

La construcción de los túneles del proyecto Américo Vespucio Oriente 1 en Santiago de Chile

The Construction of the Tunnels of the Américo Vespucio Oriente 1 Project in Santiago de Chile

Manuel de Cabo^{1a*}, José M. Galera^{2a}, Daniel Santos^{3a}, Rodrigo Richmagüi^b, Luis Eusebio Íñigo^c, Luis Felipe García^c, Pedro Gómez^d, Martín Fernández^d, Alejandro Barrera^d, Juan Manuel Molina^d, María Marcos^d, José Vicente Cañas^d, José Ramón Alcalá^d, Antonio Escribano^d

Resumen

La “Concesión Américo Vespucio Oriente, tramo Av. El Salto-Príncipe de Gales” (AVO I) forma parte del ambicioso programa de asociación público-privado, impulsado por el Gobierno de Chile, a través del Ministerio de Obras Públicas, de cerrar en modalidad de autopista el Anillo de Circunvalación Américo Vespucio. AVO I, tras una década de análisis, incorporó en su diseño parte de las demandas e intereses de la comunidad de su área de influencia, trabajo realizado con municipios y organizaciones de la sociedad civil que se mantiene hasta el día de hoy.

El proyecto aborda el desafío de integrar en un espacio urbano una autopista subterránea de tres carriles por sentido, en una longitud de tronco de 8.278 m, de los que 7.678 m discurren en túnel. Considerando además la longitud de los ramales de conexión, el proyecto supone un total de más de 10 km de túnel urbano que se excavan principalmente en las gravas aluviales del río Mapocho.

La Sociedad Concesionaria Vespucio Oriente S.A -conformada por ALEATICA, S.A. y SACYR Concesiones Chile, Spa-, es la encargada de materializar la nueva vía expresa, que beneficiará a más de 50.000 usuarios diarios, al disminuir los tiempos de desplazamiento entre las comunas de Huechuraba y La Reina de 40 a 10 minutos en horario punta. Además, se contempla el rediseño del parque Vespucio, revitalizando esta área verde para todos los habitantes de la ciudad de Santiago.

AVO I, cuyo contrato de construcción lo abordan SACYR y OHLA, es, sin duda, la iniciativa de infraestructura pública más importante en ejecución, no sólo por su magnitud, sino también porque combina una serie de distintos métodos constructivos: viaducto, túnel artificial en trinchera cubierta, túnel minero y túnel híbrido, estos últimos a cargo de Subterra Ingeniería en lo que respecta a la ingeniería y asistencia técnica.

Las obras de construcción comenzaron en noviembre de 2017 y su puesta en servicio se realizó en junio de 2022.

Palabras clave: túnel urbano, túnel en suelo, sostenimiento, NATM, sistema constructivo, convergencia.

Abstract

The Américo Vespucio Oriente, section El Salto-Príncipe de Gales P3 project (AVO I) is part of an ambitious public-private partnership program, promoted by the Government of Chile, through its Ministry for Public Works, consisting of closing the Américo Vespucio ring road. After a decade-long assessment, AVO I incorporated part of the demands and requests of the communities within the project's influence area, a joint effort with the local administrations and civil society organizations still withstanding today.

This project tackled the challenge of integrating an underground highway with three lanes in each direction into an urban space, with a trunk length of 8,278 m, of which 7,678 m run in tunnels. Including the extension of secondary accessways, the project involved over 10 km of urban tunnels, mainly concentrated in the alluvial deposits of the Mapocho River.

The Vespucio Oriente S.A. P3 company (ALEATICA, S.A. and SACYR Concesiones Chile, Spa) is responsible for building the new expressway, that will impact the lives of over 50,000 daily users, by reducing travel times between Huechuraba and La Reina, from 40 to 10 minutes in rush hour. The project also included the redesign of Vespucio Park, revitalizing this garden space for all citizens of Santiago.

AVO I, a construction project by SACYR and OHLA, is undoubtedly the most important public infrastructure initiative in operation, not only for its scope, but also for the wide range of construction methods involved: Viaduct, cut and cover artificial tunnels, mine tunnels, and hybrid tunnels. The latter were executed by Subterra Ingeniería in the engineering and technical assistance regard.

Construction works started in November 2017, and the project was delivered in June 2022.

Keywords: Urban tunnel, underground tunnel, tunnel support, NATM, building techniques, convergence.

1. INTRODUCCIÓN

La “Concesión Américo Vespucio Oriente, Tramo Av. El Salto-Príncipe de Gales” (AVO I) forma parte del ambicioso programa de asociación público-privado,

impulsado por el Gobierno de Chile, a través del Ministerio de Obras Públicas, de cerrar en modalidad de autopista el Anillo de Circunvalación Américo Vespucio. La figura 1 muestra una planta general de situación del proyecto AVO I.

El proyecto aborda el desafío de integrar en un espacio urbano una autopista subterránea de tres carriles por sentido, en una longitud de 8.278 m, de los que 7.678 m discurren en túnel.

Desde el punto de vista de la tipología constructiva de las obras subterráneas, se pueden diferenciar los siguientes tres tramos:

- **Cruce del Cerro:** 2.100 m del túnel de La Pirámide y 415 m del túnel ramal Mapocho. Se trata de dos túneles en mina de 2 y 3 carriles y una caverna de bifurcación situados bajo el cordón del Cerro San Cristóbal. El túnel de La Pirámide cruza bajo el cauce del río Mapocho y la salida del ramal va adosada a las defensas del río. En esta zona, conectando con el túnel principal se ubica un pozo o pique de ventilación de 15 m de diámetro y 32,5 m de profundidad.
- **Tramo urbano en falso túnel:** 2.891 m de falso túnel en trinchera de pilotes habilitando dos niveles de plataforma subterráneos emplazados a lo largo de la bandeja central del bulevar que configura el actual parque central de la avenida Américo Vespucio. En este tramo se ubican siete ramales de entrada y salida en la concesión.
- **Tramo urbano en sección híbrida:** 2.687 m del túnel híbrido, configurado con un túnel con NATM en el nivel -1 y mediante pantalla de pilotes en el nivel -2. En este tramo se ubican dos ramales de salida y cinco de entrada, que se construyen principalmente en mina.



Figura 1. Planta de situación del Proyecto AVO1 (Fuente: Elaboración propia).

La figura 2 muestra un esquema con la distribución de estas tres tipologías constructivas adoptadas en el proyecto AVO I.

El proyecto supone un total de más de 10 km de túnel urbano que se excavan principalmente en las gravas aluviales del río Mapocho. Únicamente se interceptan materiales rocosos bajo el cerro San Cristóbal, constituidos por tobas y andesitas del Cretácico.

Las obras comenzaron en noviembre de 2017 y su puesta en servicio se realizó en junio de 2022.

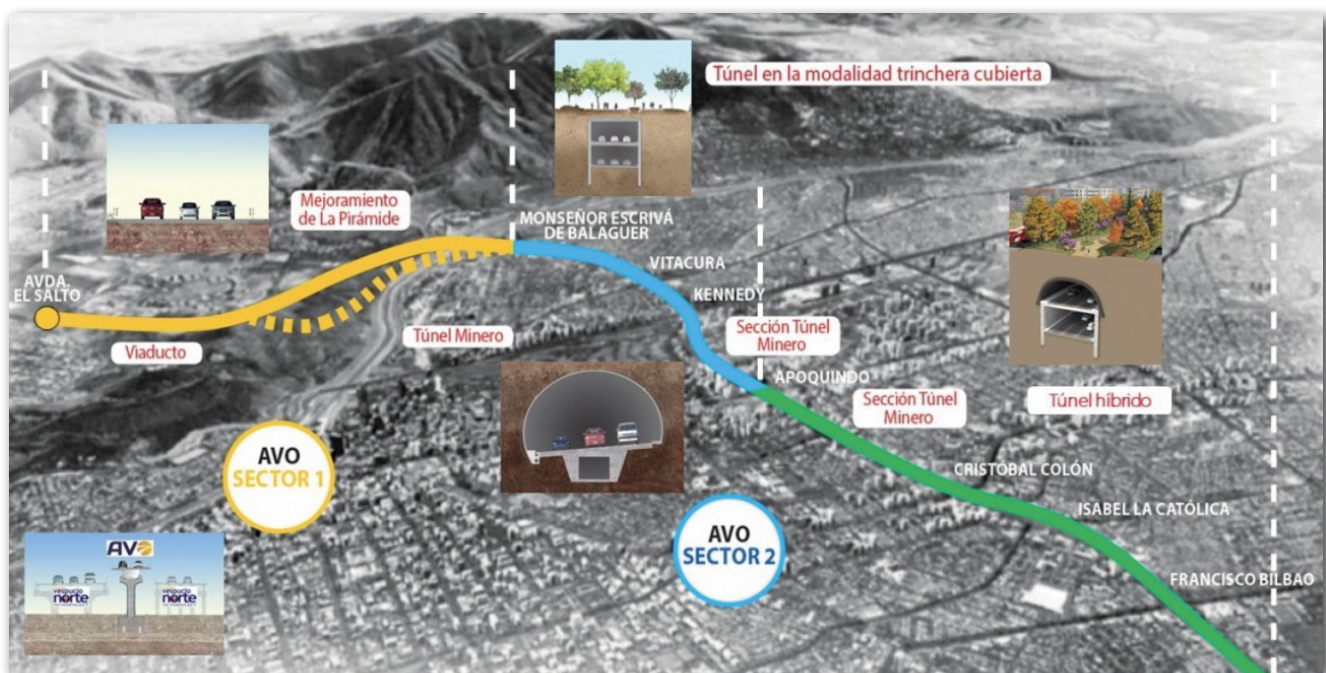


Figura 2. Esquema general de la concesión AVO1 (Fuente: Elaboración propia).

* Autor de contacto: mdecabo@subterra-ing.com

¹ Ingeniero técnico de obras públicas.

² Doctor ingeniero de minas.

³ Ingeniero de caminos, canales y puertos.

^a Subterra Ingeniería.

^b MOP.

^c Sociedad Concesionaria AVO.

^d Constructora Vespucio Oriente (OHLA-SACYR).

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El proyecto de la concesión AVO I abarca un conjunto de obras subterráneas muy diverso, con diferentes secciones tipo de túneles en mina y trincheras. El gálibo estándar del proyecto se podría identificar como aquel asociado a una plataforma de 3 carriles y que cuenta con 13,20 m de anchura. También la geología, geotecnia e hidrogeología del proyecto configuran diferentes escenarios a lo largo del trazado, como un macizo rocoso terciario en el paso a través de un cerro, el cruce bajo el río Mapocho o los materiales cuaternarios presentes en la zona más urbana del proyecto.

Se describen a continuación las principales características de las obras subterráneas del proyecto.

2.1. Datos geológicos

La ciudad de Santiago está emplazada principalmente en un llano conocido como "cuenca de Santiago". Esta cuenca forma parte de la Depresión Intermedia y está delimitada claramente por el cordón de Chacabuco por el norte, la Cordillera de los Andes por el este, las angosturas de Paine por el sur y la Cordillera de la Costa por el oeste.

En las zonas circundantes a la cuenca de Santiago, se pueden distinguir varias zonas de relieves pre-andinos pronunciados. El túnel de La Pirámide se emplaza en uno de estos relieves, conocido como el Cordón del Cerro San Cristóbal en el que se pueden distinguir (Aguirre, 1960) varios tipos de rocas volcánicas y continentales estratificadas de la Formación Abanico (Cretácico superior a Oligoceno). También están presentes algunos depósitos de rocas intrusivas del Mioceno. Finalmente, existen algunos depósitos cuaternarios no consolidados (aluvial, glacial, ceniza volcánica, sedimentos lacustres, etc.). Los tramos en trincheras de pilotes y la sección híbrida se emplazan en estos sedimentos, concretamente en la Unidad de Gravas del río Mapocho, formados por gravas de origen fluvial, pudiendo contener intercalaciones de depósitos volcánicos y destacando su elevada capacidad de soporte debido a su elevada compacidad y unión mecánica de partículas. Esta unidad tradicionalmente se ha dividido en dos niveles, la "2ª depositación" y la "1ª

depositación", siendo la principal diferencia entre ambas la mayor plasticidad de la fracción fina en el caso de la "1ª depositación", más antigua.

En la figura 3 se muestra el perfil geológico longitudinal del túnel.

Chile es uno de los países con mayor sismicidad del planeta, al encontrarse en el contacto de las placas de Nazca y Sudamericana, donde se produce la subducción de la primera bajo la segunda.

Para la cuantificación de las acciones sísmicas de diseño se han considerado las normas NCh 433-Of-96 y NCh 2475, así como el Manual de Carreteras, Volumen 3 (Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas). La Aceleración Máxima del Suelo obtenida es $A_0 = 0,3 \text{ g}$ y se ha considerado una Desangulación Sísmica de Diseño para las obras subterráneas de $\theta_s = 2,5 \times 10^{-4}$ para el túnel de La Pirámide y de $\theta_s = 3,5 \times 10^{-4}$ para las trincheras y sección híbrida.

Finalmente, el contexto hidrogeológico de la traza se encuentra conformado por la posición del nivel freático de Santiago, ubicada por debajo de la rasante de la traza, y por la existencia de niveles discontinuos de napas colgadas asociadas a niveles de gravas arcillosas en torno a los 20 a 25 m de profundidad. En la zona de cruce de la traza bajo el río Mapocho, el nivel freático también se ubica por debajo de la misma, existiendo una recarga natural del río al acuífero, pero de poca entidad dado que el cauce en esta zona se encuentra revestido.

2.2. Datos geotécnicos

Como se ha comentado, los materiales presentes en el emplazamiento se encuentran constituidos por un macizo rocoso convencional (Unidad Abanico) y por los depósitos cuaternarios de las Gravas del Mapocho. Para estimar las propiedades del macizo rocoso atravesado por el túnel se ha empleado la metodología habitual, consistente en la determinación de las propiedades de la roca intacta de todos los litotipos existentes para posteriormente minorarlas según distintos rangos de calidad geomecánica.

Respecto a las propiedades geotécnicas de las Unidades de Gravas del Mapocho de 1ª y 2ª depositación, se han

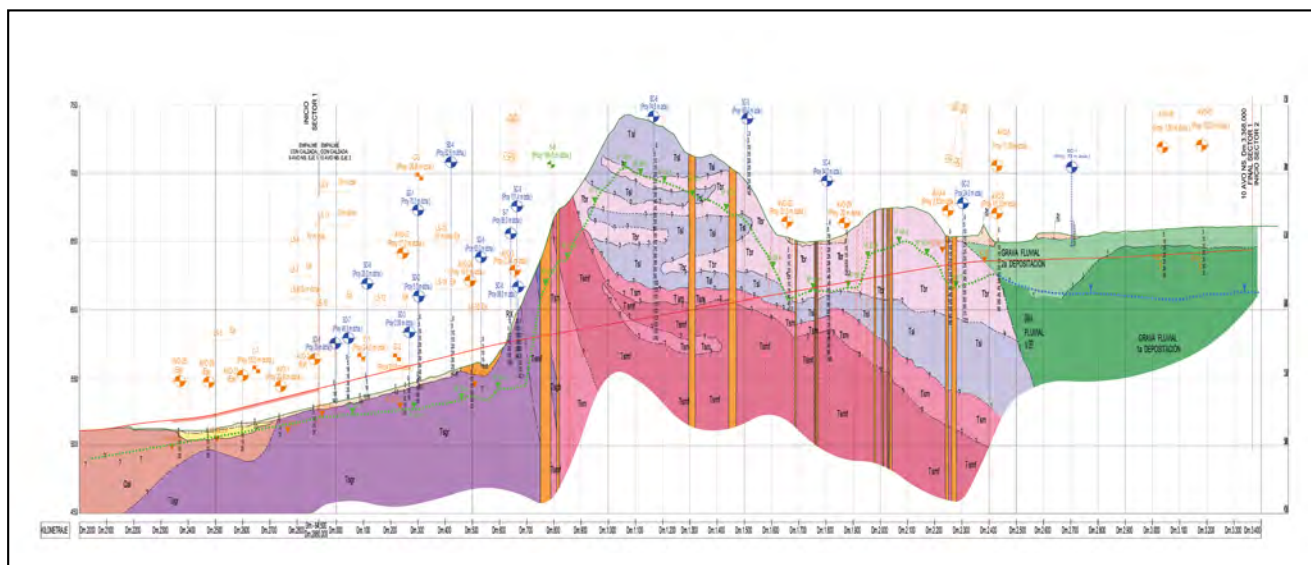


Figura 3. Perfil geológico longitudinal AVO1 (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 1. Parámetros geotécnicos. Unidades rocosas

Unidad	Coficiente Empuje K_0	Densidad kN/m^3	Módulo MPa	Cohesión kPa	Ángulo fricción
Rellenos	0,5	17,0	20	10	33
2ª Deposit.	0,65	22,5	100 ($Z \leq 5$) $42 \cdot Z^{0.55}$ ($5 < Z < 17$)	25	45
1ª Deposit.	0,65	22,5	$55 \cdot Z^{0.53}$ ($Z \geq 17m$)	35	48

Tabla 2. Parámetros geotécnicos. Suelos (Z = profundidad)

RMR	Cobertera	Densidad kN/m^3	Módulo MPa	Cohesión MPa	Ángulo fricción
>65	155	25,5	5.522	1,7	55
55-65	155	25,5	3.168	0,9	50
45-55	120	25,5	1.291	0,4	41
35-45	110	25,5	838	0,3	38
<35	50	25,5	521	0,2	44

considerado las propiedades consensuadas en las numerosas publicaciones existentes acerca del Ripio de Santiago

Las tablas 1 y 2 muestran los parámetros geotécnicos considerados para cada unidad.

2.3. Descripción de soluciones constructivas

A lo largo de los 8 km de longitud de la concesión, los condicionantes, geométricos, geotécnicos, sociales, ambientales, etc., son muy diferentes. Por ello, incluso en lo referente a las obras subterráneas, las soluciones constructivas diseñadas adoptan muy diversas tipologías en lo que es el resultado de una interacción intensa entre las áreas de ingeniería y construcción. A continuación, se expone la configuración de las diferentes soluciones constructivas del proyecto.

2.3.1. Cruce del cerro

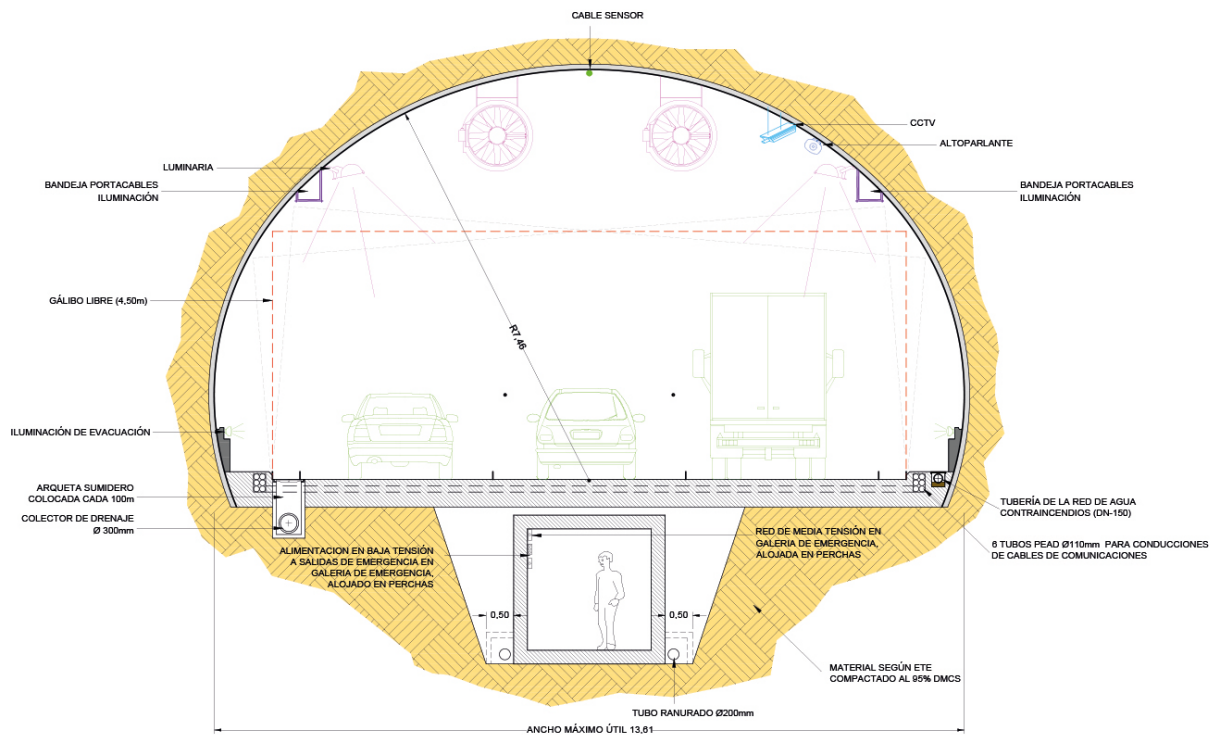
El paso bajo el cerro San Cristóbal supone atravesar un macizo rocoso de calidad media con recubrimientos máximos en el entorno de los 150 m y sin apenas presencia de edificaciones. Por ello, la solución constructiva adoptada corresponde a la de túnel en mina.

La sección funcional del túnel de La Pirámide aloja tres carriles de circulación de 3,50 m, arce- nes de 0,50 m y

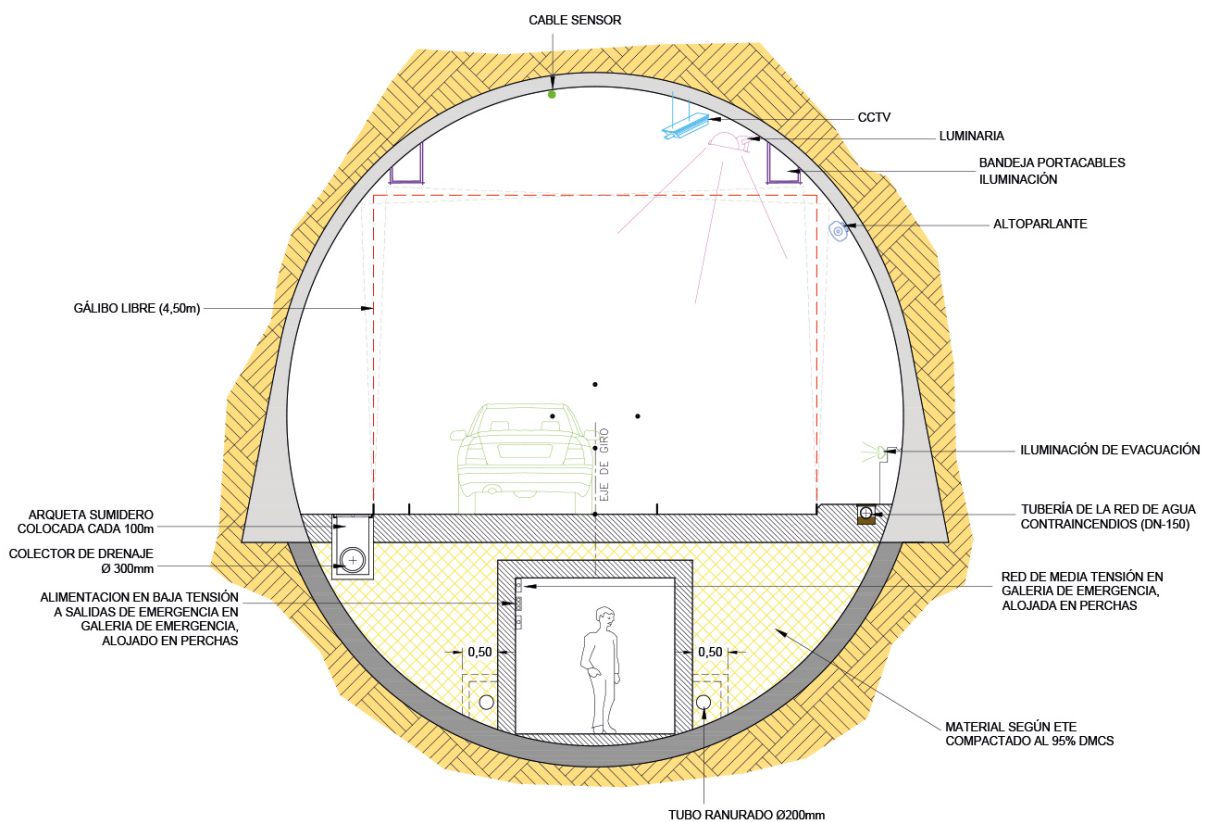
aceras de 0,75 m, lo que configura una anchura útil total de 13,0 m. La sección funcional del túnel ramal del Mapocho aloja un carril de circulación de 3,50 m de ancho, bermas de 0,50 y 2,25 m de ancho y una acera 0,75 m., lo que configura una anchura útil total de 7,0 m. Se ha respetado un gálibo libre de 4,5 m. En las figuras 4 y 5 se muestra la sección funcional del túnel de La Pirámide y del túnel ramal del Mapocho.

La caverna de bifurcación se ha estructurado mediante cinco secciones tipo que proveen, de manera escalonada, el espacio necesario para alojar las dimensiones de la bifurcación entre las plataformas del tronco y del ramal. La sección más amplia presenta una anchura de 27,35 m., permitiendo comenzar la excavación independiente de ambos túneles. En la figura 6 se muestra la sección máxima de la caverna de bifurcación.

La seguridad del túnel en cuanto a su evacuación se estructura a través de una galería peatonal ubicada bajo las plataformas del túnel principal y del ramal. Se han previsto nichos de acceso a la galería espaciados cada 250 m. En función de la calidad geomecánica del terreno atravesado, la implantación de esta galería en la sección se efectuará a través de una trinchera o mediante el cierre de una contra- bóveda estructural.



SECCIÓN RECTA



SECCIÓN RECTA

Figuras 4-5. Sección funcional del túnel de La Pirámide y del ramal Mapocho.

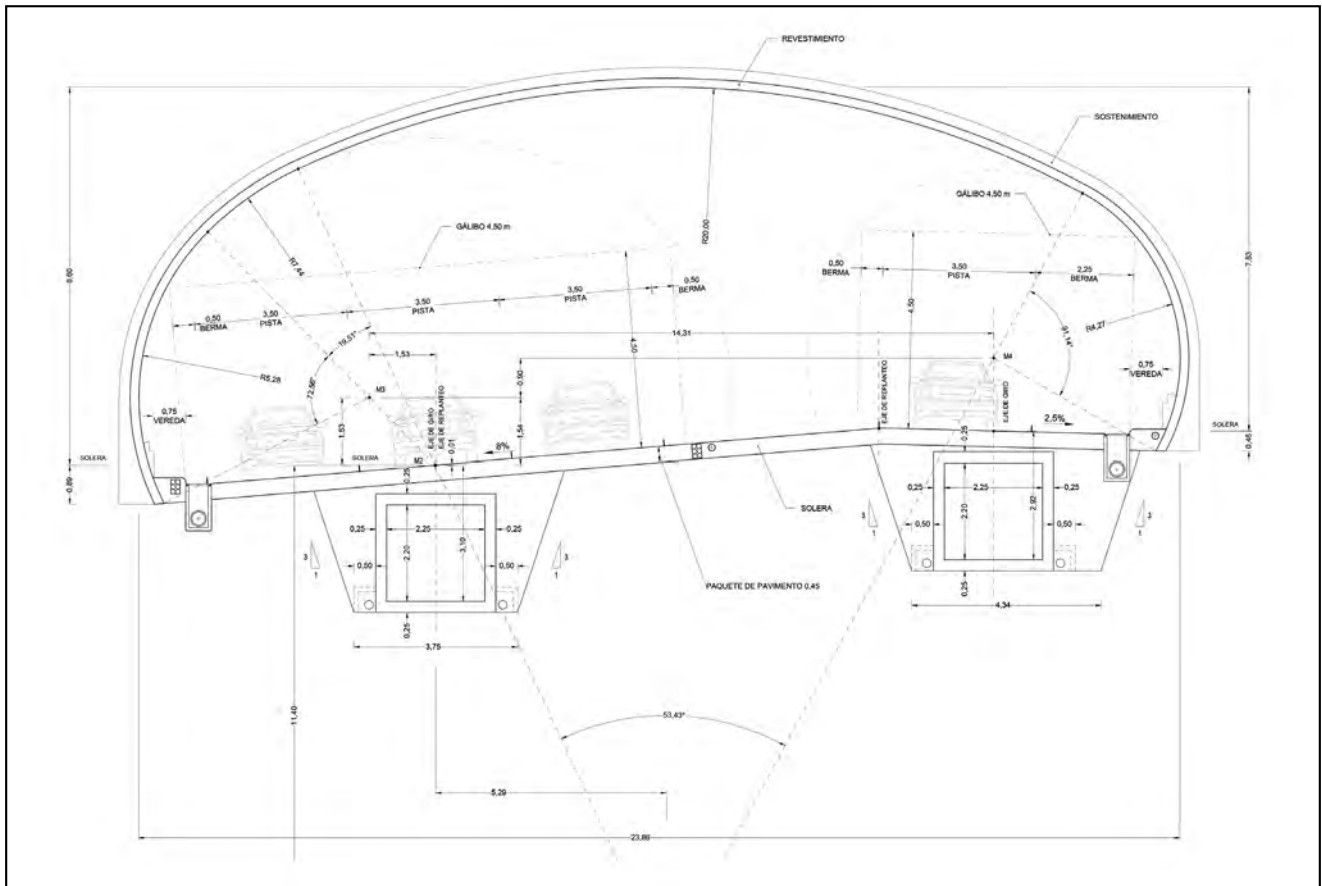


Figura 6. Sección funcional de la caverna de bifurcación.

2.3.2. Tramo urbano en falso túnel

En la zona comprendida entre el portal del túnel de La Pirámide y el nudo Apoquindo, el trazado atraviesa una zona muy densamente poblada. El trazado discurre bajo el bulevar central de la avenida Vespucio, que posee anchura suficiente para que la construcción de un túnel en trinchera no suponga un corte en el tráfico de la misma, limitado por los servicios existentes de las comunas de Vitacura y Las Condes. Además, la existencia de una cantidad abordable de necesidades de desvíos de servicios ha posibilitado este tipo de solución.

La sección funcional en las trincheras debe habilitar dos sentidos de circulación a diferente nivel. Conserva el ancho de 3 carriles descrito anteriormente, añadiendo 0,10 m a cada lado para acabados y 1,5 m en la altura para señalética y ventilación con lo que se alcanzan unas dimensiones de 13,20 x 6,0 m. La anchura en las trincheras va siendo variable debido al desdoble de carriles de bifurcación para habilitar las conexiones de la concesión con las vialidades locales de superficie.

La configuración de falso túnel es la siguiente: la contención de tierras se resuelve mediante pilotes de 1 o 1,2 m de diámetro con separaciones que oscilan entre 2 y 5 diámetros. Estas alineaciones de pilotes quedan acodadas por la losa de cubierta y la losa del nivel -1 y, cuando es necesario, por niveles de estampidores de hormigón armado. La plataforma del nivel -2 no es estructural. La contención del espacio entre pilotes se resuelve mediante un muro forro. Las losas, que en algunas zonas alcanzan los 21 m de luz, en la mayoría de los casos son aligeradas y postensadas. La losa de cubierta se sitúa a 2 m bajo la superficie del bulevar

con el objeto de permitir la restitución del arbolado original. En la figura 7 se muestra una sección tipo de trinchera troncal.

Cada 225 m se han previsto pozos adosados que habilitan salidas de emergencia a la superficie. Asimismo, se prevén varios pozos de ventilación.

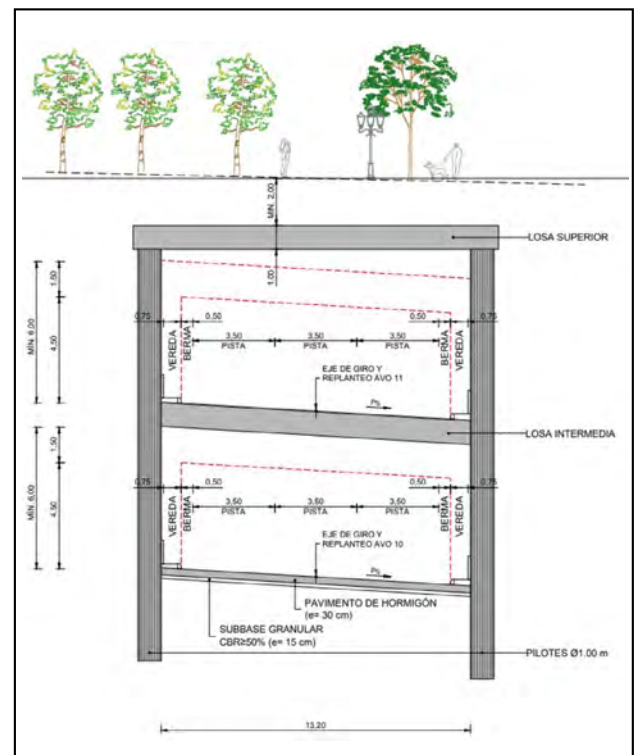


Figura 7. Sección funcional trinchera bulevar.

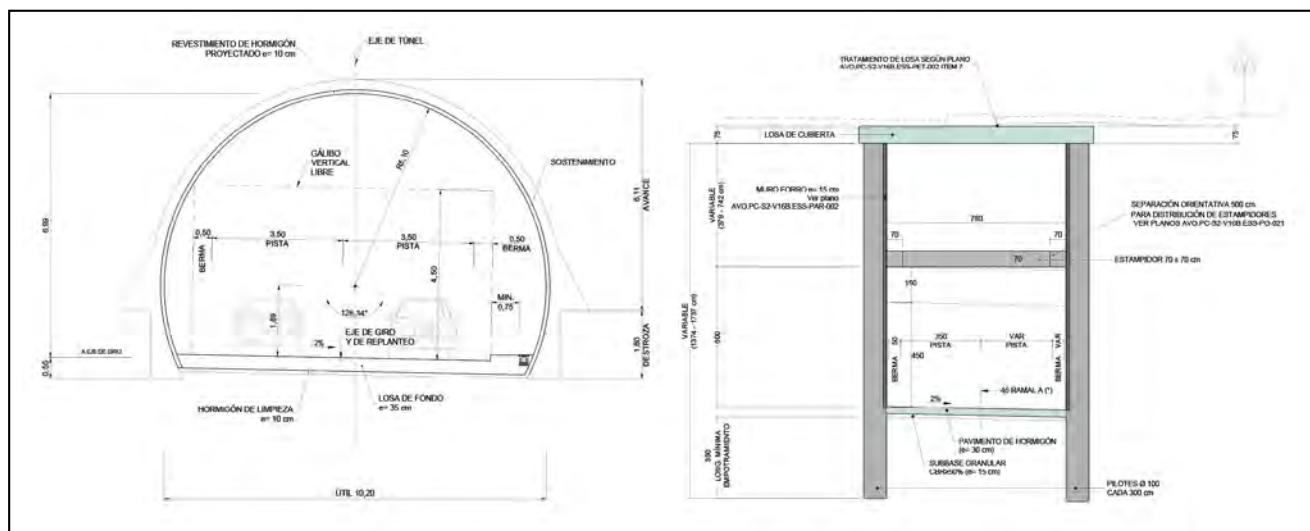


Figura 8. Secciones funcionales ramales. Trinchera y túnel.

Los ramales de salida adoptan soluciones tipo túnel o trinchera de pilotes en función de la profundidad y de la presencia de servicios. En la figura 8 se muestra una sección tipo de ramal en túnel y en trinchera.

2.3.3. Tramo urbano en sección híbrida

En el tramo comprendido entre el nudo Apoquindo y la intersección con la avenida Príncipe de Gales (final de la concesión), el trazado atraviesa las comunas de Las Condes y La Reina, una zona muy densamente poblada en donde la avenida Vespucio interseca con varias arterias importantes de la ciudad (avenidas Apoquindo, Cristóbal Colón, Isabel la Católica, Francisco Bilbao y Príncipe de Gales). Esto, en añadido sobre una notable existencia de servicios existentes, ha condicionado la necesidad de asumir una solución en subterráneo minimizando las afectaciones en superficie, además de la conexión con el siguiente tramo perteneciente a la concesión AVO 2, el cual se encuentra a una profundidad de aproximadamente 35 m. En base al

conjunto de condicionantes se ha diseñado una solución en sección híbrida de túnel que permite habilitar los anchos de plataforma asociados al tronco, así como cada una de las conexiones con los ramales del proyecto. Las anchuras y alturas de gálbos corresponden al mismo esquema comentado anteriormente.

El gálbo asociado a la plataforma del nivel -1 se resuelve mediante una estructura de túnel en mina convencional mientras que el nivel -2 se resuelve mediante una estructura tipo trinchera cubierta convencional mediante pilotes de 1,00 x 1,00 m con distintas separaciones y un empotramiento mínimo de 3,5 m que quedan acodados en cabeza mediante losas postensadas que a su vez constituyen la plataforma del nivel -1. El espacio entre pilotes se refuerza mediante un muro forro.

En esta solución el sistema de evacuación se articula mediante nichos de conexión entre niveles ubicados también cada 225 m. Igualmente, se prevén tres pozos de ventilación que mediante pilotes y galerías conectan la superficie con cada plataforma de circulación.

En la figura 9 se muestra una sección tipo de túnel híbrido.

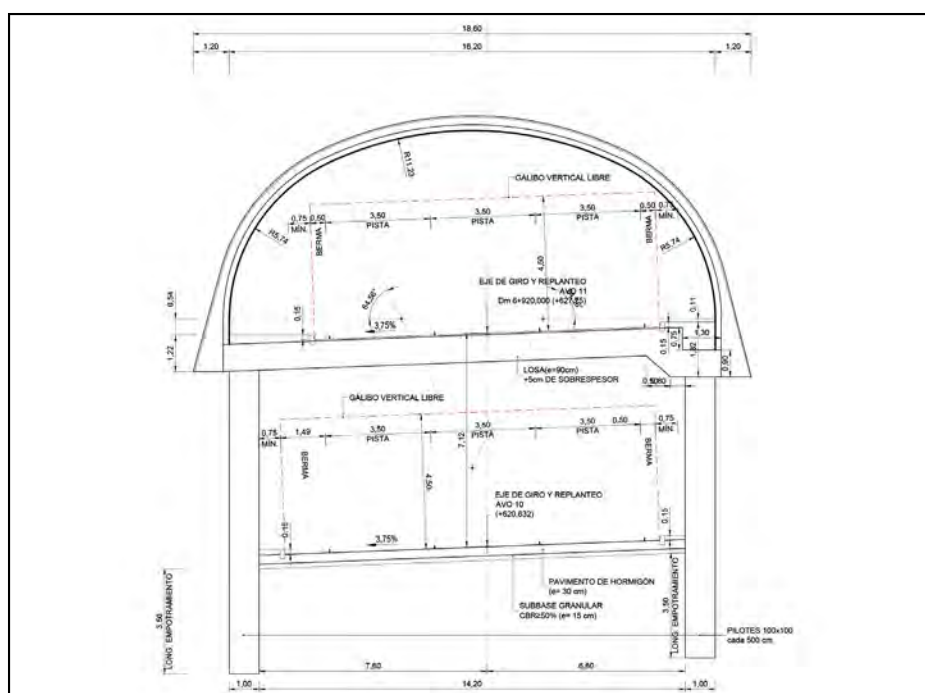


Figura 9. Sección funcional. Túnel híbrido.

2.3.4. Nudo Kennedy

La concesión de Américo Vespucio Oriente se cruza a la altura de la avenida Presidente Kennedy con la concesión de Santiago Centro Oriente (SCO), formando el enlace Kennedy, entre el Dm 4+647 y el Dm 5+000 del eje AVO NS. Este enlace constituye una zona de gran complejidad, tanto desde el punto de vista de trazado como estructural.

Para el cruce del enlace, el trazado de los dos niveles de circulación de Américo Vespucio discurre por debajo de los distintos ejes que configuran el nuevo Enlace Kennedy (y que pertenecen a la concesión de Santiago Centro Oriente), utilizando parte de las estructuras que dejó ejecutadas esta concesión.

Ha habido que tener en cuenta la relación geométrica y estructural entre las obras a construir por AVO y las ejecutadas por SCO. Una vez construidas las obras por parte del proyecto Santiago Centro Oriente, el concesionario de AVO ha podido construir en el interior de esa configuración, el resto de las trincheras en dos niveles o simples sin necesidad de afectar las obras del primer proyecto que se encontrarán habilitadas al tránsito público, así como los ramales en túnel minero proyectados en el enlace. En la figura 10 se muestra una planta de este enlace donde se indica con distintos colores, las estructuras de trincheras existentes previamente al paso de AVO.



Figura 10. Planta del nudo Kennedy con la ubicación de las estructuras SCO existentes (Fuente: SACYR).

El tronco principal (núcleo central) de Américo Vespucio aprovechó las pantallas laterales de pilotes que la concesión de Santiago Centro Oriente dejó construidas, salvo un tramo que se ejecutará en túnel minero bajo las pistas existentes de la avenida Kennedy y los puentes de Vespucio-Enlace Kennedy SCO.

El enlace se completa con diferentes ramales de conexión que conectan las dos concesiones, que son:

- **Ramal 1C:** que permitirá la conectividad de los flujos expresos de Kennedy dirección al oriente hacia AVO expresa dirección al sur.
- **Ramal 5:** que permite la conectividad de la Expresa de AVO con sentido sur-norte, hacia la Expresa de CS.
- **Ramal 5A:** que es una derivación del ramal 5 que permitirá conectar la Expresa de Vespucio Oriente, en dirección al norte con la Expresa de Kennedy en dirección a oriente.

- **Ramal A:** en las cercanías de la calle El Tamarugo, se origina el ramal de conexión hacia el sur (ramal A) pasando en mina bajo todas las estructuras proyectadas para las calzadas de la avenida Kennedy. Una vez que cruza las estructuras de Kennedy, el túnel se transforma en una trinchera adosada a la estructura de la trinchera de AVO, mediante la estructura E19, empalmándose al nivel -2 de ésta con dirección al sur.
- **Ramal A1:** este ramal se desarrolla en túnel a partir de la sección especial de túnel descrita para el Ramal A en el punto anterior, desplazándose bajo las calzadas locales tanto de Kennedy como de Américo Vespucio, para una vez que la separación entre ambas estructuras aconseje cambiar a estructura adosada, esta se transformó en una trinchera cubierta adosada empalmándose al nivel -1 de la trinchera cubierta de AVO con dirección al norte.

En las figuras 11, 12, 13 y 14 se muestra cómo se desarrollan los principales movimientos de estos ramales.

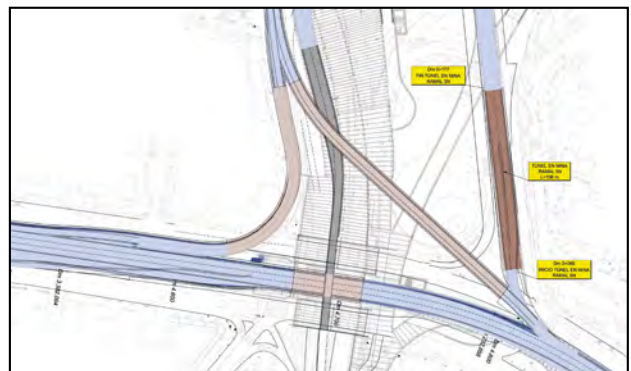


Figura 11. Ramal 1C.

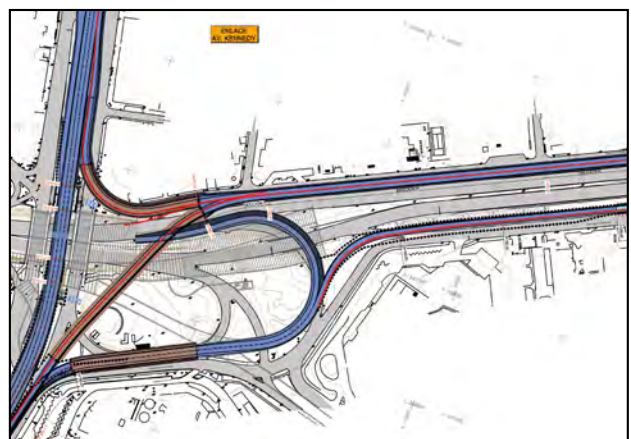


Figura 12. Ramal 5 y 5A.

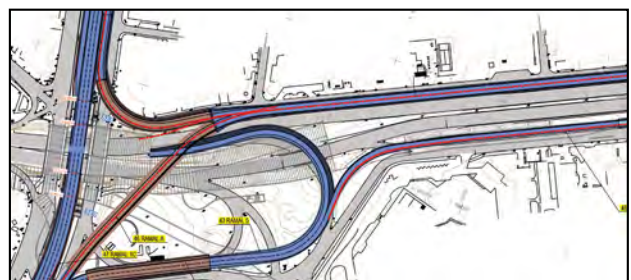
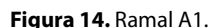


Figura 13. Ramal A.



2.3.5. Nudo Apoquindo

En este tramo el tronco de AVO adopta la configuración en sección híbrida de túnel. Cabe incidir en que es en esta zona del trazado que discurre bajo los aparcamientos donde se produce el entronque con los ramales de Los

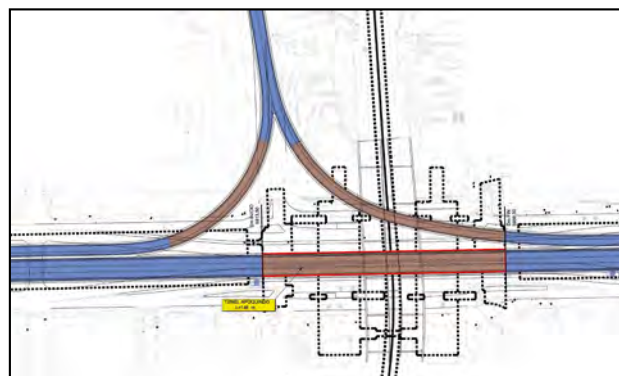


Figura 15. Planta del nudo Apoquindo.

Adicionalmente el cruce bajo los aparcamientos se ha efectuado, en la zona más crítica, con una distancia mínima de 3,5 m entre la cimentación del aparcamiento y la bóveda de la caverna.

En la figura 16 se muestran dos de los modelos de cálculo tridimensionales realizados para analizar el cruce bajo la línea 1 del Metro de Santiago y los dos centros comerciales, y el paso bajo uno de los estacionamientos.

En las figuras 17 y 18 se muestran las secciones de los túneles en este nudo que, como se ha indicado para el tronco, poseen la tipología de túnel híbrido y que para los ramales alcanza cavernas de más de 25 m de anchura de excavación.

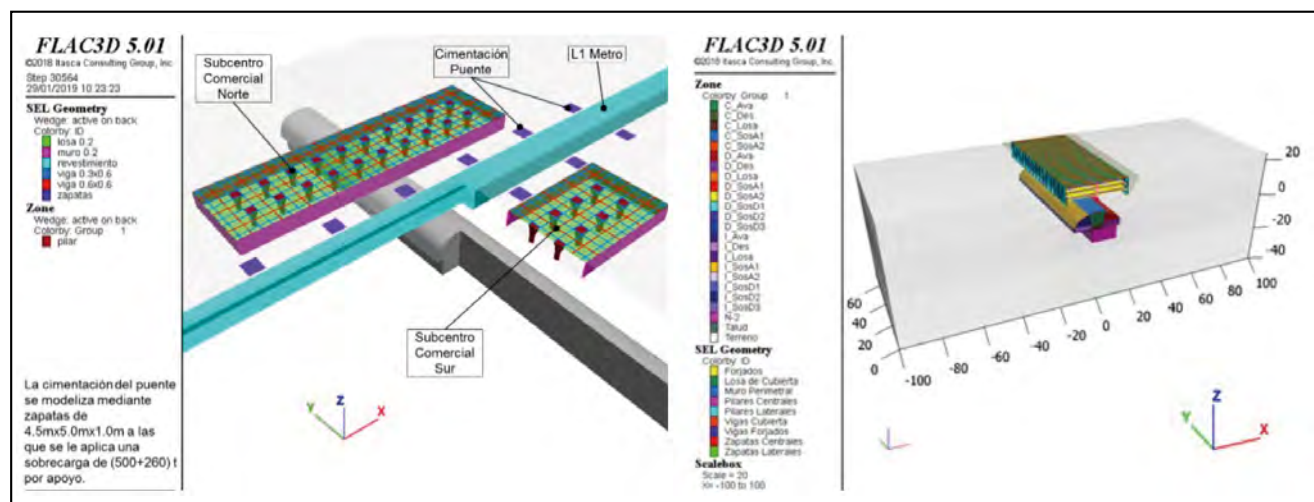


Figura 16. Modelos 3D empleado en el nudo Apoquindo para el cruce bajo el Metro y bajo los estacionamientos subterráneos existentes.

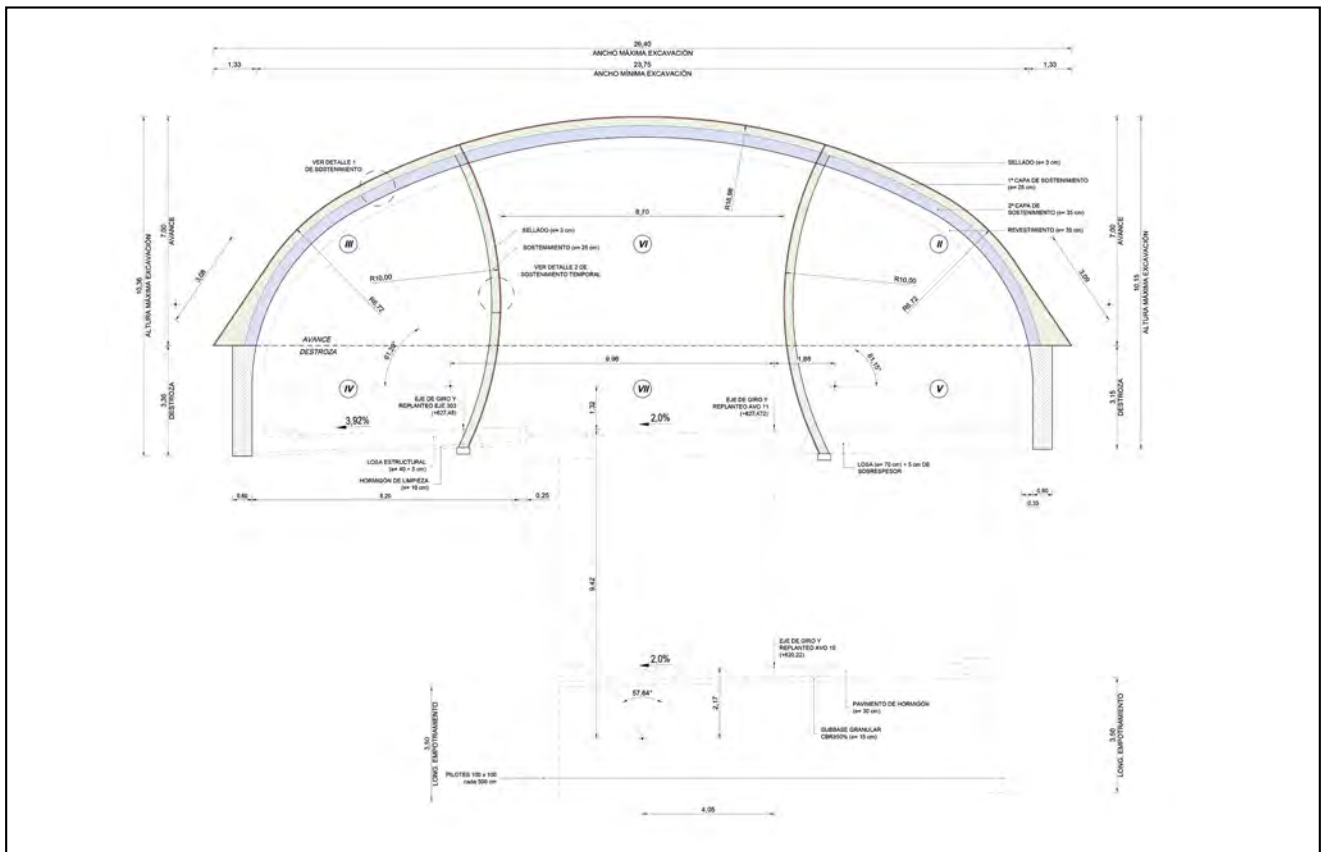


Figura 17. Sección híbrida en cruce bajo aparcamientos.

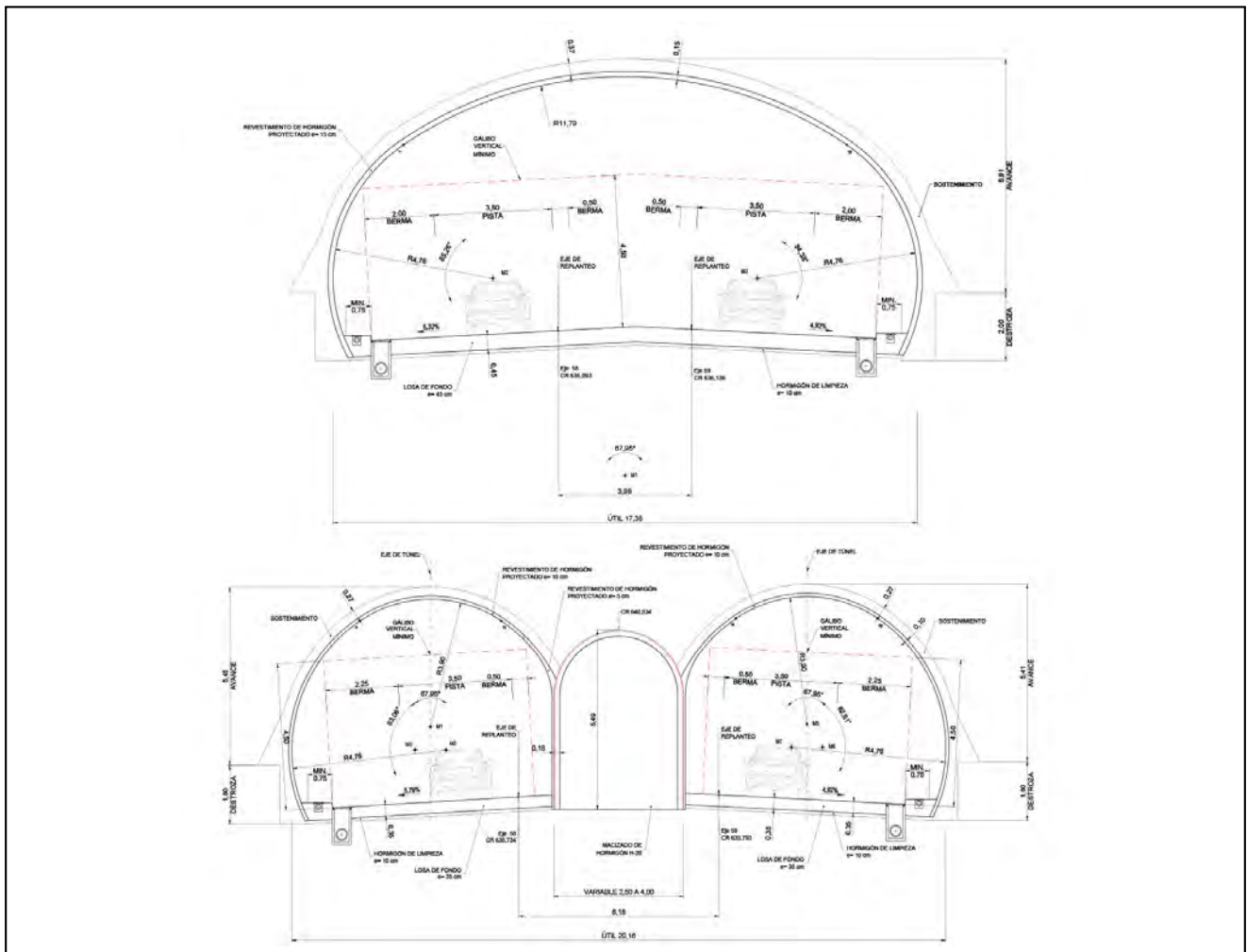


Figura 18. Secciones de bifurcación del ramal de Los Militares.

2.4. Descripción de los métodos constructivos

Las diferentes soluciones constructivas diseñadas conllevan diferentes procesos constructivos y medios necesarios para su ejecución. A continuación, se exponen estos aspectos para cada zona del proyecto.

2.4.1. Cruce del cerro

Los túneles que atraviesan el cerro interceptarán formaciones rocosas de calidad variable, así como terrenos tipo suelo. Estos terrenos resultan propicios para su excavación y refuerzo por medios convencionales mediante la aplicación de sostenimientos flexibles basados en hormigón proyectado, pernos y marcos metálicos, siguiendo la filosofía constructiva conocida como *Nuevo Método Austriaco*. La excavación se lleva a cabo mediante explosivos en las zonas de terreno más resistentes, y mediante medios mecánicos en los terrenos más blandos y de peor calidad geotécnica.

Las secciones de los túneles presentan unas dimensiones muy notables siendo necesario abordar su excavación por fases.

Para el túnel de La Pirámide:

- En terrenos de RMR superior a 45 puntos la excavación se realiza en 3 fases, avance, destroza y zanja para galería de evacuación.
- Para RMR entre 35 y 45 puntos la excavación se realiza en 4 fases, avance, destroza en dos bancos desfasados y zanja para galería de evacuación.
- Para RMR inferior a 35 puntos la excavación se realiza en 5 fases, avance y destroza en tres etapas, primero una zanja central y posteriormente los laterales manteniendo siempre un desfase entre ambos. Finalmente se excava la contrabóveda.

Para el ramal del Mapocho se han previsto dos fases de excavación en todo su trazado, avance y destroza.

Para la caverna de bifurcación, la sección de mayores dimensiones supera los 250 m² con una anchura de excavación de 27 m y una altura de 9 m. Estas dimensiones exigen subdividir la excavación hasta en un máximo de 8 fases.

La figura 19 muestra las fases constructivas previstas para el túnel de La Pirámide y la figura 20, las fases constructivas de la sección mayor de la caverna.

Las longitudes de pase de avance varían en función de la calidad geotécnica del terreno oscilando entre 6 y 0,75 m.

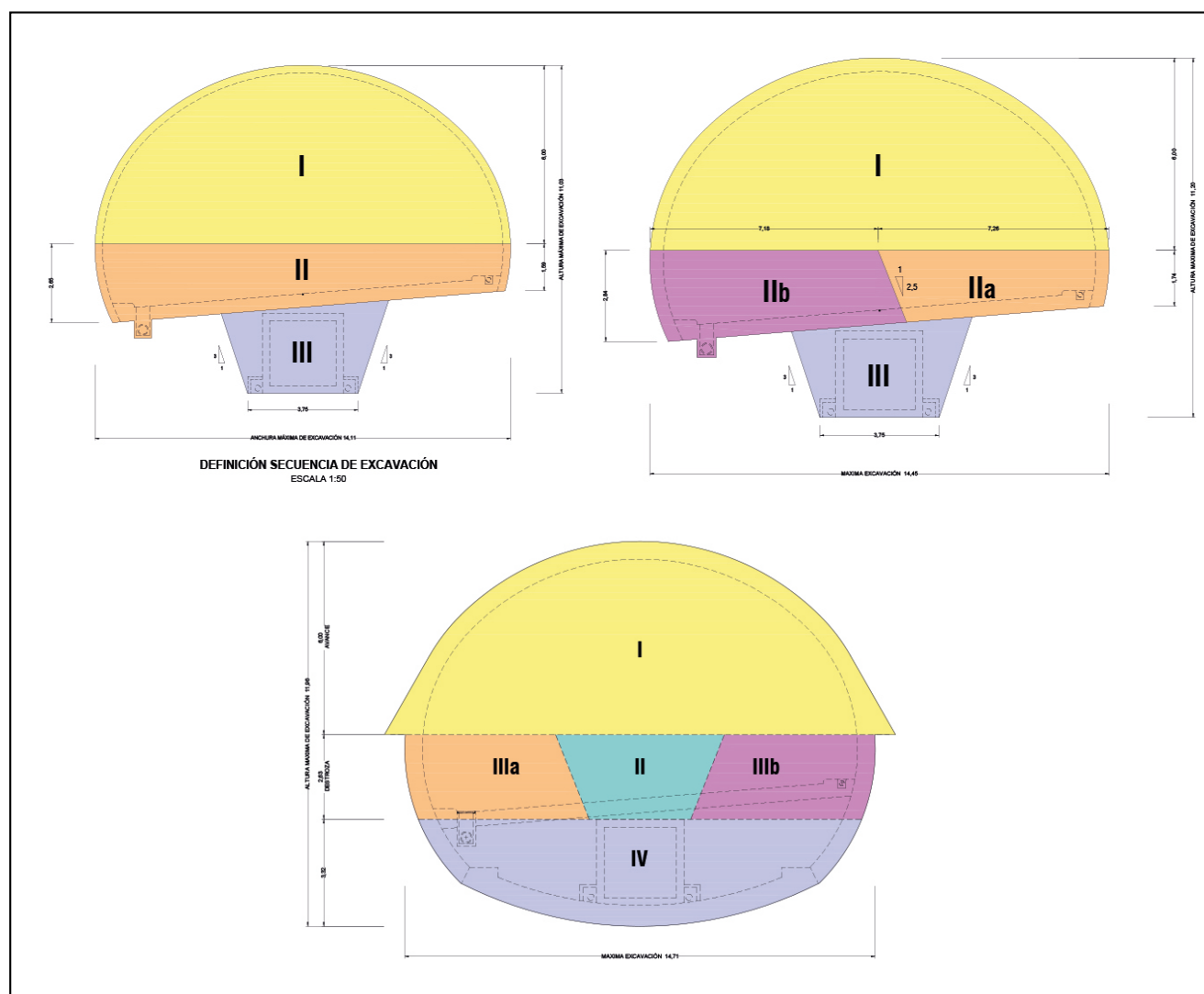


Figura 19. Fases constructivas túnel de La Pirámide. RMR > 45 / RMR 35-45 / RMR < 35.

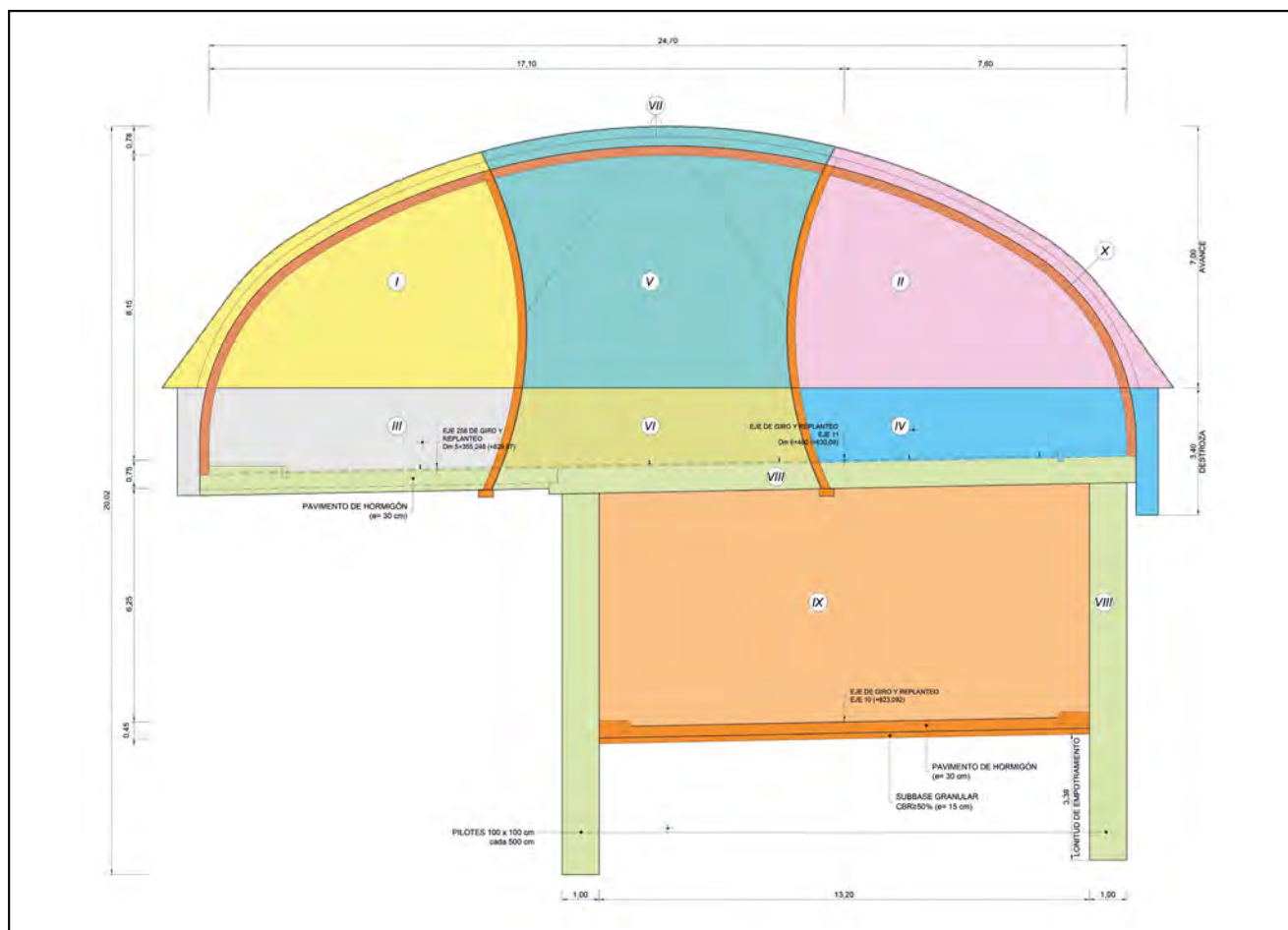


Figura 22. Fases constructivas sección caverna de nivel -1.

2.4.4. Nudo Apoquindo

La reducida cobertera con la que la sección híbrida atraviesa la cimentación de los aparcamientos condicionó la necesidad de efectuar un tratamiento de mejora intenso mediante columnas de *jet grouting*. Las columnas se ejecutaron a modo de corona desde el tercer nivel subterráneo del aparcamiento. Durante toda la duración de la obra, las plantas de los sótanos -1 y -2 permanecieron en servicio, no registrándose ninguna otra afección sobre su explotación.

La subdivisión de la sección de excavación siguió los esquemas concebidos para la sección híbrida adaptándose los

sostenimientos a los requerimientos estructurales obtenidos en los modelos de cálculo, tal como se muestra en la figura 23.

El tronco cruza bajo el subcentro comercial, el viaducto y la línea 1 del Metro en sección tipo híbrida de 3 carriles. En estas zonas, y con el objeto de limitar las deformaciones inducidas, se subdividió la sección mediante un *side drift*, y en el momento de su demolición se dispuso una segunda capa de sostenimiento reforzando toda la bóveda, tal como se aprecia en la figura 24.

Respecto al proceso constructivo de la caverna de bifurcación de Los Militares, se procedió según criterios de subdivisión de la sección de excavación similares a los

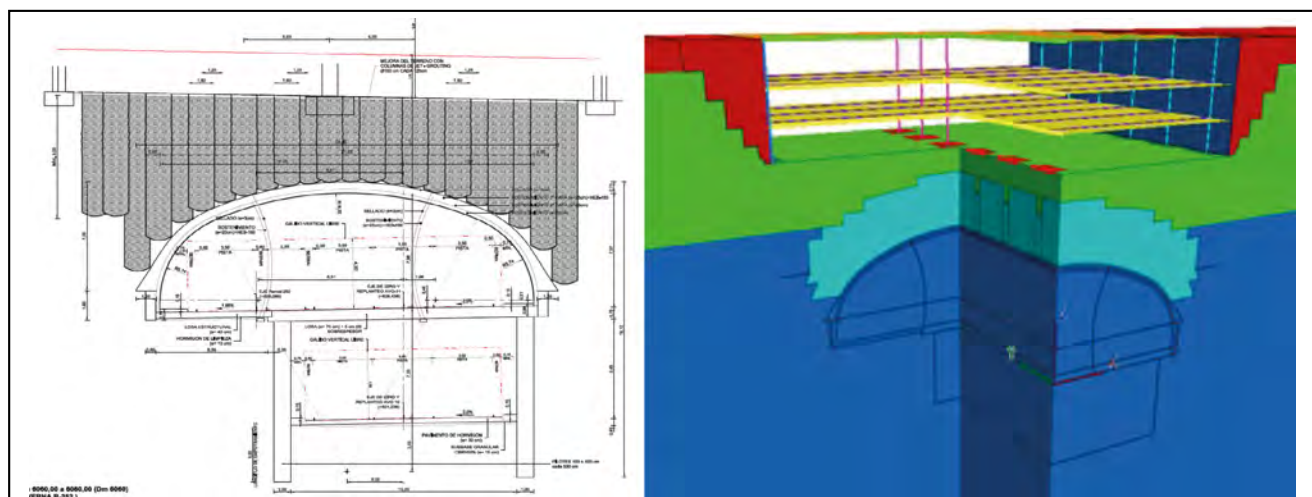


Figura 23. Tratamiento del terreno con *jet grouting* bajo el aparcamiento subterráneo y modelo de cálculo.

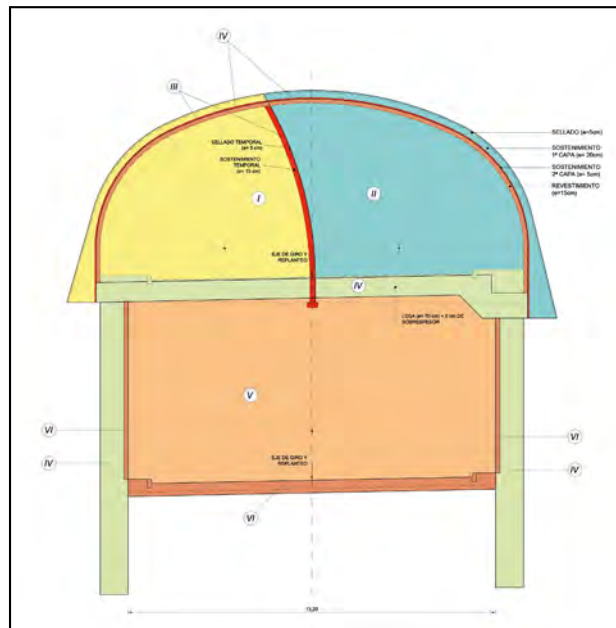


Figura 24. Fases constructivas en el cruce bajo el Metro.

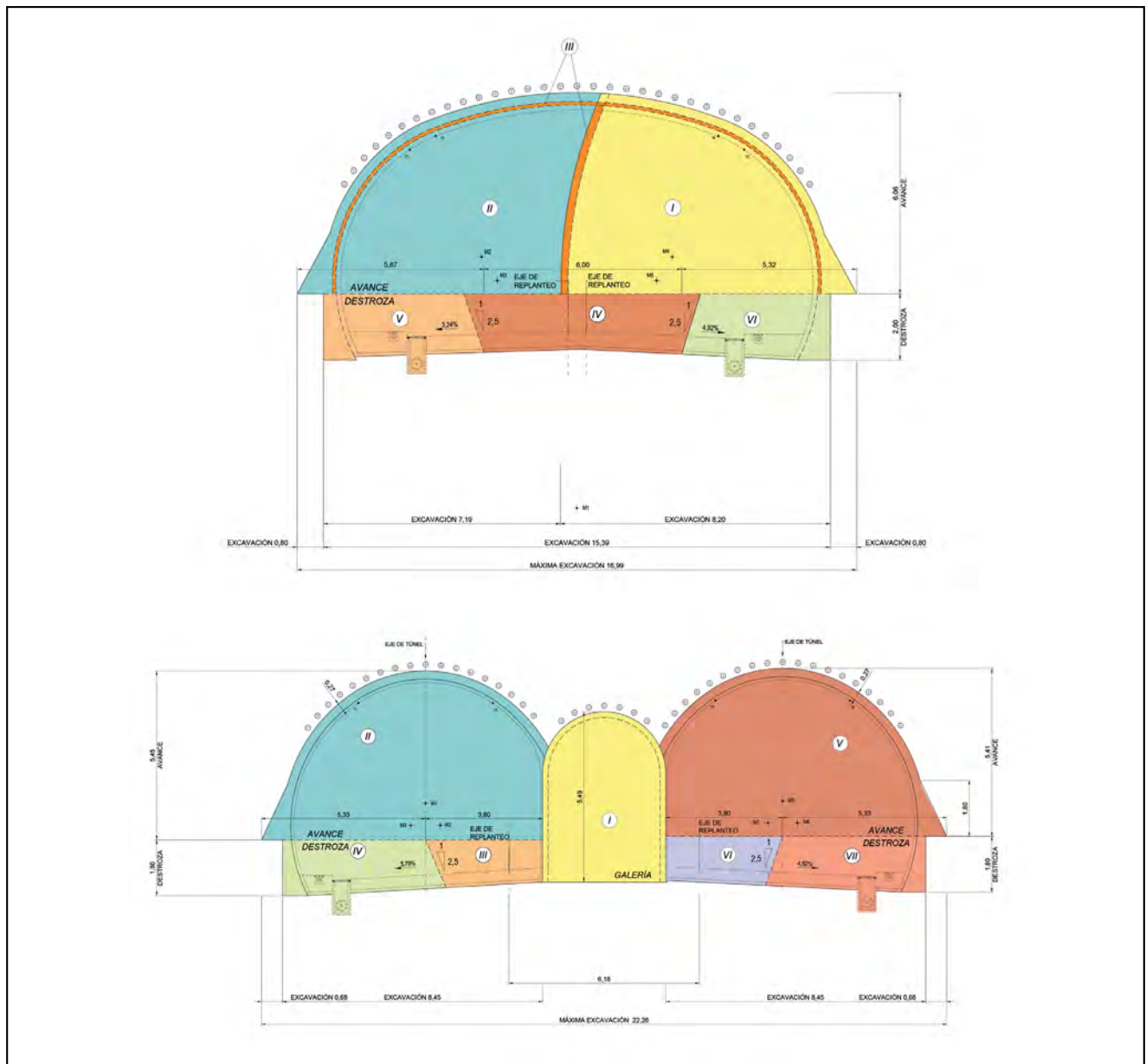


Figura 25. Fases constructivas de la bifurcación de Los Militares.

adoptados en el resto de los túneles en suelos. La zona límite de bifurcación constituye una situación singular en donde inicialmente se excava una galería que se maciza mediante hormigón pobre y que constituye, posteriormente, el punto de apoyo de los hombros de las secciones de túneles ya independizadas. En la figura 25 se muestran dos secciones de la caverna de bifurcación entre el ramal nororiental y el ramal sudoriental.

3. DATOS CLAVE DE LA CONSTRUCCIÓN

Las obras de construcción comenzaron en noviembre de 2017 y su puesta en servicio se realizó en junio de 2022.

Atendiendo a lo especificado en las cláusulas administrativas del contrato de la concesión, la maquinaria empleada en la ejecución de los túneles debía cumplir Tier III y Euro IV, es decir, ser de nueva adquisición.

La obra ha dispuesto de dos plantas de hormigón estratégicas para mejorar los ciclos, una de ellas ubicada en el sector norte y la otra (exclusiva de hormigón proyectado) en el punto intermedio de la obra (bajo trinchera, nivel -1).

A continuación, se realiza un breve repaso de los puntos singulares y/o más representativos descritos anteriormente.

a) Túnel de La Pirámide

La excavación del trono del túnel de La Pirámide ya se encuentra finalizada y en la actualidad se está



Figura 26. Portal norte del túnel de La Pirámide.



Figura 28. Frente en tobas grises y rojas.

ejecutando la zanja inferior que alojará la galería de evacuación. En las figuras 26 y 27 se muestran los portales norte y sur desde donde se han abordado los trabajos, el primero en las tobas de la formación Abanico y el segundo en las gravas desde el punto limpio de Vitacura, a través de una galería provisional de ataque.

La mayor parte desde el norte se ha excavado en materiales rocosos de calidad media y mala, destacando la caverna de bifurcación. En las figuras 28 y 29 se ilustran ambos aspectos.

Uno de los hitos del proyecto es el cruce del río, el cual se ha desarrollado con un nivel holgadamente manejable en lo que a las filtraciones hacia el interior de la excavación se refiere. En la zona, durante los metros finales del cruce en dirección norte, se ha interceptado en el frente de excavación el contacto entre la formación rocosa Unidad Abanico y los suelos aluviales de las gravas del Mapocho. Este contacto ha sido claramente identificable en el frente en una extensión notable. En la figura 30 se muestra el frente con esta singularidad, mientras que en la figura 31 se muestra la construcción por fases de la caverna Escrivá de Balaguer para el ramal de salida en Vitacura, construida en gravas.

b) Trincheras

En las figuras 32 y 33 se muestran dos aspectos de la obra con pantallas de pilotes.



Figura 27. Portal galería de ataque sur.



Figura 29. Caverna de bifurcación del ramal Mapocho.



Figura 30. Frente mixto en el túnel de La Pirámide.



Figura 31. Caverna de salida en gravas.



Figuras 32-33. Construcción del tramo en trinchera, falso túneles entre pantallas de pilotes.

c) Túnel híbrido

La excavación del nivel -1 se ha realizado en una o varias fases dependiendo de la anchura de la excavación en la bóveda. Para ilustrar esta idea, en la figura 9 se muestra la entrada del ramal Martín de Zamora en su intersección con el tronco, generando caverna excavada en cuatro fases, mientras que al fondo se aprecia el túnel de tres pistas con dos fases de excavación. En la figuras 34 y 35 se muestra la caverna de Los Militares excavada en tres fases.

Sin duda, un aspecto muy singular de la obra lo constituyen los numerosos encuentros, sobre todo en los enlaces de Kennedy y Apoquindo, entre los túneles artificiales excavados en trinchera entre pantallas y los túneles en mina. En las figuras 36, 37, 38 y 39 se muestran cuatro de estos encuentros.

Cabe comentar que en el portal norte del túnel se ha instalado una estación de tratamiento de agua del túnel con el objeto de reutilizar las aguas recogidas en el sistema de canalizaciones del túnel durante la construcción

El monitoreo de las obras subterráneas resulta de vital importancia para poder asegurar y controlar su correcta ejecución.

Las incertidumbres asumidas en la fase de diseño en cuanto a la asignación de comportamientos tensodeformacionales equivalentes y a la determinación de la estructura geológica del emplazamiento, hacen imprescindible un análisis de la información que se va obteniendo durante la propia construcción para verificar, o en su caso ajustar, lo determinado durante las fases anteriores de estudio

Estableciendo un sistema de medición de los desplazamientos que se producen durante y tras la ejecución de



Figuras 34-35. Cavernas de Martín de Zamora y de Los Militares.



Figuras 36-37. Portales de túneles en mina: ramal e inicio de túnel híbrido.



Figuras 38-39. Portal túnel en Mina. Ramal de acceso y Pozo 7+200.

una excavación, se puede comprobar la estabilización de la sección y, sobre todo, es posible comparar las medidas reales con las previsiones de los cálculos efectuados para, en el caso de que exista una divergencia significativa, adoptar las medidas correctivas oportunas.

Asimismo, resulta de especial interés llevar a cabo un control exhaustivo de los movimientos que la construcción de las obras subterráneas proyectadas pueda inducir.

Considerando todo lo anterior, se ha desarrollado un plan de monitoreo en el que se han definido las principales magnitudes a medir, los equipos necesarios para su control, la frecuencia de medición, los criterios de interpretación y, por último, un plan de contingencia.

El plan de monitoreo está basado en un control exhaustivo de la calidad geomecánica del frente y de los desplazamientos inducidos en el entorno de las excavaciones a efectuar y sobre las infraestructuras próximas al trazado. Comprende el control de los siguientes aspectos:

- El control geotécnico del frente se lleva a cabo caracterizándolo *in situ*, mediante la aplicación de una clasificación geomecánica. Se realizará, en cada fase, el estudio de la litología, estructura y calidad de los terrenos atravesados.
- Medidas de deformación en los túneles, caverna de bifurcación y pique que serán monitoreadas mediante secciones de convergencia y nivelaciones de clave. La figura 40 representa una sección tipo del túnel con las cuerdas de convergencia a monitorear.

- Medidas de deformación en la superficie inducida por la construcción del túnel que son monitoreadas mediante arquetas de nivelación topográfica.
- Medidas de deformación en el terreno inducidas por las excavaciones proyectadas, que son monitoreadas mediante extensómetros e inclinómetros.
- Control de vibraciones asociadas al empleo de voladuras en la excavación monitoreado mediante acelerómetros ubicados en las cercanías de infraestructuras existentes susceptibles de ser afectadas.
- Medidas de deformación en las infraestructuras existentes monitoreadas mediante clinómetros, regletas y MEMS (sistema automático de nivelación de carriles).

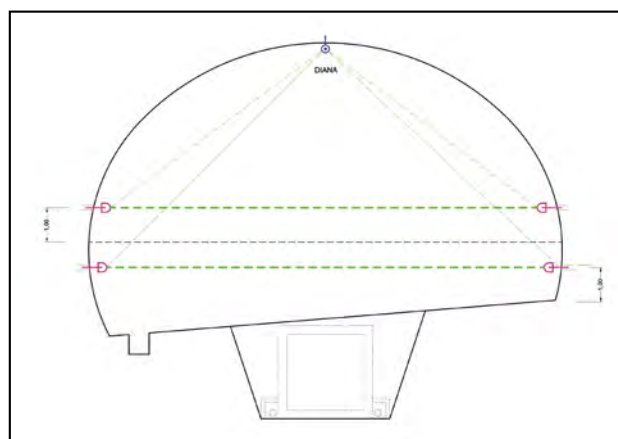


Figura 40. Sección tipo de medición de convergencias. Túnel de La Pirámide.

4. CONCLUSIONES

El proyecto Concesión Américo Vespucio Oriente, Tramo Av. El Salto-Príncipe de Gales, afronta el reto de implantar una autopista de tres carriles por sentido de circulación en un área urbana muy densamente poblada, cruzando un río y atravesando contextos geológicos diferentes, tanto en roca como, sobre todo, en suelos.

La cantidad y entidad de las interfaces existentes ha supuesto que el proceso de desarrollo del proyecto haya sido muy complejo, condicionado por la necesidad de implantar muy diferentes soluciones constructivas en las diversas áreas del proyecto, muchas de ellas en la vanguardia del estado del arte en el diseño de obras subterráneas.

Sin duda alguna, el cierre del anillo de circunvalación a Santiago constituirá un hito para la red de infraestructuras de la ciudad.

5. AGRADECIMIENTOS

Como no podía ser de otra manera, un proyecto de estas características requiere de la implicación y compromiso de un enorme equipo pluridisciplinar que merece nuestro reconocimiento, partiendo por la Sociedad Concesionaria AVO, que creyó desde un principio en este proyecto y ha sido un importante apoyo para la gestión de todas las dificultades presentadas; las constructoras SACYR y OHLA, que desde un principio estuvieron presentes para impulsarlo y que con su experiencia y dedicación han permitido abordar cada uno de los retos encontrados con las soluciones más adecuadas para cada situación; y el Ministerio de Obras Públicas de Chile, que con su supervisión y aporte, ha hecho de éste, un mejor proyecto.

6. REFERENCIAS

Batle, I., Uriel, A., Santos, D., De Cabo, M., y Rodríguez, J. (2016). El Túnel de La Pirámide, una pieza clave en el anillo de circunvalación a Santiago. *Ingeopress*, n° 250, pp. 24-33.

Kuster, J., Núñez, R., Chávez, E., Galera, J.M., y Santos, D. (2017). Santiago Expressway. *Tunnels and Tunnelling International*, April 2017, pp. 27-32.

Kuster, J., Núñez, R., Chávez, E., Galera, J.M., y Santos, D. (2018). La construcción del túnel dse Lo Saldes en Santiago de Chile. *Cimbra*, n° 411, pp. 40-47.

Kuster, J., Núñez, R., Chávez, E., Galera, J.M., y Santos, D. (2019). La construcción del túnel Kennedy en Santiago de Chile. *Ingeopress*, n° 279, pp. 14-18.

Kuster, J., Núñez, R., Chávez, E., Galera, J.M., y Santos, D. (2019). The construction of the tunnel Lo Saldes in Santiago de Chile. A major challenge, a wide tunnel with an extremely low overburden. *ITA-AITES General Assembly and World Tunnel Congress WTC2019, 3-9 May 2019, Naples, Italy*.

Kuster, J., Núñez, R., Chávez, E., Galera, J.M., y Santos, D. (2019). The construction of the tunnel Kennedy in Santiago de Chile. A major challenge of an urban tunnel in soils. *ITA-AITES General Assembly and World Tunnel Congress WTC2019, 3-9 May, Naples, Italy*.

Kuster, J., Núñez, R., Santos, D., Chávez, E., Galera, J.M., e Ibarra, G. (2014). The construction of the Vivaceta Tunnel (Santiago de Chile). *World Tunnel Congress 2014-Tunnels for a better Life. Foz do Iguaçu, Brazil*.

Normativa Técnica

AASHTO LRFD (2014). *Bridges Design Specifications*.

CETU (2000). *Technical Instruction Relating to Safety Measures in New Road Tunnels (Design Operation)*. Appendix N° 2 to Inter-ministry circular N° 2000-63 of 25 August 2000.

Dirección de Vialidad (Ministerio de Obras Públicas/Gobierno de Chile) (2018). *Manual de Carreteras*.

INN-Chile (1996). *NCh 433. Diseño sísmico de edificios*.

INN-Chile (2013). *NCh 2475. Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica*.