

Los desafíos geotécnicos del Metro de Santiago en los años 2020

The geotechnical challenges of the Metro de Santiago in the 2020s

Edgardo González

Metro de Santiago & Universidad de Chile, Chile, edgonza@ing.uchile.cl

Cristian González, Luis Argomedo, Gabriel Valenzuela, Héctor González & Rodrigo Terrazas

Metro de Santiago, Chile

ABSTRACT: Este artículo presenta los desafíos geotécnicos que el Metro de Santiago está enfrentando en la actual década, marcados por la utilización inédita de excavación mecanizada en los túneles interestación del primer tercio del Proyecto Línea 7 y, por la construcción de los túneles viales del Proyecto AVO II bajo una parcialidad de los túneles interestación de la Línea 4, en actual operación, lo que exige el control permanente del Metro de Santiago durante la ejecución del proyecto.

ABSTRACT: This paper introduces the geotechnical challenges that the Metro de Santiago is facing in the current decade, marked by the unprecedented use of mechanized excavation in the running tunnels of the first third of the Line 7 Project and, by the construction of the road tunnels of the AVO II Project under a partiality of the running tunnels of Line 4, currently in operation, which requires permanent control of the Metro de Santiago during the execution of the project.

KEYWORDS: Metro de Santiago, excavación convencional, excavación mecanizada, tuneladora, AVO II

1 INTRODUCCIÓN

Este artículo presenta los desafíos geotécnicos que el Metro de Santiago está enfrentando en la actual década, en el marco de la construcción del Proyecto Línea 7 y del Proyecto AVO II.

En la actualidad, el Metro de Santiago cuenta con 6 líneas, las que conforman 148 km de red, 143 estaciones y 17 pares de combinación. Un 15 % de la red se encuentra construida como túnel falso (trincheras cerradas), un 15 % como trincheras abiertas, un 15 % como viaducto y un 55 % como túnel con métodos subterráneos. La Línea 7, que se está construyendo con métodos subterráneos, agregará 26 km de red, 19 estaciones y 6 pares de combinación. Ver Figura 1, que incluye las Extensiones de Línea 6 al Oriente y al Poniente, que en conjunto agregarán 4 km de red y 2 estaciones.

El Proyecto AVO II por su parte, que también se está construyendo con métodos subterráneos, es un bitubo vial de 5,2 km de longitud que se extiende de modo semiparalelo bajo una parcialidad de los túneles de Línea 4, entre las estaciones Príncipe de Gales y Los Presidentes (Figura 1).

A continuación, se desarrolla el artículo. En el Capítulo 2 se presenta una breve descripción de la evolución de los desafíos geotécnicos del Metro de Santiago, desde la excavación convencional hasta la excavación mecanizada, mientras que en el Capítulo 3, la forma en la que el Metro de Santiago está controlando la influencia de AVO II sobre la Línea 4.

2 DESAFÍOS EN PROYECTO LÍNEA 7

2.1 Excavación convencional

La evolución de los desafíos geotécnicos de los primeros 50 años de construcción del Metro de Santiago ha sido descrita, con distintos énfasis, por González et al. (2017) y por Gomes et al. (2019).

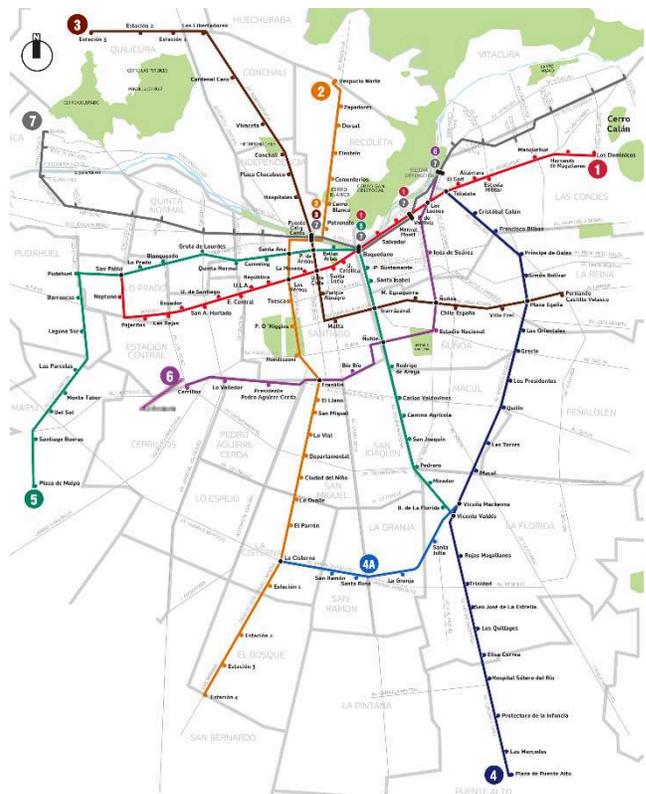


Figura 1. La red del Metro de Santiago proyectada para fines de década

Esta evolución está marcada por el paso de la excavación convencional con métodos abiertos a la excavación convencional con métodos subterráneos y sus múltiples secuencias constructivas.

González et al. (2017) distinguen cuatro etapas para los túneles interestación (esta publicación no se referirá a las estaciones):

- Primera etapa (1969-1987; L1 y L2)
- Segunda etapa (1993-2000; L5)
- Tercera etapa (2001-2011; L4, Ext L5, Ext L2 y Ext L1)
- Cuarta etapa (2012-2018; L6 y L3)

La primera etapa se caracteriza por la ejecución de los túneles interestación con métodos abiertos (Figura 2), mientras que las etapas restantes, por la ejecución de los túneles interestación con métodos subterráneos, siguiendo los principios del New Austrian Tunneling Method (NATM) (Figuras 3, 4 y 5).

La segunda etapa se caracterizó por la excavación desfasada de la bóveda y el banco (Figura 3) mientras que la tercera etapa, por la excavación conjunta de la bóveda y el banco, manteniendo el contrafuerte de la etapa anterior (Figura 4). La cuarta etapa, aún vigente, se caracteriza por la excavación conjunta de la bóveda y el banco, aunque ya sin contrafuerte en la frente (Figura 5).

En todas las etapas, el paso de excavación típico ha sido de 1 m y según hayan sido las particularidades geotécnicas de cada sector, se ha reducido hasta 0,5 m o se ha ampliado hasta 1,5 m.



Figura 2. Excavación de túneles interestación del Metro de Santiago durante la primera etapa (1969-1987; L1 y L2)

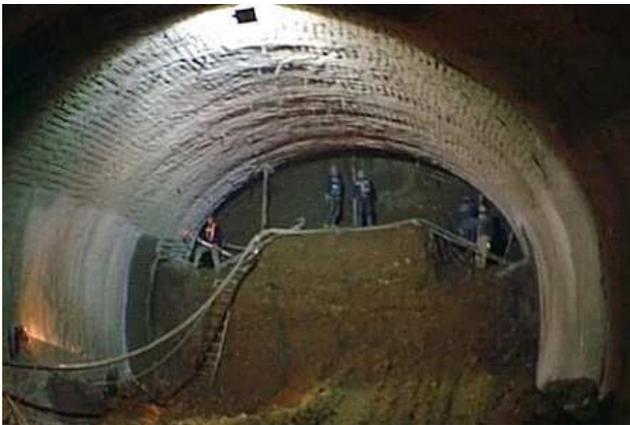


Figura 3. Excavación de túneles interestación del Metro de Santiago durante la segunda etapa (1993-2000; L5)

Cabe destacar que la segunda etapa siguió vigente durante la tercera etapa y que en ambos casos, el sostenimiento consideró dos capas de hormigón proyectado y sus respectivas armaduras antes de la ejecución del revestimiento. En la cuarta etapa, el sostenimiento considera la ejecución de solo una capa de hormigón proyectado. El conjunto sostenimiento - revestimiento de esta etapa es típicamente de 30 cm en gravas y de 30 a 35 cm en finos.

Cabe destacar también que en todas las etapas se han considerado secciones herradura y secciones ovoidales según fueran las condiciones geotécnicas del suelo de apoyo. En la segunda y tercera etapa, la parte inferior de la sección ovoidal, conocida como contrabóveda, se ejecutó a no más de 6 pasos de la frente de excavación, mientras que en la cuarta etapa, a no más de 12 pasos, los que se pueden excavar de modo simultáneo.

Las secciones herradura se emplazan típicamente en gravas, mientras que las secciones ovoidales, en finos. En suelos mixtos y en pumicitas depende del caso. En la Figura 6 se presenta un mapa geotécnico del sector centro norte de Santiago, estimado a una profundidad de 20 m. En la Figura 7 se presenta una sección típica en recta de Línea 7 (a excavar según la cuarta etapa). El área de excavación es de 61 m² en sección herradura y de 67 m² en sección ovoidal. En una curva estos valores crecen hasta 68 m² y 75 m² respectivamente.



Figura 4. Excavación de túneles interestación del Metro de Santiago durante la tercera etapa (2001-2011; L4, Ext L5, Ext L2 y Ext L1)



Figura 5. Excavación de túneles interestación del Metro de Santiago durante la cuarta etapa (2012-2018; L6 y L3)

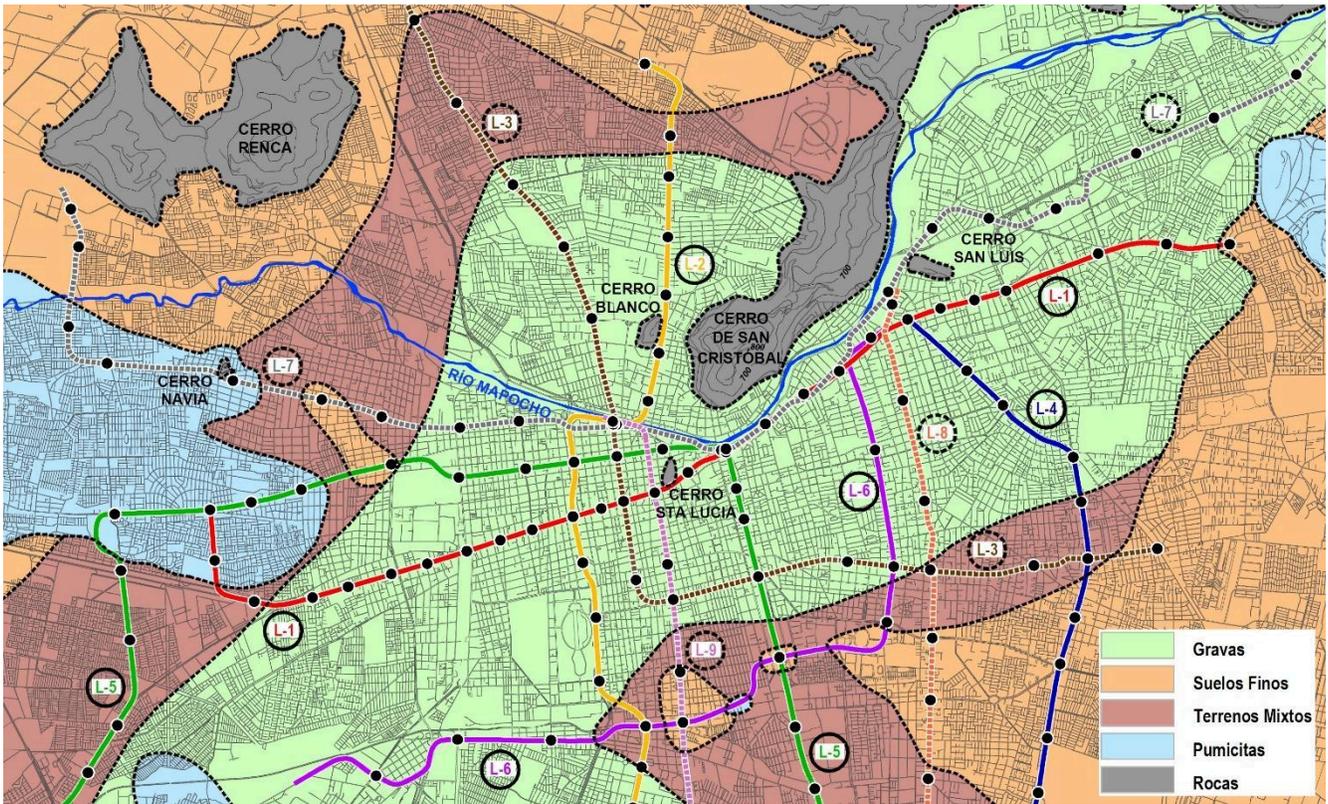


Figura 6. Mapa geotécnico del sector centro norte de Santiago, estimado a una profundidad de 20 m (desarrollado en el Proyecto Línea 7)

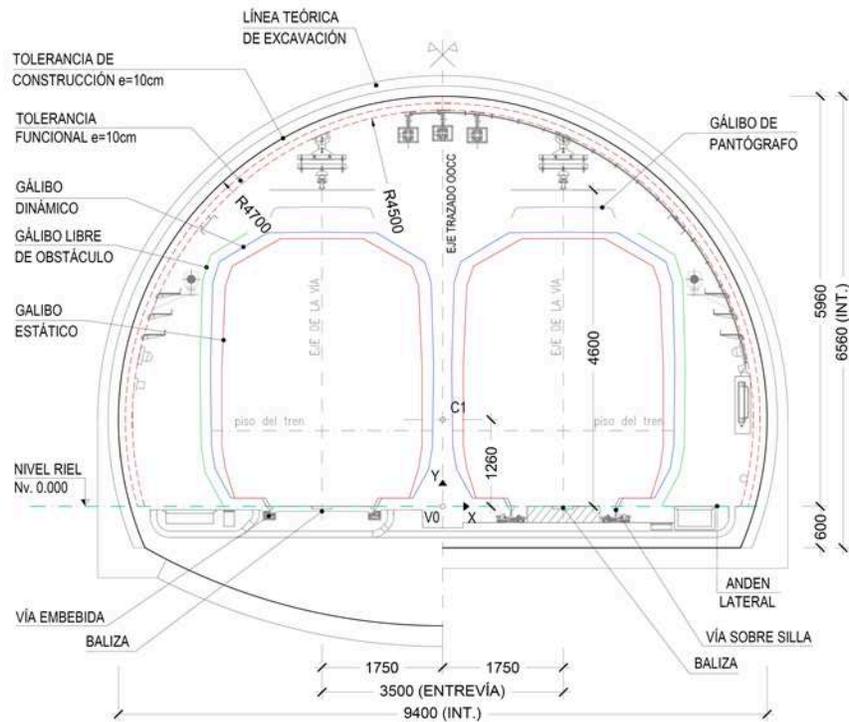


Figura 7. Sección típica de un túnel interestación en recta de Línea 7 a ejecutar con excavación convencional (medidas en mm)

2.2 *Excavación mecanizada*

La excavación mecanizada con una máquina tuneladora, también conocida como TBM (Tunnel Boring Machine), requiere de una serie de acondicionamientos del terreno mientras avanza la excavación según sea el tipo de suelo y según sea el nivel freático.

Cuando la excavación se encuentra sobre el nivel freático, como es el caso de Línea 7, se utiliza típicamente una tuneladora de escudo EPB (Earth Pressure Balance), en donde el frente de excavación se equilibra con el propio material excavado, que antes de ser evacuado, pasa en presión por la cámara de excavación, (Figura 8 (ITA, 2001)). Este equilibrio se mejora añadiendo agentes químicos que acondicionan el terreno, ampliando la aplicabilidad de la tuneladora al aumentar la plasticidad de los terrenos.

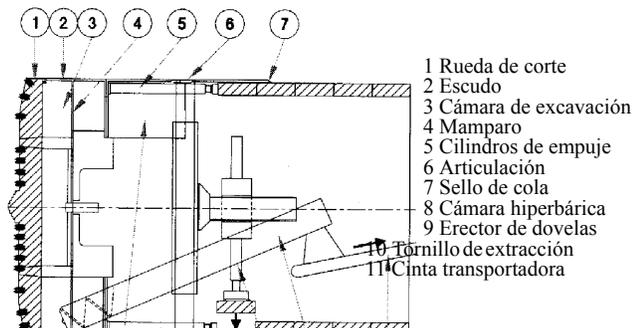


Figura 8. Sección esquemática de un escudo EPB

En la Figura 9 se presentan 10 ondas granulométricas sobre las que se definen los grados de acondicionamiento del terreno. En la Zona 1 se deben añadir espumas y un agente desestructurante que anule la adherencia de la fracción arcillosa. En la Zona 2 sólo se precisa la adición de espumas. En la Zona 3 se requieren espumas y polímeros químicos para compensar la mayor permeabilidad de las gravas. En la Zona 4, el consumo de polímeros será muy importante. Finalmente, existe una quinta zona donde se indica que una tuneladora de escudo EPB no debe utilizarse.

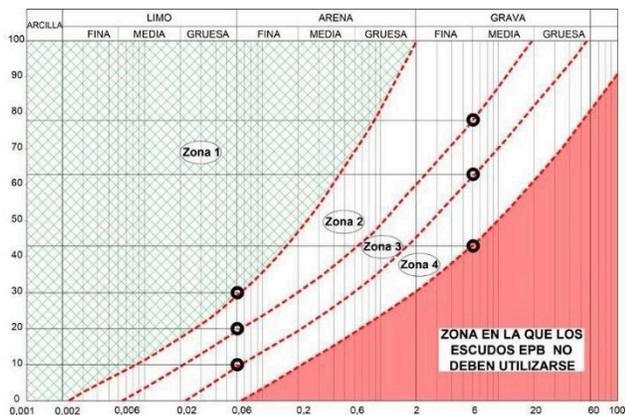


Figura 9. Grados de acondicionamiento de un terreno excavado con una tuneladora de escudo EPB (desarrollado en el Proyecto Línea 7)

Las Figuras 10 y 11 presentan los grados de acondicionamiento necesarios para los suelos finos y pumicitas del primer tercio de Línea 7 (Figura 6), acondicionamientos dentro de rango normales. En la Figura 6 se aprecia que las 7 primeras estaciones de Línea 7 se emplazan sobre suelos finos, pumicitas y suelos mixtos. En este contexto se plantea por primera vez el uso de excavación mecanizada en el Metro de Santiago, sobre una longitud de 7,4 km, con una sección de excavación de 75 m² (Figuras 12 y 13). Además, en la Figura 6 se aprecia que el trazado de Línea 7 pasa por un tramo de 200 m de roca (granodiorita alterada) en la falda sur del Cerro Navia. De no haber utilizado tuneladora en este tramo, era probable el uso de explosivos, lo que obligaba a tomar mayores precauciones por dentro y por fuera del túnel.

Cuando se descuenta el paso de la tuneladora por las estaciones, que se construyen con excavación convencional, la longitud efectiva que será construida con tuneladora es de 6,7 km. Esta longitud efectiva tendrá un sostenimiento-revestimiento en base a un anillo de dovelas de 32 cm de espesor. Son 7 piezas prefabricadas de 1,7 m de longitud de avance, las que van siendo montadas por un sistema erector que se dispone dentro del escudo de la tuneladora. En la Figura 14 se aprecian las primeras dovelas construidas para Línea 7, apiladas por anillos.

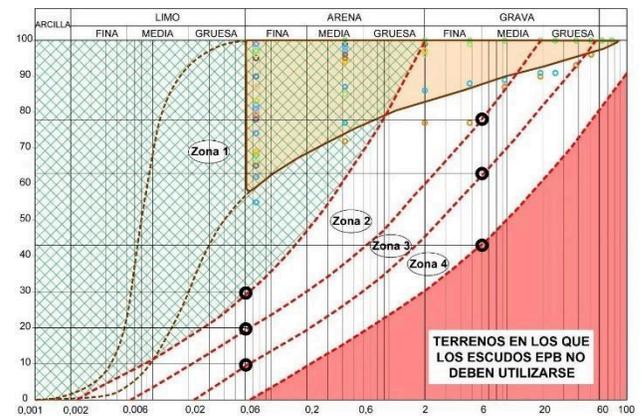


Figura 10. Grados de acondicionamiento necesarios para los suelos finos del primer tercio de Línea 7 (desarrollado en el Proyecto Línea 7)

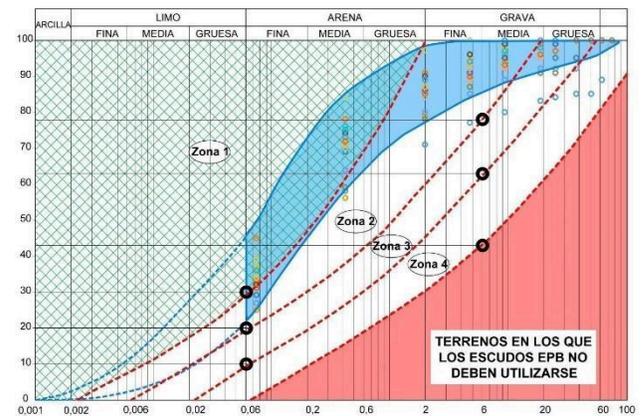


Figura 11. Grados de acondicionamiento necesarios para pumicitas del primer tercio de Línea 7 (desarrollado en el Proyecto Línea 7)

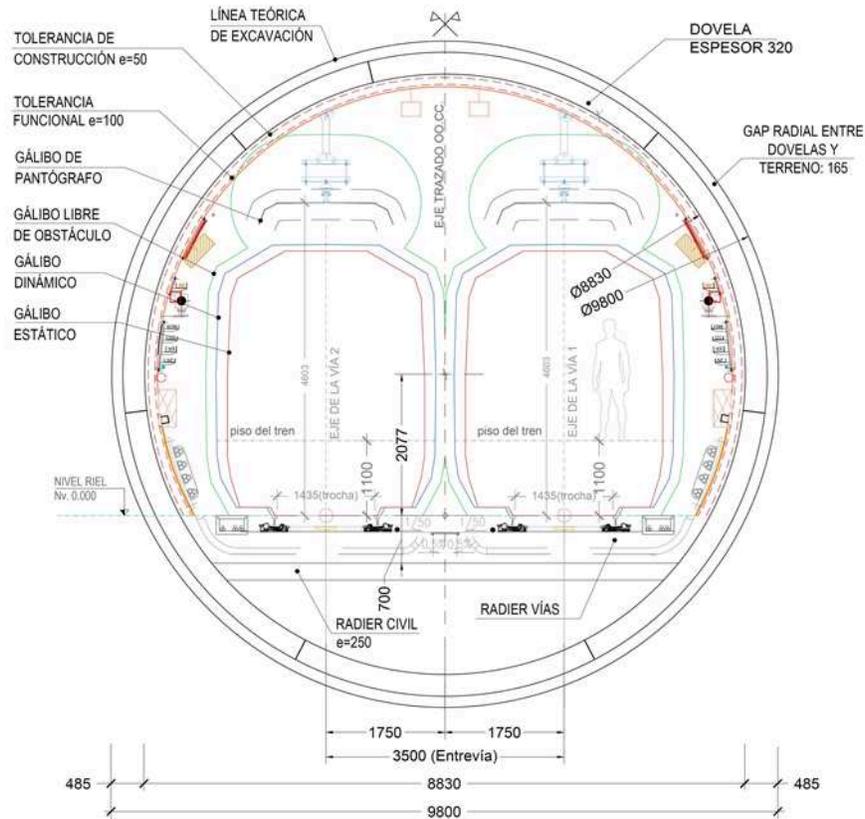


Figura 12. Sección de un túnel interestación de Línea 7 (en recta y en curva) a ejecutar con excavación mecanizada (medidas en mm)

Además del escudo, la tuneladora tiene una estructura de arrastre (Figura 13) constituida por una serie de plataformas donde se alojan los servicios de la tuneladora (cabinas de control, correa transportadora del material excavado, ventilación, etc).

Finalmente, en las Figuras 15, 16, 17 y 18 se presentan distintos momentos de la tuneladora, como su llegada a la obra (Figura 15), el montaje de la rueda de corte (Figura 16) y el inicio de sus operaciones en mayo de 2024 (Figuras 17 y 18).



Figura 13. Tuneladora de Línea 7 montada en fábrica



Figura 14. Dovelas para Línea 7 apiladas por anillos en zona de acopio



Figura 15. Planta productora de dovelas en construcción, zona de acopio de dovelas (con rueda de corte posicionada de modo temporal) y pique de acceso de la tuneladora en construcción (2023)



Figura 16. Montaje de la rueda de corte al escudo de la tuneladora (marzo 2024)



Figura 17. Escudo de la tuneladora (llamada La Matucana) al momento de inicio de sus operaciones (mayo 2024)



Figura 18. Estructura de arrastre de la tuneladora al momento de inicio de sus operaciones (mayo 2024)

3 DESAFÍOS EN PROYECTO AVO II

3.1 Descripción del proyecto y criterios de no afectación

El Proyecto vial Concesión Américo Vespucio Oriente, Tramo Av. Príncipe de Gales - Los Presidentes, conocido como AVO II, es una concesión licitada por el Ministerio de Obras Públicas (MOP) que según se aprecia en la Figura 19 (AVO II, 2024) significa el cierre de la circunvalación Américo Vespucio como autopista urbana. AVO II es un bitubo subterráneo de 5,2 km de longitud que se extiende de modo semiparalelo bajo una parcialidad (3,5 km) de los túneles interestación de la Línea 4 del Metro de Santiago, tal como lo indica de modo referencial la Figura 20 (MOP, 2020).



Figura 19. Red de autopistas urbanas de Santiago. En plomo se aprecian las autopistas existentes, en verde la autopista en construcción AVO II

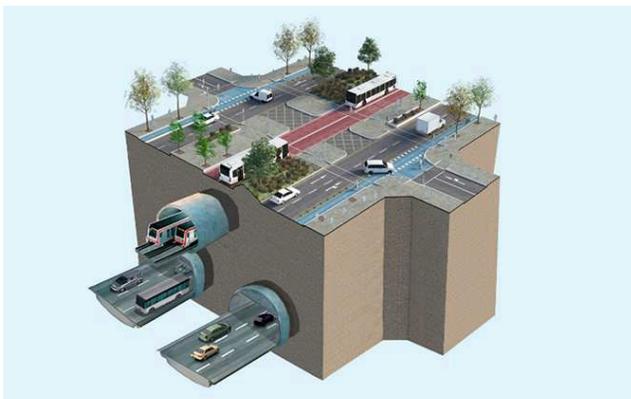


Figura 20. Esquema referencial del bitubo de AVO II bajo la Línea 4 del Metro de Santiago

Cada tubo (túnel) de AVO II consta de 3 pistas (AVO II, 2022). El túnel tiene una sección herradura de 96 m² cuando se excava en gravas (Figura 21) y una sección ovoidal de 131 m² cuando se excava en suelos mixtos (Figura 22).

Durante la licitación de la Concesión AVO II, el Metro de Santiago se coordinó con el Ministerio de Obras Públicas para que se establecieran los siguientes criterios de no afectación estructural y funcional del túnel, del radier y de las vías de Línea 4:

- Asentamiento relativo longitudinal inferior a 1 mm/m
- Deformación transversal entre rieles inferior a 2 mm

Además de los criterios descritos, debido a la complejidad de la obra, el Metro de Santiago acordó con el Ministerio de Obras Públicas la contratación de un Consultor que revisara los diseños del Concesionario mediante la elaboración de modelos de contraste 3D propios.

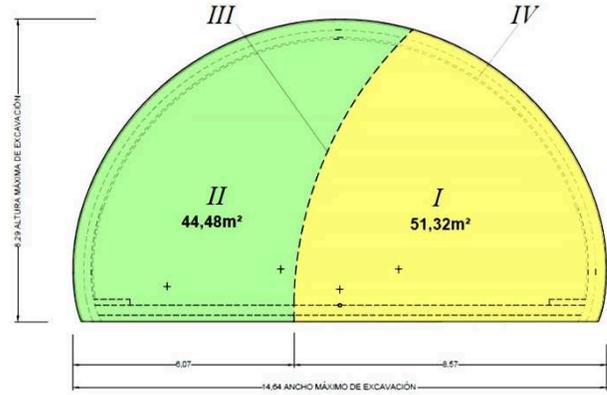


Figura 21. Sección túnel 3 pistas AVO II en gravas bajo Línea 4 del Metro de Santiago

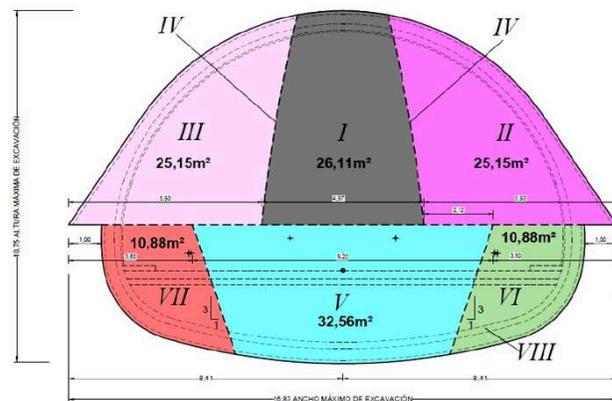


Figura 22. Sección túnel 3 pistas AVO II en suelos mixtos bajo Línea 4 del Metro de Santiago

3.2 Revisión del Metro de Santiago

El proceso de revisión del Metro de Santiago del Proyecto AVO II es descrito por Toledo et al. (2023) en 5 pasos:

- Paso 1: Definición de zonas críticas
- Paso 2: Modelación de contraste 3D
- Paso 3: Verificación de desplazamientos
- Paso 4: Verificación estructural
- Paso 5: Retroalimentación y actualización del diseño

En el Paso 1 se comparan los trazados de Línea 4 y de AVO II para identificar las zonas críticas a modelar, tales como estaciones de Metro, ramales de entrada y salida de AVO II y cruces varios.

En el Paso 2 se desarrollan modelos de contraste 3D con el software FLAC3D, basados en los criterios de diseño de AVO II y en experiencias previas de Metro, incluyendo la calibración con datos de monitoreo de construcciones anteriores.

En el Paso 3 se verifica que los desplazamientos resultantes en el radier y en las vías de Línea 4 no excedan los desplazamientos establecidos en los criterios de no afectación estructural y funcional.

En el Paso 4 se verifica si el túnel de Línea 4 puede resistir las nuevas tensiones impuestas por AVO II y si el diseño estructural de los túneles de AVO II es adecuado.

En el Paso 5 se establece que si los diseños no cumplen los criterios de no afectación estructural y funcional, Metro debe proporcionar retroalimentación al Concesionario para que realice las modificaciones necesarias y se repita el proceso de revisión.

En la Figura 23 se presentan como ejemplo las vistas de un modelo de contraste desarrollado en FLAC3D.

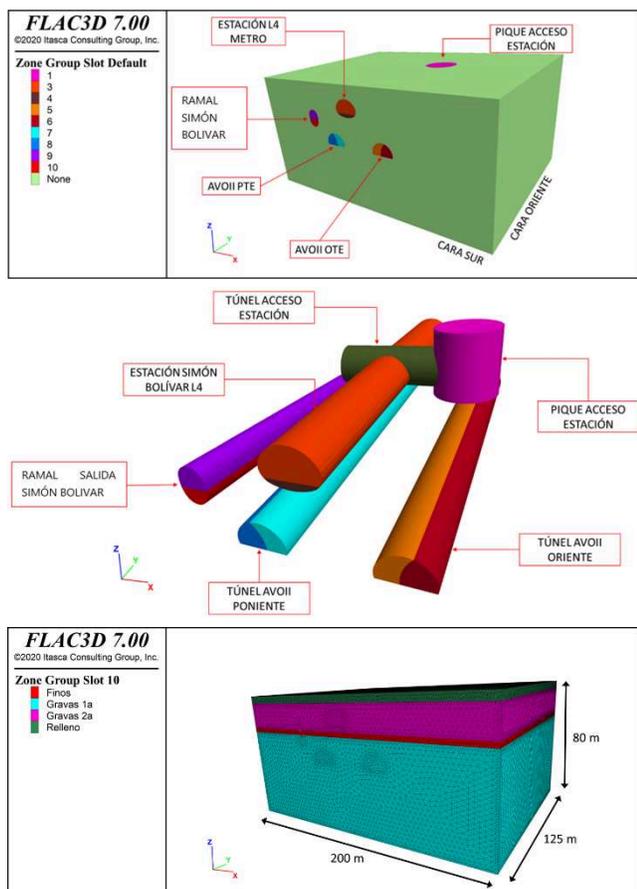


Figura 23. Vistas de un modelo de contraste en FLAC3D en torno a Estación Simón Bolívar de Línea 4 desarrollados por el Metro de Santiago

Es uno de los 13 modelos de contraste elaborados por el Consultor del Metro de Santiago, en particular, en torno a la Estación de Línea 4 Simón Bolívar. Los 13 modelos representan 1.545 m de túnel de Línea 4, incluyendo las cinco estaciones involucradas, 1.695 m de bitubo de AVO II más cinco cavernas y 815 m de ramales de salida de AVO II.

Para la modelación en FLAC3D se ha considerado un modelo constitutivo basado en los criterios de Mohr-Coulomb, adoptando los valores de rigidez y relajación según la experiencia de obras anteriores del Metro de Santiago.

En la Tabla 1 se indican los parámetros del suelo considerados para el diseño y la revisión del Proyecto AVO II.

En la Figura 24 se presenta un ejemplo de la evolución del desplazamiento vertical del eje central del radier del túnel de la Estación Simón Bolívar de Línea 4 según el avance de la excavación de los ramales y túneles de AVO II.

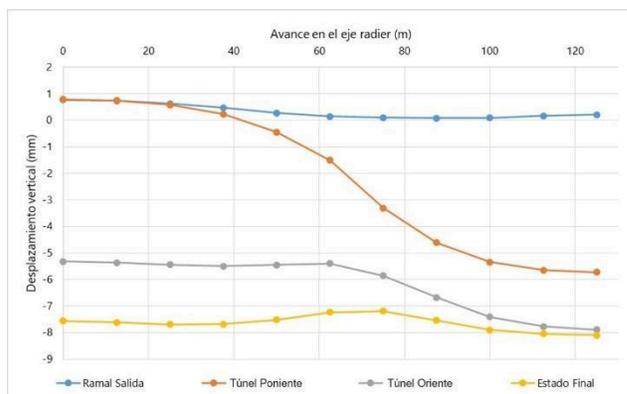


Figura 24. Desplazamiento vertical (mm) del eje central del radier del túnel de la Estación Simón Bolívar de Línea 4 del Metro de Santiago vs el avance de la excavación (m) del ramal de salida y de los túneles de AVO II

De modo complementario a la revisión de los diseños geotécnicos y estructurales de AVO II, el Metro de Santiago ha revisado también la instrumentación proyectada para la etapa de construcción, la que incluye dispositivos de medición en los radieres de los túneles de Línea 4. Durante la ejecución de las obras de AVO II, el Metro de Santiago hará un seguimiento permanente de las excavaciones y de las lecturas de la instrumentación, con el objetivo de verificar que los modelos estén reflejando lo proyectado y por tanto, las obras concluyan dentro de lo previsto.

Tabla 1. Parámetro del suelo considerados para el diseño y la revisión del Proyecto AVO II (z indica la profundidad desde la superficie)

Unidad Litológica	Peso Unitario γ [kN/m ³]	Cohesión c [kPa]	Ángulo de Fricción ϕ [°]	Ángulo de Dilatancia Ψ [°]	Módulo de Deformación E [kPa]	Módulo de Poisson ν []	Coefficiente de Empuje $k_o = \sigma_h / \sigma_v$ []
Rellenos	19	10	33	0	20.000	0,30	0,65
Gravas 2° Depositación	22,5	20	45	12	$46.000z^{0,50}$	0,25	0,80 ($z \leq 20$ m) 0,53 ($z > 20$ m)
Conos de deyección superior (finos)	18,5	30 ($z \leq 10$ m) 50 ($z > 10$ m)	31	0	$20.000 + 2.750z$	0,30	0,65 ($z \leq 21$ m) 0,45 ($z > 21$ m)
Gravas 1° Depositación	22,5	35	45	12	$65.000z^{0,50}$	0,25	0,80 ($z \leq 20$ m) 0,53 ($z > 20$ m)
Conos de deyección inferior (finos)	18,5	30 ($z \leq 12$ m) 50 ($z > 12$ m)	31	0	$20.000 + 2.750z$	0,30	0,65 ($z \leq 21$ m) 0,45 ($z > 21$ m)

4 CONCLUSIONES

La construcción de la Línea 7 está utilizando excavación convencional y excavación mecanizada conforme a las condiciones geotécnicas del trazado, aunque las variables de decisión para elegir uno u otro método se amplían a aspectos logísticos y ambientales. Cabe destacar que al cierre de esta publicación, la tuneladora no ha avanzado más de 20 m, por lo que la integración de la variable experiencia interna, y la descripción de la ejecución del desafío, queda pendiente para otra oportunidad.

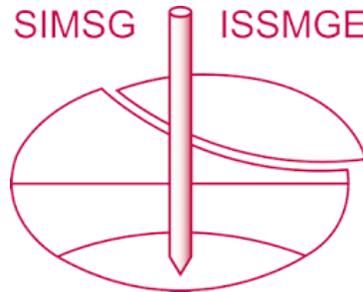
Respecto del Proyecto AVO II, se destaca la coordinación temprana entre el Ministerio de Obras Públicas y el Metro de Santiago para abordar desde la licitación de la Concesión criterios de no afección estructural y funcional de la Línea 4, que se mantendrá en operación durante la construcción de AVO II. Se destaca también la revisión de los diseños del Concesionario con modelos de contraste propios del Metro de Santiago, lo que significa el más alto estándar de revisión de la industria. Finalmente, se destaca que la construcción de AVO II recién comienza, por lo que la descripción de la ejecución del desafío también queda pendiente para otra oportunidad.

- Gomes, A., Gonzalez, E. and Herrera, J. 2019. Experiences with the use of the conventional mined excavation method in the Santiago Metro - Chile. *Proceedings of 2019 SA-NT Symposium* (Adelaide, Australia). Adelaide: Australian Geomechanics Society (AGS) and the Australian Tunnelling Society (ATS).
- González, E., Herrera, J., Valenzuela, G., Argomedo, L., Larenas, J.C., González, H. and Adasme, J. 2017. The development of underground works at Metro de Santiago: half a century of history. *Proceedings of the World Tunnel Congress 2017*, (Bergen, Norway). Oslo: Norwegian Tunnelling Society.
- International Tunnelling Association. 2001. Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines (TBMs). *ITA Working Group No. 14 Mechanized Tunnelling*. 2020. <https://concesiones.mop.gob.cl/noticias/fotografias/AVO-II.jpg>. Acceso 30/04/2024.
- Toledo, M., Cárcamo, V. and Silva, D. 2023. Large highway tunnels under operating metro lines in the soils of Santiago - Design and control approach. *Geomechanics and Tunnelling 16*, No. 6.

5 REFERENCIAS

- AVO II. 2024. <https://avo2.cl/>. Acceso 30/04/2024.
- AVO II. 2022. Proyecto AVO II.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.