

LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL DE LO SALDES EN SANTIAGO DE CHILE

UN IMPORTANTE DESAFÍO, UN GRAN TÚNEL CON UNA COBERTERA EXTREMADAMENTE REDUCIDA

Se describe la construcción del importante túnel de Lo Saldes en Santiago de Chile. El túnel (para 3 carriles de 3,5 m) se desarrolla bajo la calle Kennedy, siendo de destacar la extremadamente pequeña cobertura (entre 4,7 m 1,6 m), lo que condiciona tanto la sección tipo como el procedimiento constructivo.

JUAN KUSTER
ROSANNA NÚÑEZ

Costanera Norte

ERIK CHÁVEZ
JOSÉ MIGUEL GALERA
DANIEL SANTOS

Subterra Ingeniería

INTRODUCCIÓN

Costanera Norte es la concesionaria de autopistas urbanas más grande de Santiago de Chile. El trazado de sus viales concesionados conecta el Oeste de la ciudad, incluyendo el aeropuerto y la autopista Panamericana, con el Este de la misma. Inaugurada en 2005, esta autopista tiene un total de 42.7 km divididos en dos ejes principales: Costanera (35.3 km) y Kennedy (7.4 km). La longitud actual en túnel es de unos 7.0 km.

Este artículo se centra en los trabajos de construcción del eje Kennedy, ubicado en el centro financiero de la ciudad. La concesionaria abordó la construcción para el MOP (Ministerio de Obras Públicas) de la segunda fase del programa "Santiago Centro-Oriente", cuyo fin es potenciar la conectividad este-oeste de la ciudad. Este programa incluye, entre otras actuaciones, la mejora

de las conexiones entre los dos ejes principales existentes y la construcción de tres nuevos túneles, uno de los cuales es el "Túnel Lo Saldes". Este túnel constará de una calzada de tres carriles, una longitud de 65 m y una sección de excavación de 14.0 x 7.2 m.

El presupuesto total de la construcción de esta segunda fase es del orden de 500 MUSD y ha sido ejecutado por Sacyr Chile y Gesvial, empresa del Grupo Costanera. Los trabajos de construcción comenzaron en 2014 y terminaron el pasado mes de noviembre de 2017.

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El túnel Lo Saldes se ubica en el Noreste de Santiago de Chile, cerca del centro financiero de la ciudad. Como se ha comentado este túnel mejora considerablemente la conexión entre el eje Kennedy y el eje Costanera. En la Figura 1 se muestra la localización del túnel.

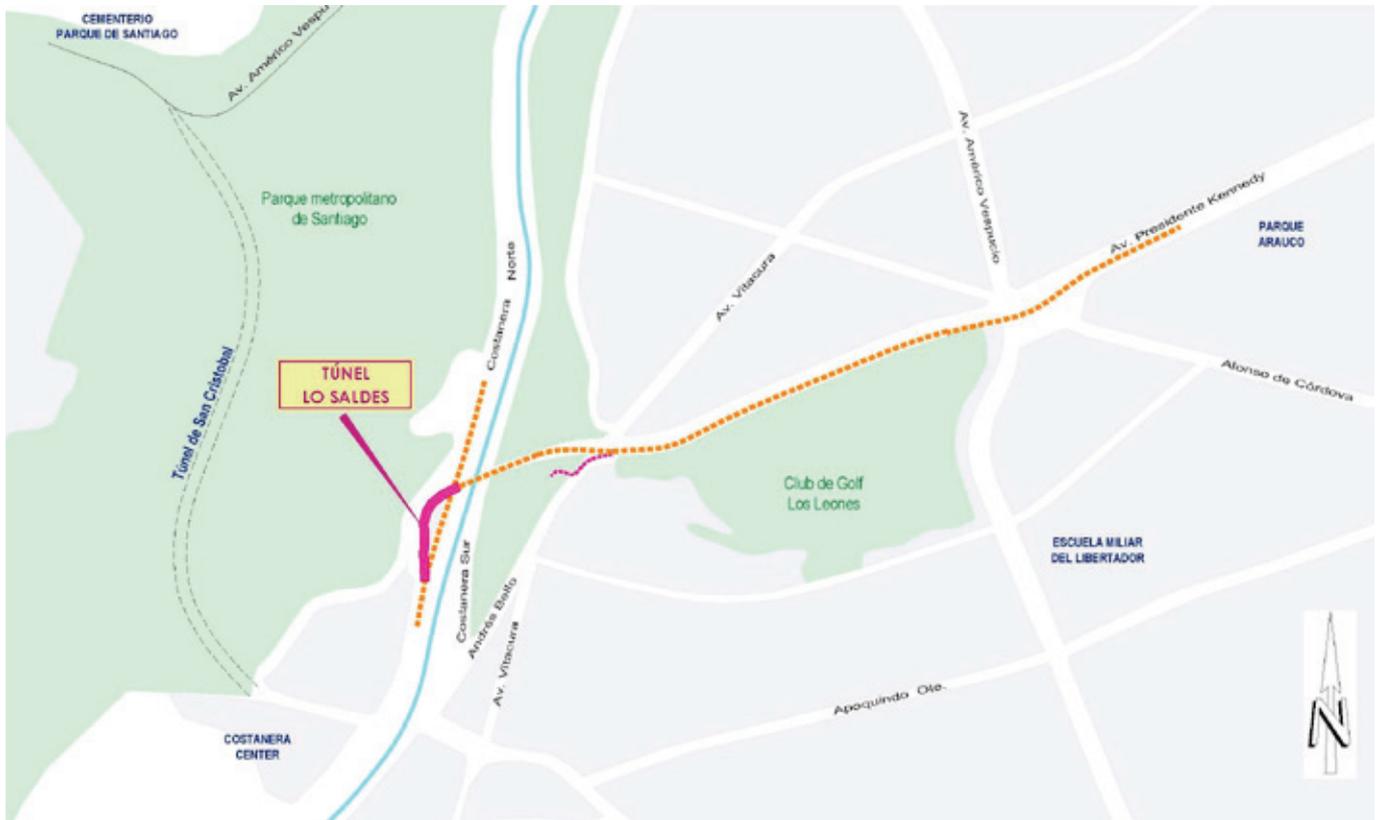


Figura 1. Localización y trazado del túnel de Lo Saldes.

El acceso al portal sur del túnel se ha resuelto mediante una estructura en trinchera formada por pilotes y vigas de acodalamiento.

El acceso al portal norte se resolvió en primera instancia mediante un pozo ovalado de manera que se habilitaba un acceso en una zona con severas limitaciones de espacio debido a la gran concentración de

vialidades. En una segunda fase este portal se resolvió mediante una estructura “cut and cover” que se extiende hasta cruzar la autopista Costanera y el río Mapocho. La Figura 2 incluye la planta general del túnel.

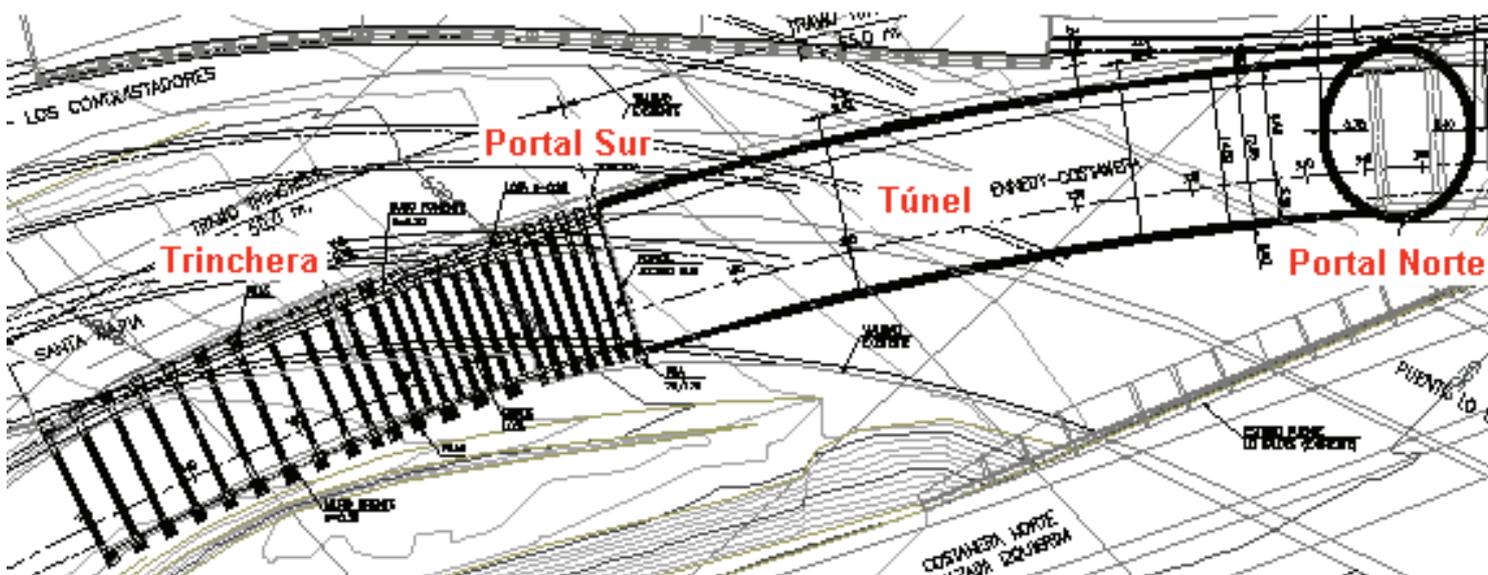


Figura 2.- Trazado del túnel de Lo Saldes

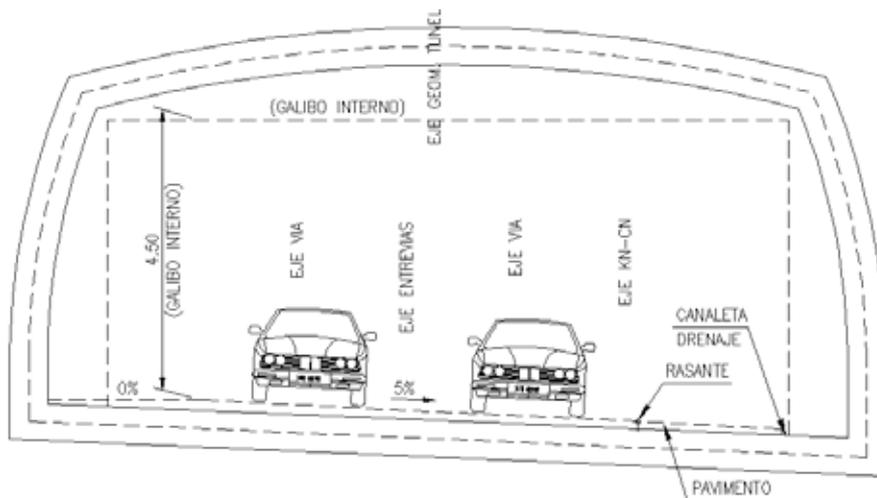


Figura 3. Definición geométrica del túnel de Lo Saldes.

La sección característica del túnel alberga una calzada de tres carriles de 3.5 m de ancho cada uno. Las dimensiones interiores (respecto al revestimiento) son 14.0 m de ancho y 5.7 m de altura máxima, respetando un gálibo de 4.5 m. En la Figura 3 se muestra la definición geométrica del túnel.

La alineación del túnel discurre por debajo de la calle Kennedy con una cobertera extremadamente pequeña. Sin duda esta es la peculiaridad más significativa de este túnel que condiciona entre otros su sección geométrica impidiendo una sección convencional, pues la cobertera varía entre 4.7 m en el acceso al Portal Norte hasta únicamente 1.6 m en el Portal Sur.

A continuación se describen las principales características del proyecto:

a) Geología: El trazado del túnel atraviesa las tobas meteorizadas de la "Formación Abanico", cubiertas por materiales aluviales formados por gravas, cantos rodados, limos y arcillas. Estos depósitos estaban cubiertos por rellenos antrópicos. En algunas zonas localizadas del túnel la clave y parte de los hastiales de la sección llegan a interceptar estos rellenos. El nivel freático se encontraba en todo caso por debajo de la solera de la sección. En la Figura 4 se muestra un corte geológico longitudinal y en la Figura 5 se muestra una imagen del frente de excavación del túnel, en

donde se pueden ver los rellenos antrópicos anteriormente mencionados, ocupando la gran parte de la sección.

b) Geotecnia: En la Tabla I se muestran los parámetros resistentes y deformacionales de los materiales considerados en el diseño. En los modelos de cálculo, se utilizó un modelo "Hardening-Soil" para los rellenos antrópicos y un modelo de Mohr-Coulomb para la Formación Abanico.

c) Sismicidad: Santiago de Chile se ubica en una zona con alta actividad sísmica. De acuerdo con la normativa y a los estándares chilenos la distorsión angular del terreno en campo libre se tomó como $3.8 \cdot 10^{-5}$ radianes.

d) Método constructivo y sostenimiento: Para la ejecución del túnel se ha utilizado un método secuencial de excavación, siguiendo con la filosofía del Nuevo Método Austríaco. La sección completa se ha dividido en tres fases de excavación. Los pases de avance en cada una de las secciones se establecieron en 0,70 m.

El sostenimiento se dispuso en dos capas. El sostenimiento primario consistió en una capa de 30 cm de hormigón proyectado reforzado con perfiles metálicos en doble T de 40×218 mm. Estos marcos recorren todos los perímetros de las secciones de excavación salvo el piso de la

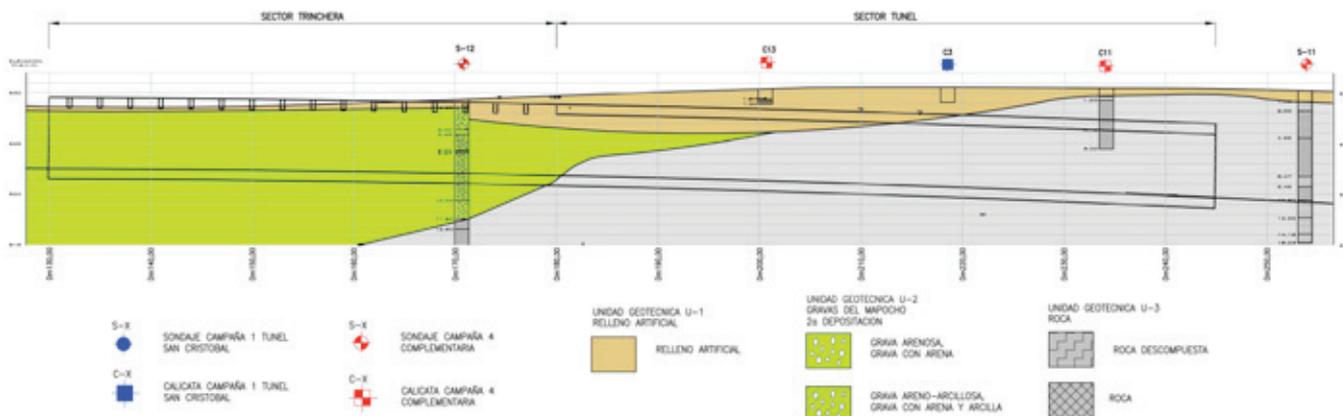


Figura 4. Corte geológico longitudinal.



Figura 5.- Rellenos antrópicos en el frente de excavación del túnel

sección C en donde se ejecutó un solera de hormigón armado debido a la dificultad de unir los marcos metálicos en esa zona. El sostenimiento secundario o revestimiento consiste en una capa adicional de 30 cm de espesor de hormigón proyectado reforzado con una malla electrosoldada.

Para mejorar y asegurar la estabilidad del frente se dispuso un paraguas de micropilotes y pernos de fibra de vidrio en el frente

En la Figura 6 se muestra la sección de excavación completa y su subdivisión en las tres fases anteriormente mencionadas.

La primera sección que se excavó fue la situada a la izquierda (Sección A) y se avanzó hasta que el frente de excavación estuvo una distancia de 20 m respecto a las otras secciones todavía no excavadas.

Después comenzó la excavación de la sección B, manteniendo el desfase de 20 m respecto a los frentes de A y C. Las tres secciones avanzaban por tanto con un desfase entre ellas de 20 m.

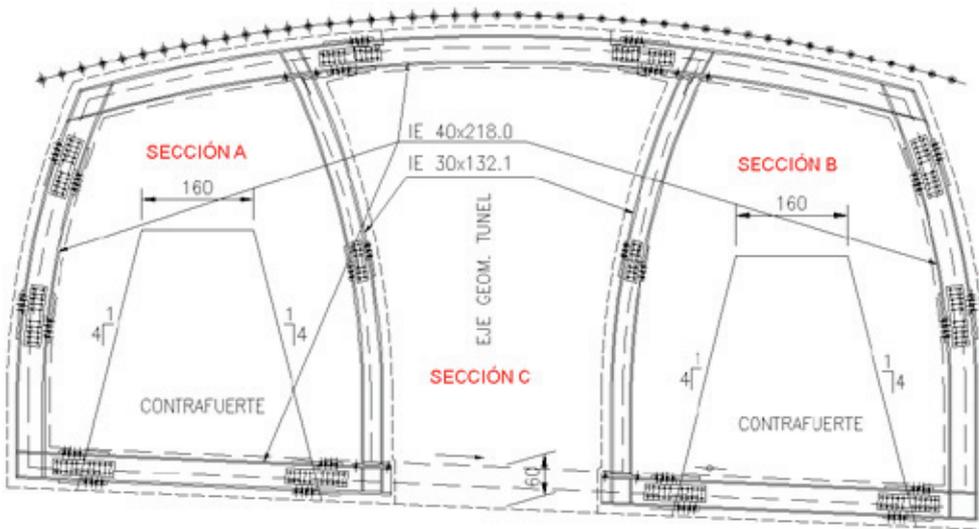


Figura 6.- Fases de excavación en el túnel de Lo Saldes

DATOS CLAVES DE LA CONSTRUCCIÓN

Como se ha mencionado previamente el túnel se ejecutó siguiendo la filosofía del Nuevo Método Austriaco. La ejecución del emboquille y la excavación de los primeros 40-60 metros de avance de la sección izquierda del túnel se llevaron a cabo por otra empresa, pero estos trabajos se abandonaron en 2007. Después, ya bajo el contrato Santiago Centro Oriente 2, se prosiguió con la construcción del túnel. Esta segunda etapa comenzó el 20 de octubre de 2015 y finalizó el 11 de octubre de 2016, concluyéndose los trabajos en 357 días. El ritmo medio de avance, considerando las secciones (A,

Suelo	Modelo	γ	c'	ϕ'	E_{ref}	E_{so}^{ref}	E_{coed}^{ref}	E_{ur}^{ref}	ν	ko
		[kN/m ³]	[kN/m ²]	[°]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]		
Rellenos	Hardening Soil	19,0	10	30	-----	17.000	17.000	51.000	0,20	0,53
Sustrato	Mohr Coulomb	23,5	50	35	500.000	-----	-----	-----	0,20	1,50

Tabla I.- Parámetros resistentes y deformacionales del terreno del túnel de Lo Saldes

Sección	PKi	Fecha	PKf	Fecha	Longitud (m)
B	241,65	20-10-2015	180,75	08-09-2016	60,9
C	241,65	19-11-2015	180,75	11-10-2016	60,9
A	201,05	25-06-2016	180,75	30-09-2016	20,3

Tabla II.- Excavación y fechas

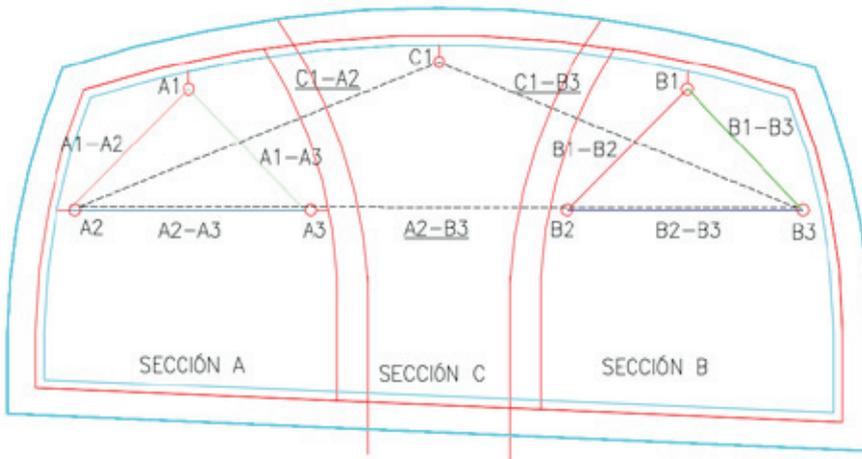


Figura 7. Puntos de medida para la convergencia

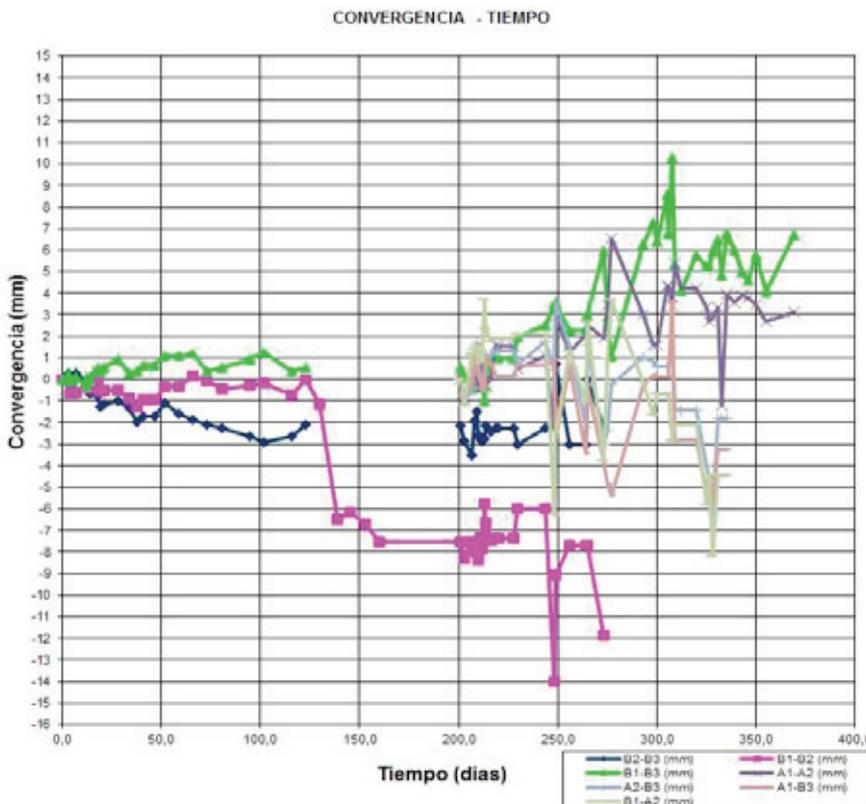


Figura 8.- Evolución de las convergencias

B y C) independientemente, fue de 0,2 metros por día. En la Tabla II se muestran las fechas de inicio y fin de la excavación por cada fase.

Respecto a la maquinaria empleada, se han utilizado camiones convencionales para el transporte del material excavado y palas cargadoras para su carga. Para la operación de instalación de los paraguas de micropilotes se ha utilizado un jumbo equipado con los útiles necesarios para dichos trabajos. Para la ejecución de las capas de hormigón proyectado se ha utilizado un robot. La excavación del túnel se ha llevado a cabo mediante retroexcavadoras equipadas con martillos hidráulicos.

Debido a la pequeña cobertura del túnel a lo largo de toda su alineación y a la existencia de una carretera en superficie se ha llevado a cabo un estricto control de las deformaciones inducidas y las subsidencias. Este control se ha realizado mediante los siguientes elementos de monitoreo:

- 12 secciones de convergencia compuestas por pernos de convergencia y dianas.
- 17 clavos de control topográfico dispuestos en superficie y junto a estructuras existentes.

En la Figura 7 se muestra la ubicación de los puntos de medida de la convergencia en una sección típica de monitoreo.

El asiento máximo medido fue de 10,6 mm en el PK 0+235 m. La máxima convergencia fue de 11,89 mm en el PK 0+240 m. Las deformaciones máximas registradas tuvieron una clara correspondencia temporal con la demolición de los sostenimientos de los tabiques provisionales. En las Figuras 8 y 9 se muestran respectivamente, una sección de convergencia y un perfil de subsidencias.

Las mayores problemáticas que acontecieron durante la construcción se dieron durante el emboquille des-

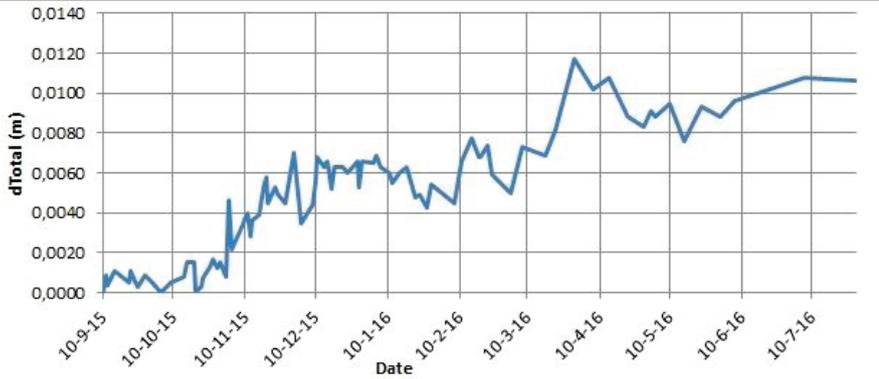


Figura 9.- Evolución de los asentamientos en la superficie



Figura 10. Vista del emboquille donde se distinguen las secciones de excavación A y B.



Figuras 11a y 11b. Inyecciones de mejora del terreno ejecutadas desde el interior del túnel.

de los portales y durante la excavación con sección parcialmente en los rellenos antrópicos.

La construcción del emboquille Norte se ejecutó mediante un pequeño pozo en forma de ovoide con un sostenimiento de 20 y 30 cm de hormigón proyectado, al abrigo de un doble paraguas de micropilotes. Se dispusieron tres anillos con un espesor de 50 cm para dotar de una mayor rigidez al pozo en determinadas alturas (coronación, clave de túnel y fondo de excavación). El espesor del sostenimiento del pozo se redujo a 15 cm en el entronque con la sección del túnel.

Se ejecutaron dos paraguas de micropilotes a lo largo de todo el perímetro de la bóveda del túnel en ambos emboquilles. Los paraguas constaban de micropilotes de 15 m de longitud con un diámetro exterior (\varnothing_{ext}) de 142 mm y un diámetro interno (\varnothing_{int}) de 122 mm, dispuestos cada 0,30 m. Las esquinas de los emboquilles se reforzaron con una segunda alineación de micropilotes. En la Figura 10 se puede ver el estado de un emboquille durante la construcción.

A lo largo de la totalidad del túnel se mantuvo la ejecución de un paraguas de micropilotes simple de manera sistemática. Los micropilotes utilizados para este propósito tenían un diámetro exterior (\varnothing_{ext}) de 76 mm, un diámetro interior (\varnothing_{int}) de 58 mm y una longitud de 7 m. Se dispusieron con una separación de 0,30 m asegurando siempre un solape de 3,5 m. En cada pase de avance de excavación se reforzó el frente con pernos de 9 m de longitud de fibra de vidrio (\varnothing_{ext} 22mm), formando una malla de 1,0 x 1,0 m. El solape entre pernos de fibra de vidrio fue de 4,5 m. La ejecución de los micropilotes de los paraguas y de los pernos de fibra de vidrio, manteniendo los solapes de proyecto fue especialmente complicada.

Dada la especial problemática del túnel, se ejecutaron inyecciones de mejora del terreno en algunas de las secciones de cobertera más reducida y/o afectadas por los rellenos. La mayoría de estas inyecciones se efectuaron desde el interior del propio túnel, como se muestra en las Figuras 11a y 11b.

En la Figura 12 se muestra la ejecución de inyecciones de lechada desde el interior del túnel, complementando la ejecución del paraguas pesado descrito anteriormente.

Sin embargo, en algunas secciones, debido a dificultades de ejecución y a la necesidad de abarcar volúmenes concretos de terreno, se tuvieron que realizar desde la superficie. En estas últimas, la permeabilidad diferencial entre los rellenos antrópicos y la Formación Abanico provocó que se produjesen fugas importantes de inyección en el contacto.

Después de varias pruebas se diseñó un procedimiento específico de inyección para este caso. Se optó por la ejecución de pilotes secantes de mortero a ambos lados del túnel generando un recinto confinado con el objeto de evitar las fugas de inyección. A su vez, en la Figura 13 se muestran las fugas de la inyección en el contacto antes de implementar con éxito la solución comentada.

Para la remoción de los tabiques de sostenimiento provisionales se siguió la siguiente secuencia: demolición de una longitud de 5 m del tabique de la sección B e instalación del sostenimiento definitivo en el perímetro las secciones B y C. La demolición de los tramos subsiguientes comenzaba cuando la resistencia del hormigón de sostenimiento definitivo alcanzaba como mínimo el 60% de su capacidad a 28 días. La demolición del tabique de sostenimiento provisional de la sección A avanzó con un desfase de 20m respecto a la demolición del tabique en la sección B. El proceso finalizó cuando



Figura 12- Realización de inyecciones desde dentro del túnel.



Figura 13. Fugas de la inyección en el contacto del Relleno Antrópico con la Formación Abanico.

se ejecutó por completo la demolición e instalación del sostenimiento definitivo. En las Figuras 14 y 15 se muestran los trabajos de demolición de los tabiques de sostenimiento provisional.

La Figura 16 muestra el proceso constructivo final del túnel que consistió en la proyección de una capa adicional de 30 cm de espesor de hormigón proyectado reforzado con una malla electrosoldada,



Figura 14. Proceso de excavación del túnel.



Figura 15. Demolición del sostenimiento provisional.



Figura 16.- Ejecución de segunda capa de sostenimiento definitivo.



Figura 17. Túnel acabado previo a su inauguración

que ejerce las funciones de revestimiento.

La Figura 17 muestra el túnel totalmente finalizado y listo para su empleo.

CONCLUSIONES

La excavación del túnel Lo Sal-des comenzó el 20 de octubre de 2015 y finalizó el 11 de octubre del

2016. El avance medio diario fue de 0,2 metros por día. A pesar de las dificultades técnicas constituidas principalmente por la muy reducida cobertera y por la presencia de rellenos antrópicos en la sección de túnel, la excavación se ha ejecutado sin problemas significativos y sin afectar al tráfico de la carretera superior ni a las estructuras adyacentes.

Se ha constatado con gran solvencia que la implementación de este método constructivo, basado en la división del frente de excavación, junto a la realización de inyecciones de mejora del terreno y la ejecución de paraguas de micropilotes sistemáticamente, es muy útil y efectivo para minimizar las subsidencias inducidas y asegurar la estabilidad de un túnel extremadamente complicado. ■