

Un gran desafío de un túnel urbano en suelos

La construcción del Túnel Kennedy en Santiago de Chile

2

La Sociedad Concesionaria Costanera Norte (SCCN) y el Ministerio de Obras Públicas (MOP) desarrollaron en la ciudad de Santiago de Chile, un proyecto de infraestructura vial para mejorar la conectividad desde el oeste hacia el este, entre la autopista Costanera Norte y la Av. Kennedy. Para mejorar esta conectividad fueron necesarias varias medidas, incluida la ejecución de cuatro nuevos túneles; el más singular es el 'Túnel Kennedy'.

Juan Kuster, Rossana Nuñez.
Costanera Norte

Erik Chávez, José M Galera,
Daniel Santos.
Subterra Ingeniería

El presente artículo corresponde con una traducción del publicado para el World Tunnel Congress 2019 (WTC2019).

Este túnel tiene una longitud de 1.166 m con dos secciones (4 y 5 carriles). Su anchura varía entre los 17,45 m y los 20,95 m y alcanza los 11,8 m de altura. El túnel fue excavado en gravas aluviales, parcialmente por debajo del nivel freático.

Los principales desafíos en la ejecución de esta estructura fueron:

- Las dimensiones: sección de más de 250 m².
- Las condiciones del terreno: implicaron medidas de estabilidad del frente de avance y un método de excavación en diferentes fases (5 y 6 fases).
- El ambiente urbano y el bajo recubrimiento (entre 10 y 16 m): un alto control de las deformaciones inducidas en la superficie.

El soporte instalado en este túnel consiste en: un sellado de 3 cm, marcos de acero con un espaciamiento de 1,0 m y 27 cm de hormigón proyectado. Se utilizaron sistemáticamente contrafuertes en el frente de excavación y de manera ocasional, sistema de paraguas de micropilotes.

El revestimiento, corresponde a una capa de hormigón entre 20 cm a 40 cm, dependiendo de la columna de agua, y una tercera capa de 10 cm con fibras de polipropileno para protección contra incendios.

El periodo de excavación se desarrolló entre octubre de 2014 y febrero de 2017; obteniéndose un avance promedio de 1,4 m / día, todo ello asegurando siempre óptimas condiciones de seguridad.

El presente documento describe las experiencias de construcción y las medidas tomadas para superar todos los desafíos mencionados.

1.- Descripción del túnel

El túnel está ubicado en el NE de Santiago de Chile, cerca del centro financiero de la ciudad. Toda la alineación del túnel es paralela a la actual Avenida Kennedy, principalmente debajo de un campo de golf llamado 'Los Leones'. La figura 1 muestra la ubicación del túnel.



Figura 1. Ubicación del Túnel Kennedy.

El acceso a ambos portales se resuelve mediante dos estructuras de trincheras compuestas por pilotes, vigas y losas. En los alrededores del portal de acceso, en superficie, se localizaban desde una rotonda hasta un puente y varias conexiones de alta complejidad.

La sección transversal típica del túnel es de cuatro carriles de 3,5 m de ancho cada uno y dos arcones de 0,75 m respectivamente. Debajo del pavimento se ha concebido una galería de mantenimiento. Las dimensiones internas son 17,45 m de ancho y 11,30 m de altura. Al inicio del túnel, hay un carril de conexión, por lo que, durante unos 50 m, se ha construido una sección especial de cinco carriles. Para esta sección, las dimensiones internas son 21,0 m de ancho y 11,8 m de altura. También se proyectó una sección adicional, que se denominó '4,5 carriles', diseñada para suavizar la transición entre las secciones de cinco y cuatro carriles. Las figuras 2a y 2b muestran la definición geométrica de las dos secciones existentes del túnel.

Además, se han construido tres salidas de emergencia para el plan de evacuación del túnel. La primera se encuentra cerca de las estructuras de acceso en el portal. La segunda y tercera se resolvieron mediante pozos verticales de 8,3 m de diámetro que comunican desde la superficie a las conexiones de la galería peatonal.

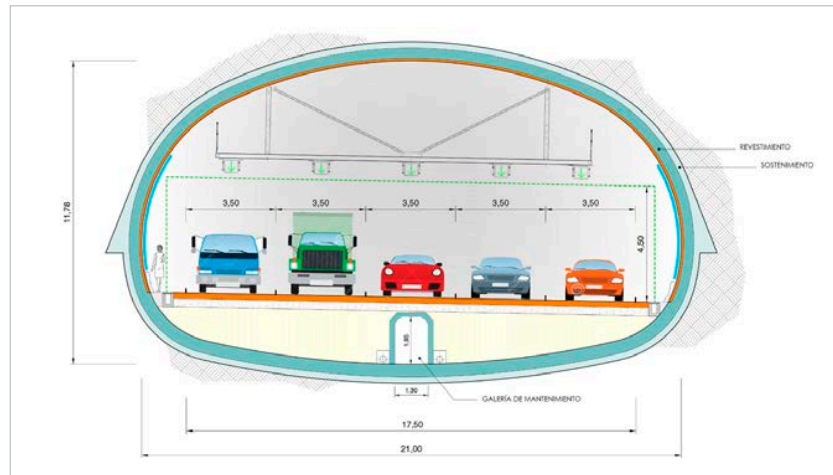


Figura 2a. Secciones funcional de 5 carriles. Túnel Kennedy.

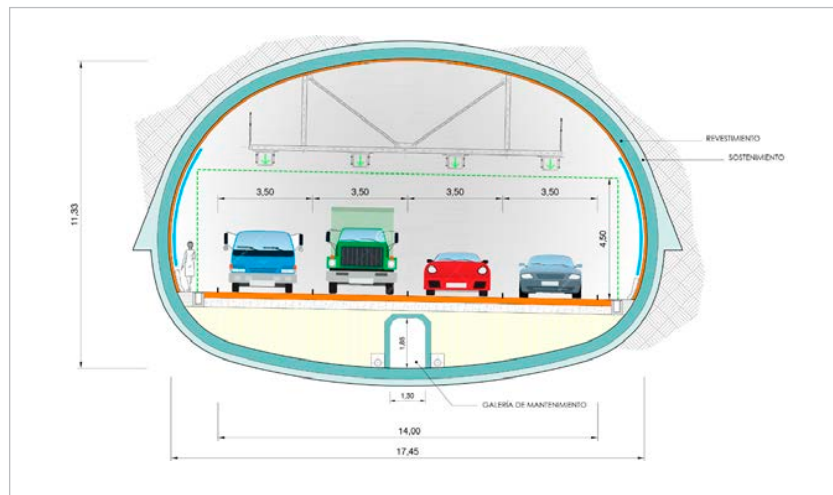


Figura 2b. Secciones funcional de 4 carriles. Túnel Kennedy.

2.- Características geológicas y geotécnicas

Todo el túnel ha sido excavado en materiales aluviales compuestos por gravas y guijarros de la segunda y primera deposición del río Mapocho. En la parte inferior del túnel, se esperaba la presencia de andesitas y lutitas meteorizadas de la Formación Abanico, entre el p.k. 1+046 y el km 1+050, en la parte invertida de la sección del túnel. Sin embargo, solo se han excavado algunos bloques de andesita.

En términos de los parámetros del suelo, la Tabla 1 muestra los parámetros de resistencia y deformación considerados para los cálculos de soporte.

PARÁMETROS DE SUELO	UNIDAD GEOTÉCNICA		
	RELLENO ANTRÓPICO	2da DEPOSITACIÓN	1ra DEPOSITACIÓN
Y (kN / m ³)	17,0	22,5	Manchacor SL
C _{max} (kPa)	10	25	11/01/17
φ _m (°)	33	45	75-85
E _c (kPa)	20.000	42.000 x Z 0,5 (Z<17) (*)	26-28
ν	0,30	0,25	0,25
Y (°)	0	12	12
K ₀	0,43	0,70	0,9 - 0,0533 X (Z-6) (6<Z<18) 0,26 (Z<18)

Z = Profundidad con respecto al terreno llano medido en metros
(*) En gravas, se considera un valor mínimo de E_c = 100.000 kPa a una profundidad de 5m

Tabla 1. Parámetros de resistencia y deformación del suelo en el túnel Kennedy.

El nivel freático se encuentra a 623 msnm. En consecuencia, desde su inicio hasta aproximadamente el p.k. 1+350, se localiza sobre la sección del túnel. Desde este sector, atraviesa el túnel desde la cota superior de la sección hasta la cota de la contrabóveda en el p.k. 1.800. Desde este punto, continúa por debajo de la cota de contrabóveda hasta el final del túnel.

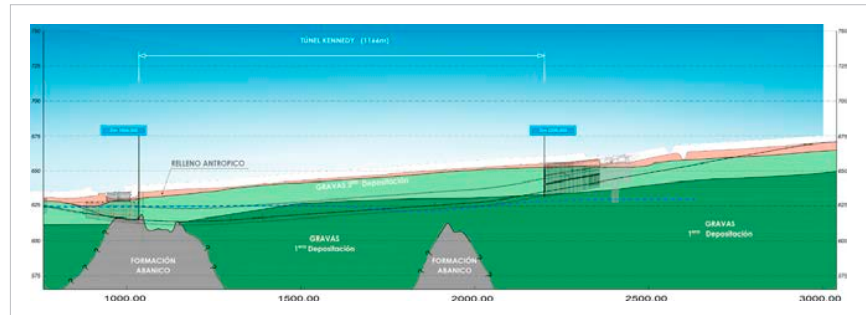


Figura 3. Sección geológica del túnel Kennedy.

4

La figura 3 presenta una sección longitudinal geológica del túnel en la que también se ha resaltado la mesa de agua.

Durante la construcción del túnel, el nivel freático se encontró realmente a 615 msnm, ocho metros por debajo de la altura prevista. En la clave de la sección de excavación solo se registraron infiltraciones menores, probablemente debido al sistema de riego del campo de golf y las lluvias estacionales. En la excavación de la destroza se registró un flujo de agua, pero sin crear problemas de estabilidad.

Santiago de Chile se encuentra en un área de alta sismicidad. Según los estándares chilenos, la aceleración sísmica a considerar es 0.3g y 0.15g como aceleración horizontal y vertical respectivamente.

El 16 de septiembre de 2015, se registró un terremoto de magnitud 8.4 Mw en la región de Coquimbo. En consecuencia, se registró una intensidad VII en la escala Mercalli en Santiago. Una vez que se realizó la inspección del túnel y el análisis de monitoreo, se determinó que este evento no afectó a la estructura.

3.- Requisitos especiales de diseño

Con respecto al diseño del túnel, fueron cruciales en el desarrollo del proyecto los siguientes aspectos técnicos:

- Minimizar las subsidencias inducidas en la superficie,
- Reducir el impacto en el tráfico durante la construcción, y
- Minimizar los costos de mantenimiento asociados al bombeo de agua durante la explotación.

La reducción de los asentamientos inducidos en la superficie fue un aspecto clave del diseño. Esto es una consecuencia de la alineación del túnel, que se extiende casi en toda su longitud debajo de una propiedad privada como es el campo de golf 'Los Leones' y tangente a la avenida Kennedy. Por esta razón debía de evitarse cualquier daño sobre ambas infraestructuras. Por lo tanto, el diseño del soporte y las fases de construcción del túnel se llevaron a cabo cuidadosamente para los propósitos antes mencionados. En el diseño, se efectuaron cuatro modelos numéricos utilizando el software FLAC3D, centrándose en particular en las tensiones que actúan sobre los elementos de soporte y los asentamientos inducidos.

Un segundo problema importante fue el de minimizar el impacto en el tráfico durante la construcción. Para reducir este problema, se excavó un túnel temporal de acceso. La longitud de este acceso al túnel principal fue de 190 m, con una sección transversal de 5,0 m x 6,5 m. Este acceso tuvo un recubrimiento extremadamente bajo en el cruce bajo la avenida Vitacura y la rotonda de Pérez Zujovic, pero permitió comenzar la excavación del túnel en su sección de 4 carriles sin perturbar el tráfico existente.

Este acceso subterráneo se conectó con el 'drift' central de la sección de 5 carriles, pero la excavación de esta sección, que fue la más grande del proyecto, se pospuso hasta que se desmanteló el tráfico sobre la superficie en la rotonda. La figura 4 ilustra la complejidad del túnel de acceso temporalmente excavado para iniciar la construcción del túnel Kennedy.

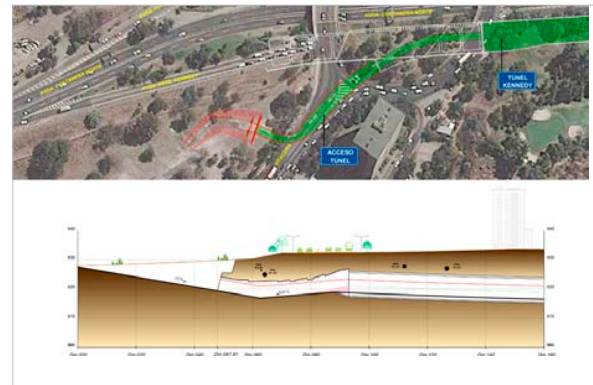


Figura 4. Alineación y sección del túnel de acceso temporal. Túnel Kennedy.

La impermeabilización del túnel para minimizar los costos de mantenimiento, fue otro aspecto principal considerado durante la fase de diseño. Con este objetivo, se estableció una tasa de bombeo inferior a 500 l / min en el contrato de construcción. Así, a lo largo de todo el túnel y entre el hormigón del soporte y el revestimiento se diseñó un sistema de impermeabilización compuesto por una geomembrana y una lámina impermeable.

4.- Desafíos de construcción

Hay varios aspectos de este proyecto que conllevan desafíos constructivos, entre los que se pueden indicar los siguientes:

- Las dimensiones de la sección transversal de la excavación del túnel son excepcionalmente grandes ya que la sección de cinco carriles tiene 22,9 m de ancho y 13,65 m de altura, lo que implica un área de más de 250 m².
- El túnel fue completamente excavado en suelos. Este hecho obliga a tener en cuenta varios factores, como la estabilidad del frente de excavación, los pases de avance, las deformaciones inducidas, la tensión que actúa sobre el soporte o los factores de seguridad del soporte y la sistematización del ciclo de excavación.
- El túnel estaba ubicado en un entorno urbano con un recubrimiento muy bajo (de 10 a 16 m) y debajo de propiedad privada de acceso restringido. Por lo tanto, la limitación de las deformaciones inducidas y el monitoreo en la superficie implicó varias dificultades para el diseño y también para el control durante la construcción.

5.- Soluciones desarrolladas

Las siguientes soluciones fueron desarrolladas para la excavación, soporte y revestimiento del túnel:

5.1.- Excavación

El método de construcción empleado ha sido un método de excavación secuencial, siguiendo la filosofía NATM, utilizando una pata de elefante después de finalizar la excavación del avance. Dependiendo de la geometría, este avance se excavó en dos o tres fases, mientras que la destroza siempre se ejecutó en tres fases. La excavación se realizó por medio mecánicos, utilizando excavadora hidráulica, retroexcavadora y cargador frontal.

5.2.- Soporte

El soporte de la sección típica consiste en un sellado de hormigón proyectado de 3 cm, marcos de acero HEB-120 con pata de elefante espaciados 1,0 m y hormigón proyectado de 35 MPa de resistencia característica y de 27 cm de espesor. Se ejecutaron sistemáticamente contrafuertes en el frente y de manera ocasional se utilizaron micropilotes en una sección específica, para minimizar las deformaciones en superficie. Las fotos 1 a 6 muestran la secuencia de construcción para la sección de cuatro carriles.



El soporte de la sección de cinco carriles consiste en un sellado de hormigón proyectado de 5 cm, para la bóveda se previeron marcos reticulados con espaciado de 0,75 m; además se dispuso un anillo de marcos HEB-160 espaciados a 0,75 m y 20 cm de hormigón proyectado de 35 MPa de resistencia. Ambos marcos comparten una base de pata de elefante. Las fotos 7 y 8 muestran la secuencia de construcción para la sección de cinco carriles, en la que el avance se construyó en tres fases de excavación y la destroza, en tres fases, similar a la sección de cuatro carriles.

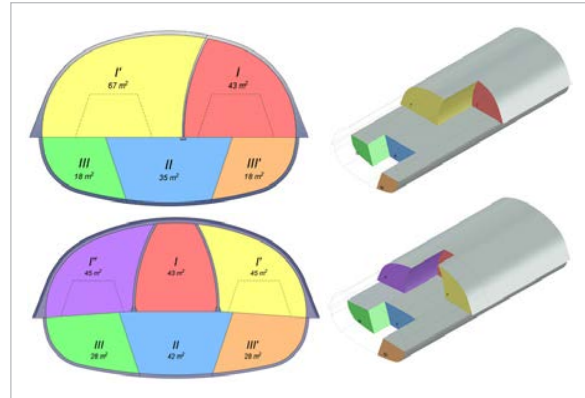


Figura 5a y 5b. Fases de excavación utilizadas para las secciones de 4 y 5 carriles. Túnel Kennedy.

Finalmente, fue necesaria una transición entre la sección de cuatro carriles y la sección de cinco carriles, como se muestra en la Foto 9.



Fotografía 9. Transición entre las secciones de cuatro carriles y las de cinco carriles.

5.3.- Revestimiento

Finalmente, y separado del soporte por el sistema de impermeabilización, se diseñó un revestimiento de hormigón armado. Su espesor varía de 20 cm a 40 cm dependiendo de la columna de agua. Se diseñaron y construyeron tres secciones de revestimiento diferentes:

- **Revestimiento A**, para la zona en la que el nivel freático se encuentra sobre la bóveda del túnel: 40 cm de espesor y reforzado con acero.
- **Revestimiento B**, para la zona donde el nivel freático se ubica entre la bóveda y la contrabóveda del túnel: 35 cm de espesor y reforzado con acero, y
- **Revestimiento C**, para la parte del túnel que se encuentra sobre el nivel freático: 20 cm de espesor y reforzado con acero.

Fotografías 7 y 8. Secuencia de construcción para la sección de cinco carriles.



El Túnel Kennedy tiene una longitud de 1.166 m con dos secciones (4 y 5 carriles)

También se consideró una tercera capa de revestimiento con un espesor homogéneo de 10 cm con fibras de polipropileno para protección contra incendios. En la sección de cinco carriles, el espesor del revestimiento fue de 50 cm.

Las fotos 10 a 13 muestran la secuencia de construcción utilizada para el revestimiento.



Fotografías 10, 11, 12 y 13. Secuencia de construcción para el revestimiento.

5.4.- Monitoreo

Debido al recubrimiento extremadamente bajo del túnel y al número de fases de excavación, el control de las deformaciones inducidas y las subsidencias durante la construcción fue muy estricto. Este control se realizó con los siguientes elementos de monitoreo:

- Inclínómetros y extensómetros instalados desde la superficie antes de la excavación de los túneles a lo largo de la alineación del mismo.
- Una sección de celdas de presión (p.k. 1+374) instalada alrededor de las estructuras de las salidas de emergencia.
- Secciones de convergencia cada 25 m.
- Perfiles de subsidencias en superficie.

A lo largo de la sección típica del túnel, el asentamiento máximo medido en la superficie fue de 12,4 mm en el p.k. 1+145, mostrando sus pendientes más altas en el momento posterior a la demolición de la pared de soporte temporal de la sección del lado izquierdo.

En la sección de 5 carriles del túnel, el asentamiento máximo medido en la superficie fue de 12.8 mm en el p.k. 1+037, con las pendientes más altas relacionadas con la excavación en fase de avance de la sección del lado derecho y, en segundo lugar, con la demolición de las paredes de soporte temporal de la sección central.

La convergencia máxima a lo largo de la sección típica fue de 14,4 mm en el p.k. 1+465, con una velocidad máxima de 3,66 mm / día. Este comportamiento estaba relacionado con la demolición de los muros de soporte temporal. Es significativo que después de esto, se haya registrado una deformación de 'divergencia' en las cuerdas AC y AB.

En relación con la sección de 5 carriles del túnel, la convergencia máxima registrada fue 57,52 mm en el p.k. 1+070, con una velocidad de convergencia de 2,03 mm / día; la cual, también estaba relacionado con la demolición de los muros de soporte temporal.

Las figuras 6a y 6b muestran la disposición de las cuerdas de convergencia para las dos secciones existentes del túnel.

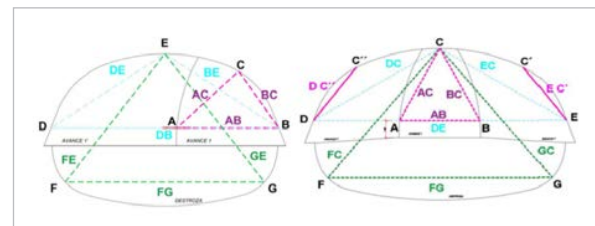


Figura 6a y 6b. Disposición de las cuerdas de convergencia para secciones de 4 carriles y 5 carriles.

6.- Conclusiones

La excavación del túnel comenzó el 24 de octubre de 2014 y finalizó el 16 de febrero de 2017. Si consideramos la longitud total construida de 1.166 m, el avance promedio es de 1,4 m / día.

Los principales desafíos durante la construcción del túnel Kennedy han sido:

- Las dimensiones de la sección de excavación, más de 250 m², 23,2 m de ancho.
- El túnel excavado completamente en gravas aluviales y parcialmente debajo del nivel freático, que implica considerar la estabilidad de la frente de excavación, el uso de paraguas de micropilotes, la colocación de pata de elefante en el sostenimiento y varias fases de excavación, para garantizar una construcción segura.
- El túnel está ubicado en un entorno urbano con un recubrimiento extremadamente bajo (entre 10 y 16 m), por lo que ha sido un aspecto primordial minimizar las deformaciones inducidas y un control exhaustivo del monitoreo en la superficie.
- Debido a su ubicación, en una de las áreas urbanas más densas de Santiago, las autoridades no permitieron ninguna afección al tráfico de superficie existente.●