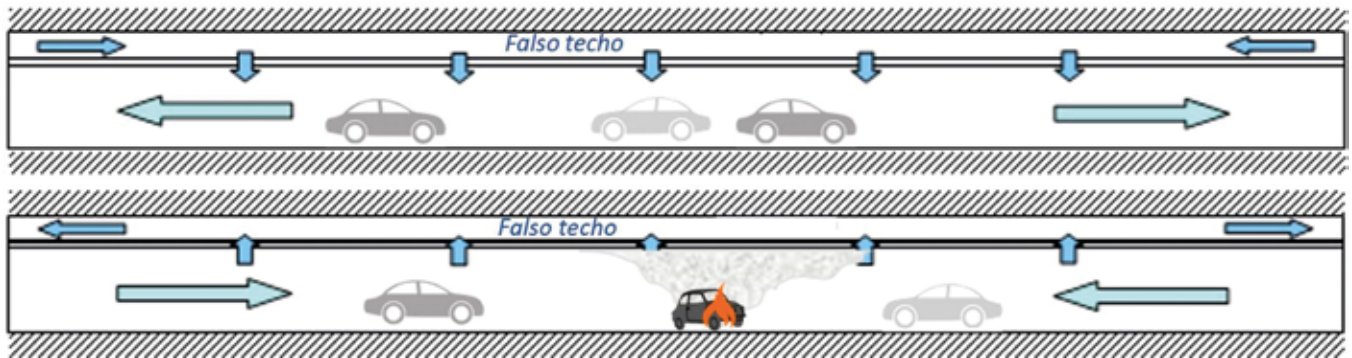


Fig. 5_ Esquema del funcionamiento de una ventilación semi-transversal (arriba) en operación normal del túnel; (abajo) en caso de incendio

su expansión longitudinal.

Estos sistemas requieren la utilización de un falso techo que genere un espacio en la parte superior de la sección por el que pueda circular el aire. La longitud del túnel de Gudauri, sin embargo, necesitaría áreas de conducción muy grandes para que las pérdidas de carga no fuesen excesivas, incluso si se divide el túnel en dos grandes cantones, con una estación de ventilación en cada boca.

Una solución habitual para este problema es construir pozos de ventilación intermedios que permitan dividir el túnel en más cantones de ventilación. De esta manera, el caudal se divide también y la longitud de los circuitos se reducen. Sin embargo, esta solución hubiera implicado realizar un "raise boring" para llevar aire fresco a la parte central del túnel y así reducir la necesidad de sección de ventilación, pero (ver fig. 2) desde la estación de esquí hasta la traza del túnel había un trayecto de más de 5 km (en condiciones invernales) y luego el "raise boring" hubiese tenido una longitud de más de 700 m. Esas condiciones se consideraban inviables con los condicionantes climáticos y de cronograma de la obra. Como se mencionó anteriormente tampoco era factible un ataque intermedio.

Ante la imposibilidad de usar pozos

intermedios, se estudió la opción de utilizar una conducción paralela al túnel que permita llevar o extraer aire desde las bocas hasta la zona central del túnel. Esta suerte de "pozo horizontal" podría realizarse tanto con una galería paralela (ya planteada para la evacuación), como con el uso de otras partes de la sección.

Se estudió la solución de aumentar el tamaño la galería, pero las secciones necesarias la convertían en un túnel como tal, por lo que se optó por encajar este "pozo" horizontal en la sección TBM principal.

En ese sentido, hay que subrayar que la anchura necesaria para los carriles y los elementos de señalización (paneles de señalización) definían, por sí mismos, un diámetro mínimo de tuneladora. Teniendo en cuenta el coste de incrementar este diámetro, la ventilación debía intentar ajustarse a esta sección. Tras analizar en detalle diferentes ajustes y opciones de la sección, se planteó una solución de ventilación basada en cuatro cantones en la que el aire se conducía de forma directa desde las estaciones de ventilación ubicadas en las bocas del túnel a los dos cantones extremos y, por debajo de la calzada, a los cantones interiores. La siguiente figura muestra de forma esquemática la conexión de los cantones.

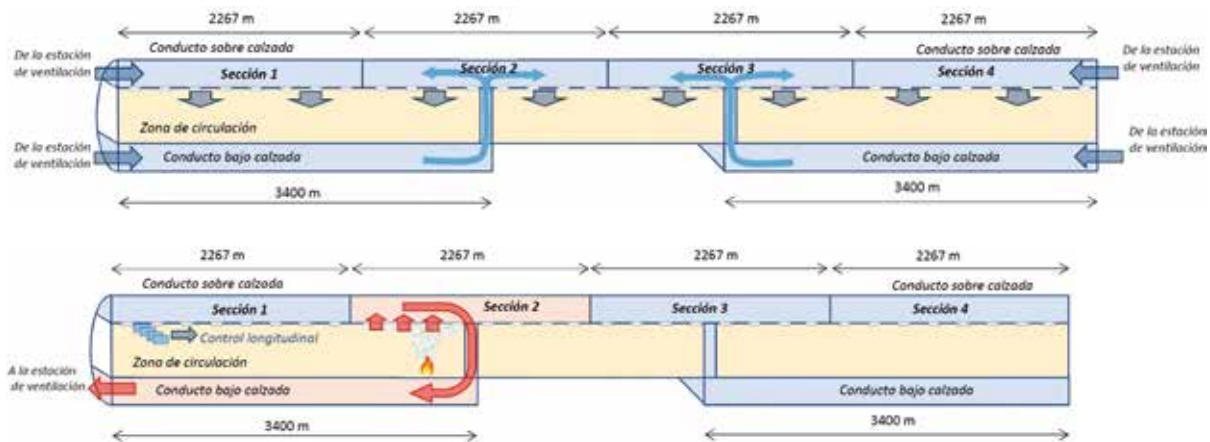


Fig. 6_ Distribución de cantones de ventilación y (arriba) operación normal y (abajo) en caso de incendio

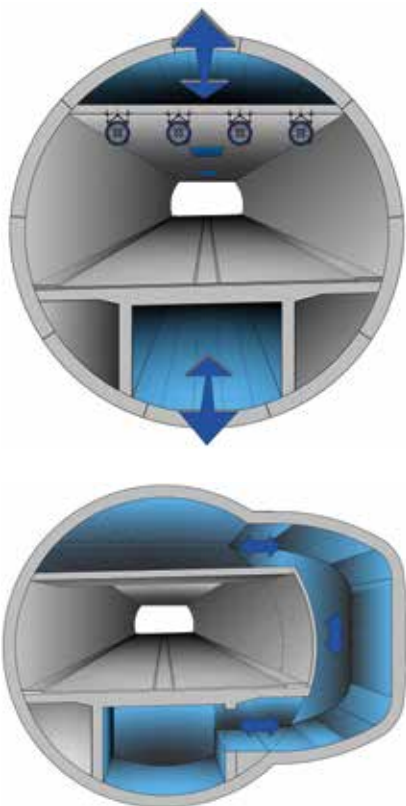


Fig. 7_ Vista en sección de los conductos de ventilación (arriba) y zonas de conexión entre conductos (abajo)

En este diseño, la longitud de los cantones no era demasiado elevada, conteniendo por tanto las pérdidas de carga y filtraciones; y se utilizaba el espacio bajo la calzada para llegar a las zonas centrales del túnel. Con un área aproximada de 21 m², esta zona permitía alcanzar los cantones centrales con una pérdida de carga ajustada y sin filtraciones.

Sin embargo, requería de conexiones entre el conducto inferior y el superior. Aunque el diseño de cuatro cantones reducía estos puntos a dos, estas zonas singulares se tuvieron que estudiar en detalle desde el punto de vista estructural.

Finalmente, cabe destacar que la conexión entre las salas de ventilación –situadas en las bocas– y estos circuitos se realizó minimizando en todo lo posible el número de codos o estrechamientos. Las propias salas presentan un diseño sencillo desde el punto de vista aerodinámico y están pensadas para facilitar el montaje y mantenimiento de estos grandes equipos.

CONCLUSIONES

El proyecto de carretera de Jinvali a Larsi en su tramo de nueva construcción ha sido un reto a nivel técnico al requerir obras singulares como un túnel 9 km con más de 1000 m de recubrimiento o un puente arco de 400 m de longitud para una carretera convencional debido a la accidentada orografía de la zona. Los propios condicionantes climatológicos, plazos para realizar el estudio (en particular la campaña geotécnica de campo) y el encaje del cronograma global de estudios y obra han hecho que los ajustes de trazado hayan ido en paralelo con la realización de la campaña, intentando adaptar el trazado a las soluciones geotécnicas más viables. Los distintos condicionantes geotécnicos han hecho más necesario que nunca, un estudio detallado de alternativas de tipologías de túneles y de optimización de espacio dentro del túnel para el sistema de ventilación. @