



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO DE PREFECTIBILIDAD PARA LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES DE METRO MEDIANTE MÁQUINAS TUNELADORAS

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

CRISTIÁN ENZO GONZÁLEZ VALDERRAMA

PROFESOR GUÍA:

EDGARDO GONZÁLEZ LIZAMA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

JUAN CARLOS POZO ROJAS
FELIPE OCHOA CORNEJO

SANTIAGO DE CHILE

2016

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil.
POR: Cristian González Valderrama.
FECHA: 07/09/2016
PROFESOR GUÍA: Edgardo González L.

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES DE METRO MEDIANTE MÁQUINAS TUNELADORAS

El crecimiento de la ciudad de Santiago hace necesario un aumento importante en la capacidad de un sistema integrado de transporte público, este hecho promueve una expansión del Metro de Santiago, que ya se ha iniciado con la actual construcción de las Líneas 3 y 6. En este contexto, resulta de interés el estudio de nuevas tecnologías para la construcción las líneas de Metro, como el método de excavación de túneles mediante el uso de máquinas tuneladoras (TBM).

Este trabajo estudia la posibilidad de realizar la construcción de los túneles de Metro mediante el uso de máquinas tuneladoras, con el objetivo de establecer una referencia para la aplicación de este método constructivo bajo las condiciones típicas del Metro de Santiago,

En primer lugar se han estudiado los distintos tipos de tuneladoras existentes para establecer los criterios de selección de la máquina más adecuada para la excavación de los túneles en los suelos de Santiago. La geología reinante define la tipología de la máquina, mientras que las características propias del proyecto establecen sus especificaciones particulares, como el tamaño y la maquinaria auxiliar. Para este caso se ha determinado que la máquina tuneladora con mayores ventajas para el tipo de suelo santiaguino es el Escudo de Balance de Presión de Tierras (EPB).

Como consecuencia de lo anterior, se han estudiado las características principales de los escudos EPB, con el fin de comprender su funcionamiento, los principios de su diseño y las partes que lo componen, continuando con la estimación de un rendimiento promedio de avance que se aproxima a los 18 m/día, en comparación al rendimiento de avance de un frente en NATM que alcanza un promedio estimado en 2 m/día.

En segundo lugar, se ha desarrollado una descripción de la secuencia constructiva que requiere una línea típica del Metro de Santiago, estableciendo las diferencias entre el actual método NATM y el posible uso de una tuneladora. Diferencias que radican principalmente en la posibilidad de trabajar en múltiples frentes con avances pequeños del método NATM versus el rápido avance de la tuneladora desde un único frente.

Finalmente, se ha realizado un análisis comparativo de ambos métodos constructivos, concluyendo que bajo las condiciones típicas de suelos y formas del Metro de Santiago existen tramos pequeños para los cuales el uso de una tuneladora reduce los plazos de ejecución, pero a un mayor costo que el método NATM, mientras que para tramos largos de aproximadamente 12 km, el costo del uso de tuneladora es menor, pero con un aumento considerable en plazo.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia y amigos por el apoyo incondicional entregado en este proceso

A mis profesores,

Edgardo González, por su apoyo y paciencia en el desarrollo de este trabajo.

Juan Carlos Pozo, por su disponibilidad y tiempo otorgado a resolver mis dudas, siempre con una pasión característica por estos temas.

Felipe Ochoa, por acoger con entusiasmo este trabajo.

Y a todos los que se han preocupado y me han animado para culminar este importante paso, especialmente a Marcela por su apoyo incondicional.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	5
1.1	Introducción	5
1.2	Objetivos	6
1.3	Metro de Santiago – Evolución de las obras subterráneas	7
2	MÉTODOS CONSTRUCTIVOS PARA TÚNELES EN SUELOS	10
2.1	Cut and cover	10
2.2	Excavación subterránea	11
3	MÁQUINAS TUNELADORAS	18
3.1	Topos o Tuneladoras abiertas.....	18
3.2	Tuneladora Doble Escudo (Double Shield Machine).....	20
3.3	Escudos (Shield Machine)	21
3.4	Escudos Mixtos (Mixshield)	25
3.5	Sistema Back-up.....	25
4	EXPERIENCIA DE TUNELADORAS EN EL MUNDO	28
4.1	Experiencia en Europa - Ampliación Metro de Madrid 2003 – 2007	28
4.2	Experiencia en Latinoamérica	30
4.3	Experiencia en Chile	32
5	SELECCIÓN DE TUNELADORA PARA LOS SUELOS DE SANTIAGO	35
5.1	Información requerida para las especificaciones de la tuneladora	35
5.2	Geología de Santiago	38
5.3	Casos críticos a enfrentar	42
5.4	Máquina tuneladora adecuada para los suelos de Santiago	42
6	ESCUDO DE BALANCE DE PRESION DE TIERRAS – EPB	44
6.1	Principios de su diseño y funcionamiento	44
6.2	Partes del EPB.....	45

6.3	Funcionamiento	47
6.4	Rendimientos	48
7	¿CÓMO SE CONSTRUYE UNA LÍNEA DE METRO?	53
7.1	Descripción general	53
7.2	Construcción de una línea de Metro con el método NATM	54
7.3	Construcción de una línea de Metro mediante el uso de un escudo EPB	63
7.4	Comparación ambos métodos	68
8	DETERMINACIÓN DEL PLAZO DE EJECUCIÓN DE LAS OBRAS	71
8.1	Tiempo de ejecución para piques, estaciones y túneles	71
8.2	Tiempo de ejecución de una línea de Metro	74
9	EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LOS MÉTODOS DE EXCAVACIÓN	89
9.1	Método NATM	89
9.2	Uso de Tuneladoras del tipo EPB	97
9.3	Comparación de costos del túnel interestación para ambos métodos	105
9.4	Ejemplo comparativo para una línea típica del Metro de Santiago	106
10	CONCLUSIONES	109
11	BIBLIOGRAFÍA	113

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

El desarrollo de la ciudad de Santiago está alcanzando un nivel crítico en cuanto al aumento del parque vehicular, lo que implica un aumento sustancial en los tiempos de viaje y un deterioro progresivo en la calidad de vida de los capitalinos. Motivo por el cual las autoridades deben enfocarse en este problema y crear un plan maestro que a futuro desincentive el uso del automóvil fortaleciendo un eficiente sistema de transporte público.

Es aquí donde el crecimiento de la red de Metro juega un papel trascendental, haciéndose necesario la construcción de nuevas líneas y estaciones que entreguen una mayor cobertura en toda la ciudad y ayuden a descomprimir las líneas existentes, mejorando las condiciones de viaje. En este marco, ya ha sido anunciado por las autoridades políticas del país, la construcción de la Línea 7 paralela a la Línea 1 existente, y las extensiones de la Línea 3 hacia el sector norponiente de la capital y la Línea 2 hacia el sur, sumado a la actual construcción de las líneas 3 y 6.

Con estos nuevos proyectos, se abre la oportunidad para la ingeniería pueda introducir nuevas tecnologías en la construcción de túneles, que aporten al conocimiento y desarrollo de la ingeniería y construcción nacional. Este trabajo pretende introducir el uso de máquinas tuneladoras o TBM (del inglés Tunnel Boring Machine) para la construcción de túneles en suelos blandos a sección completa, de amplio uso en otras partes del mundo, reemplazando el actual método de excavación mecánica por secciones, derivado del Nuevo Método Austríaco de Construcción de Túneles (NATM, sigla en inglés).

Este trabajo estudiará los antecedentes de los proyectos en construcción de las líneas 3 y 6, analizando el método constructivo, rendimientos y costos asociados, para luego estudiar los distintos tipos de tuneladoras técnicamente factibles de utilizar en estos tipos de suelos, centrándose finalmente en el escudo de presión de tierra o EPB (del inglés Earth Pressure Balance), que de acuerdo a lo estudiado en este trabajo, es el más adecuado para la excavación de túneles en los suelos de Santiago, identificando los desafíos que la implementación de este método significaría para la industria nacional, en términos de ingeniería, construcción, logística y suministros.

1.2 Objetivos

Objetivo General

- Desarrollar un estudio referencia para la aplicación del método de excavación con tuneladoras para la construcción de los túneles de Metro en Santiago.

Objetivos Específicos

- Estudiar los distintos tipos de tuneladoras existentes y establecer criterios para seleccionar la más adecuada para la excavación de túneles en los suelos presentes en Santiago.
- Establecer los factores que influyen en la operación, rendimiento y factibilidad económica de un proyecto de Metro construido con tuneladora y determinar los aspectos claves para garantizar el éxito en la administración del proyecto.
- Estudiar el actual método de excavación de túneles NATM, y compararlo con el método de excavación con tuneladora.

1.3 Metro de Santiago – Evolución de las obras subterráneas

A mediados del siglo 20, la ciudad de Santiago comienza a sufrir los estragos del crecimiento geográfico y la densificación de la población, experimentando las primeras congestiones viales que se incrementaban vertiginosamente.

Las medidas para enfrentar este problema fueron tomadas por autoridades de aquella época observando la experiencia de otras ciudades del mundo que presentaban problemas similares, donde una de las soluciones más recurridas y aceptadas fue la implementación de un sistema de transporte subterráneo. En general las grandes ciudades modernas del mundo han seguido la misma tendencia: bajar al subsuelo los servicios y sistemas de transportes, devolviendo así la superficie al ser humano con parques y áreas de esparcimiento.

Es así como en 1969 comienzan las obras en el tramo San Pablo – La Moneda de la Línea 1, las cuales fueron inauguradas 6 años más tarde, en 1975. Estas obras se realizaron utilizando técnicas del método *cut and cover* o “a cielo abierto”, realizando excavaciones con grandes taludes y eventualmente entibadas con grandes puntales.

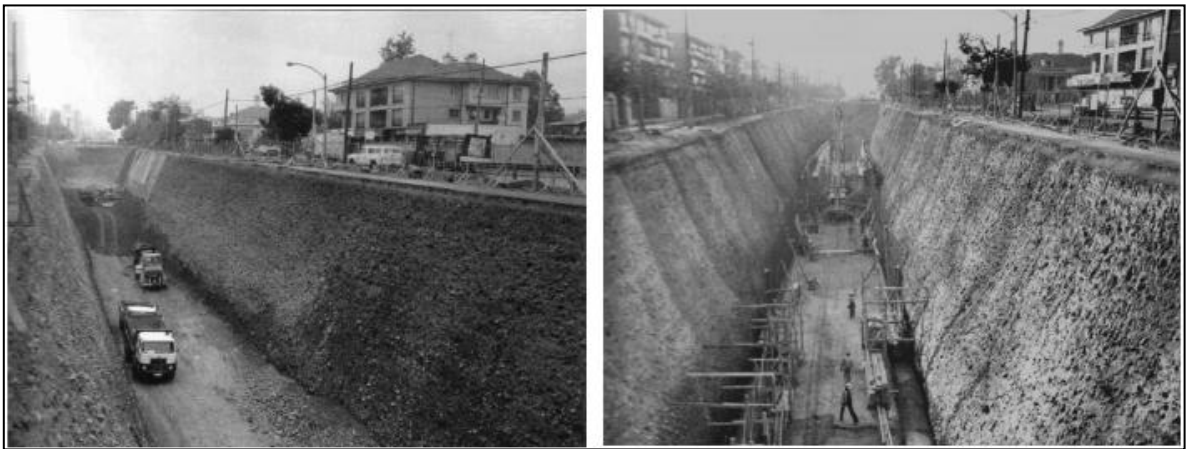


Figura 1.1 Excavación a cielo abierto, construcción Línea 1.

Siguiendo este mismo método de construcción, a finales de 1980 se construyen las extensiones de la Línea 1 que alcanzan la Estación Escuela Militar y dos tramos de la Línea 2 que unen las estaciones Los Héroes y Lo Ovalle, totalizando así los primeros 25 km de la red.

El desarrollo de estas obras demandó mucho tiempo y costo, interviniendo drásticamente la vida en superficie, incluso en arterias tan importantes como Alameda, Providencia, Apoquindo y Gran Avenida, produciendo grandes externalidades negativas a la población. Es por eso que en 1995, se implementó por primera vez el método NATM (Nuevo Método Austriaco de Túneles), que buscaba reducir de forma importante el impacto superficial de las obras, este método se desarrolló como un proyecto piloto en los túneles interestación del tramo Estación Baquedano y el sector de Talleres San Eugenio (colindantes a Estación Ñuble), bajo el Parque Bustamante, transformándose en un hito importante en la evolución de las obras subterráneas de Metro. Sin embargo es importante señalar que sólo se utilizó el sistema NATM para los túneles de vías (interestaciones), ya que las estaciones continuaron su construcción a cielo abierto.



Figura 1.2 Primer túnel construido con método NATM, Línea 5.

Dada la buena experiencia en la construcción de los túneles interestación con el método NATM, se continuó con la extensión de la Línea 5 hacia el centro, completando el año 2000 el tramo entre Baquedano y Santa Ana. Aquí se modificó el método de construcción de las estaciones, que siguió a cielo abierto, pero con entibaciones de pilotes anclados al terreno, lo que minimizó sustancialmente el ancho de las excavaciones.

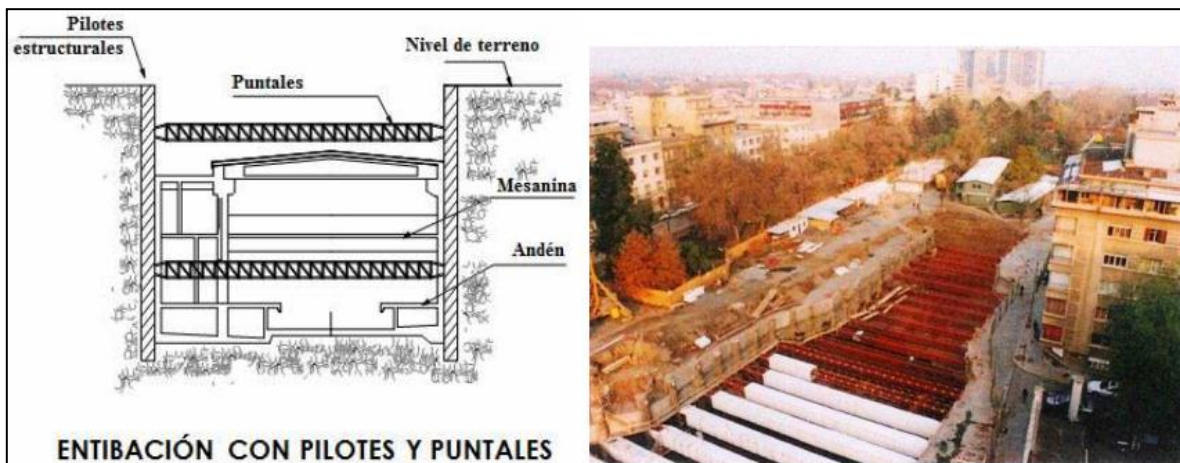


Figura 1.3 Entibación con pilotes anclados al terreno.

A partir del año 2000 se comienza a hablar de Metro como “Red Estructurante del nuevo Sistema de Transporte de Santiago”, y se genera un ambicioso plan de extensiones que pretende duplicar la red existente en 6 años.

De 2002 en adelante y durante el proyecto de extensión de la Línea 5 a Quinta Normal, se logra un nuevo hito importante en la construcción de Metro, la excavación de las estaciones se realizó íntegramente utilizando en método NATM, con secciones hasta 3 veces más grandes que los túneles interestación. Así la construcción completa del proyecto se realizó en forma subterránea, necesitando sólo de piques puntuales para el movimiento de tierra, materiales y maquinarias. De esta forma, la industria nacional comienza a perfeccionar el método NATM a las condiciones locales.



Figura 1.4 Estación construida mediante método NATM.

En el año 2006 se inauguran las líneas 4 y 4-A que unen el centro de Providencia con la comuna de Puente Alto.

En enero del 2007, Metro se incorpora a Transantiago, duplicando bruscamente el número de viajes diarios (de 1 a 2 millones) lo que genera un impacto no menor en la calidad del servicio. A fines del 2010 se inaugura la extensión de la Línea 1 hasta Los Domínicos y al año siguiente la extensión de la Línea 5 hasta Maipú, de esta manera se conforma la actual red existente de Metro con 108 estaciones y una extensión de 103 km.

Actualmente se encuentra en desarrollo la construcción simultánea de las nuevas líneas 3 y 6, proyecto que representa el mayor desafío en la historia de Metro. Considerando la ampliación de la red en 37 kilómetros, con 28 estaciones y 45 nuevos trenes con aire acondicionado, cámaras de seguridad y conducción automatizada. El proyecto contempla una inversión que supera los US\$ 2.700 millones.

La Línea 6 abarca 15 km de extensión y cuenta con 10 estaciones, beneficiará a las comunas de Cerrillos, Pedro Aguirre Cerda, Santiago, San Miguel, San Joaquín, Ñuñoa y Providencia, su inauguración está programada para el año 2017. Mientras que la Línea 3 contempla 22 km de extensión, con 18 estaciones que beneficiarán a los habitantes de Quilicura, Huechuraba, Conchalí, Independencia, Santiago, Ñuñoa y La Reina, su inauguración está programada para el año 2018.

2 MÉTODOS CONSTRUCTIVOS PARA TÚNELES EN SUELOS

Es muy necesario indicar que los túneles o excavaciones subterráneas en suelos no tienen nada que ver con los túneles en roca, puesto que los problemas y las tecnologías para resolver la ejecución de unos u otros son muy distintos. De la misma manera, tampoco es comparable la construcción de túneles en suelos cuando estos se realizan en zonas urbanas o a campo abierto, puesto que en el primer caso la subsidencia provocada puede inducir asentamientos o movimientos horizontales que dañen estructuras aledañas a la obra y que pueden incidir en paradas sucesivas de la obra.

Es así como en función de los datos geológicos y geotécnicos que se tengan del terreno, los estudios previos realizados, las restricciones de deformaciones en superficie y los plazos a cumplir, se determina el método constructivo o modalidad de excavación más adecuada para desarrollar un proyecto en particular.

Prácticamente todas las posibilidades actuales de construcción de túneles en suelo se pueden reunir en dos grupos:

- Cut and cover o cielo abierto
- Excavación subterránea

Es normal encontrar túneles proyectados o ejecutados con combinaciones de los dos sistemas que se describen a continuación:

2.1 Cut and cover

El método “cut and cover”, que significaría “cortar y cubrir”, es un procedimiento donde primero se excava desde la superficie la totalidad o parte del hueco que ocupará el túnel y luego construye el túnel dentro de este espacio a cielo abierto, para finalmente cubrirlo una vez terminado. El sostenimiento de este túnel debe ser resistente, capaz de soportar las cargas del material que lo cubrirá.



Figura 2.1 Túnel construido mediante método Cut and Cover.

Este método resulta ser el más adecuado en casos donde el recubrimiento de terreno sobre el túnel es escaso y en lugares donde la intervención del terreno no genera problemas en el tránsito de personas y debilitamiento de estructuras existente. Además se trata de método constructivo de menor costo comparado con sus correlativos en subterráneo.

2.2 Excavación subterránea

La excavación subterránea, a diferencia del método cut and cover, no afecta a la superficie y está muy condicionada a las deformaciones inducidas a las estructuras cercanas al trazado de la obra.

Uno de los problemas que es necesario resolver previamente a su inicio es el acceso al frente, ya que el túnel se encuentra a una profundidad determinada y habitualmente se parte de la superficie del terreno; por lo tanto, se requiere realizar rampas de ataque o acceder desde pozos verticales (piques), con el incremento de costo y tiempo que estos trabajos previos implican.

Existen muchos métodos de excavación subterránea en suelos. A continuación se describirán tres de los más utilizados en obras de túneles urbanos como son: el Método de Madrid, NATM y la excavación con escudos mecanizados.

2.2.1 Método tradicional de Madrid o método Belga.

Método de excavación de túneles en suelos que consiste en la excavación inicial de una pequeña galería en la clave que se ensancha poco a poco, protegiendo y entibando el frente, hasta permitir hormigonar toda la sección de la bóveda. Para luego continuar con la parte central del banco o destroza y finalizar con el cierre de la contrabóveda. Ver esquema de la Figura 2.2.

Aunque su rendimiento es pequeño, por ser un proceso lento y trabajoso, debe seguir siendo contemplado como un procedimiento a utilizar en tramos pequeños. Además es ideal para situaciones en las que existe peligro de hundimiento o imposibilidad de introducir maquinaria en el terreno.

Las fases constructivas se detallan a continuación.

Fases constructivas

- Excavación y entibación de la galería de avance

Se inicia la excavación con una galería de avance de apenas un metro de longitud, en el eje del túnel y en la clave de la sección, con entibación continua de madera se va colocando a medida que avanza la excavación apoyadas en el propio terreno forrando la parte superior de la galería, lo que supone una alteración mínima del terreno. Una vez ejecutada la galería en la longitud de avance, entre 1,25 y 2,5 m según el terreno, se colocan perfiles metálicos que servirán de apoyo a las tablas, disponiéndose longitudinalmente al túnel y separadas un metro.

- **Excavación y hormigonado de la bóveda**

Una vez finalizada la galería de avance, se comienza a abrir la excavación a ambos lados de ésta, en pases pequeños y alternados. De esta forma se configura una partición de la sección, en secciones de unos 3 m² con un sostenimiento unido transversalmente. El número de pases a cada lado es variable en función del terreno, normalmente se utilizan longitudes de pase desde 1,25 a 2,5 m, según el terreno atravesado, y anchos de 1 m a 1,5 m. La entibación suele ser colocada de forma sistemática salvo raras excepciones. La excavación se realiza con martillos neumáticos y la evacuación de escombros mediante cintas transportadoras hasta tolva y camión.

Terminada la excavación de toda la bóveda, se procede al encofrado, para esto se utilizan cerchas metálicas que sirven de apoyo a los moldajes. Realizada esta operación, se rellena el anillo con hormigón bombeado.

- **Excavación de la destroza o pasillo central**

Una vez hormigonada la bóveda, y con un desfase de unos 5 o 6 anillos, se comienza la destroza, consistente en excavar una caja central dejando un resguardo del orden de 1 a 1,5 m en los hastiales, para que los empujes que la bóveda transmite al terreno que sirve de apoyo no formen planos de rotura peligrosos, que pudieran dar origen al asentamiento y rotura de la misma. Esta operación se realiza con máquina excavadora que además se utiliza para retirar el material procedente de la excavación de la bóveda que vierten en la destroza a través de una o varias cintas transportadoras.

- **Excavación de las bermas laterales y construcción de los hastiales**

Finalizada la destroza, se ejecutan los hastiales por tramos alternados. Su excavación se realiza con la misma máquina que la destroza y se perfila posteriormente a mano. Se excavan módulos de 2,5 m, al igual que los anillos, con las dos precauciones siguientes:

- La junta de los anillos debe caer aproximadamente en el centro de la franja excavada, con el fin de no descalzar la bóveda completamente.
- Nunca se excavan dos tramos enfrentados al mismo tiempo por las mismas razones.

Esta operación, que parece tener poca importancia cuando el terreno es relativamente bueno, se puede complicar y llegar a ser una de las fases más comprometidas cuando existe abundancia de agua y el terreno tiene poca cohesión.

- **Construcción de la contrabóveda**

Se realiza la excavación correspondiente con máquina, en una longitud de 10 a 15 m (cinco anillos), hormigonando posteriormente con moldajes para conseguir la forma de la sección tipo. Se puede hacer en toda la luz o por mitades. Cuando el terreno presenta mucha agua se recurre a zanjas o pozos drenantes.

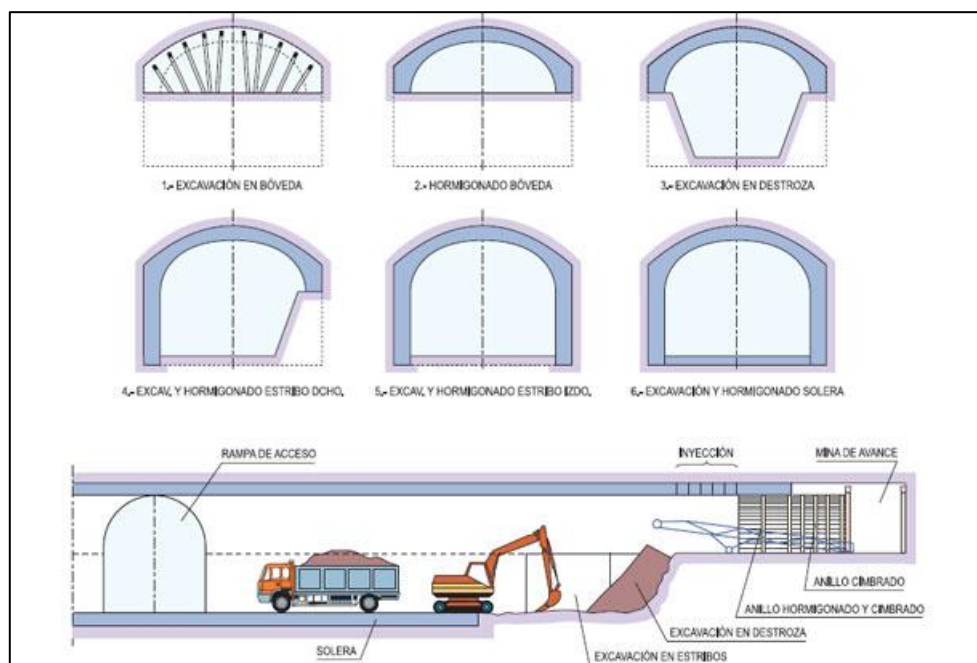


Figura 2.2 Secuencia constructiva Método de Madrid.

2.2.2 NATM (New Austrian Tunnelling Method)

Criterios básicos de método NATM

El “New Austrian Tunnelling Method” (NATM) es un método semi-empírico que ha sido desarrollado en el curso de décadas a partir de los estudios de Rabcewicz (1964) y los conceptos de convergencia-confinamiento desarrollados por Fenner y Pacher.

En la Figura 2.3 se observa la curva característica del túnel correspondiente a un determinado terreno CC, así como la curva correspondiente al sostenimiento (también conocida como curva de confinamiento). Ambas curvas se intersectan en el punto de equilibrio entre túnel y sostenimiento, cuando se alcancen la presión y desplazamientos (p_{eq} , u_{eq}) comunes a las dos curvas CC y CF. La distancia u_d , hace referencia a la distancia entre el frente de la excavación y sostenimiento colocado, e indirectamente, a la deformación transcurrida antes de colocar el mencionado sostenimiento.

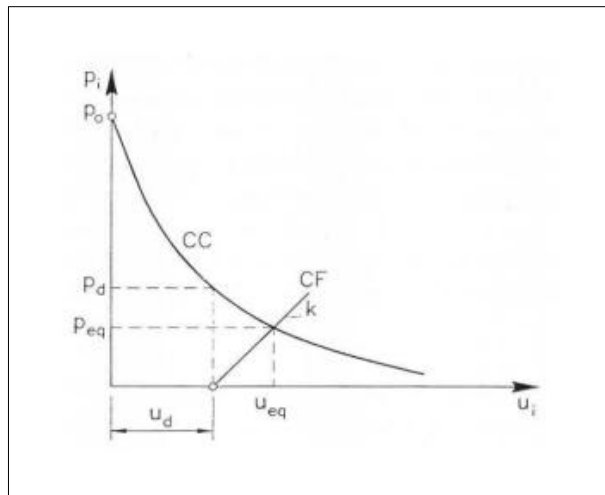


Figura 2.3 Curva Presión - Deformación propuesta por Fenner Pacher.

Uno de los criterios fundamentales de éste método es considerar el terreno como parte del sistema de soporte, o en otras palabras, el terreno debe ser considerado como material de construcción, lo cual se traduce en los siguientes pasos:

- Se ejecuta la excavación de la sección completa o parcial del túnel, mediante medios mecánicos convencionales, buscando conservar al máximo posible la integridad del terreno intervenido.
- Se realiza la aplicación inmediata de hormigón proyectado sobre la frente de excavación, lo cual permite confinar el terreno, evitando su degradación, desecación y sobre-excavación.
- Dado que el avance del túnel produce descompresión por adelantado del terreno, es recomendable colocar rápidamente un soporte primario, compuesto por marcos reticulados de acero y mallas de refuerzo. El efecto de este soporte se hace más efectivo si además se cierra como un anillo, incluyendo una contrabóveda.
- Seguido a los marcos de acero, se debe aplicar un revestimiento o soporte flexible, mediante la aplicación de una capa de shotcrete, que distribuya las tensiones.
- Finalmente, Se debe realizar un seguimiento de control para verificar la estabilización del sistema. Los resultados de este monitoreo validan los diseños efectuados en gabinete o pueden implicar modificaciones. Las modificaciones deben ser resueltas rápidamente en obra pudiendo existir diseños alternativos previstos.

2.2.2.1 Aplicación del método NATM en el Metro de Santiago

El suelo de la cuenca de Santiago es uno de los factores claves en la utilización del método NATM en la construcción de líneas del Metro. Las gravas areno arcillosas depositadas por el río Mapocho en gran parte de la cuenca, tienen un buen comportamiento mecánico que permite aplicar métodos de excavación donde el suelo forma parte del arco resistente total, con apoyo de un sostenimiento adicional formado por marcos de acero y hormigón proyectado con mallas de acero.

Con los conocimientos adquiridos por ya varios años sobre el comportamiento del suelo ante este tipo de construcciones, se ha podido implementar el método NATM utilizando maquinaria liviana, y combinando técnicas de shotcrete, enfierradura y marcos reticulados, instalados en secciones parciales (bóveda, banco y contrabóveda) logrando un avance con mínimas deformaciones en superficie.

En lo secuencial, el método consiste en la excavación de piques verticales de acceso de entre 15 y 25 m de diámetro y profundidades superiores que pueden superar los 40 m, por donde se ingresa la maquinaria liviana que efectúa las excavaciones, además de los equipos y materiales necesarios para la construcción del túnel.



Figura 2.4 Pique de construcción Granada, Línea 3.

Desde este pique se inicia la excavación de una galería ortogonal al eje del trazado, siguiendo la metodología NATM, hasta llegar al punto donde se puede atacar la excavación del túnel interestación avanzando simultáneamente en dos direcciones opuestas, el avance se hace en tramos cortos de no más de 1,5 m. Por el pique se extrae todo el material excavado que será llevado a un botadero especial.

La construcción del túnel interestación sigue una secuencia típica de avance, el caso para una sección con contrabóveda se describe brevemente a continuación.

Fase I – Bóveda

- 1- Excavar un tramo aproximado de 100 cm en bóveda, dejando un contrafuerte temporal de terreno sin excavar
- 2- Colocar sello de hormigón proyectado para confinar el suelo natural.
- 3- Colocar el sistema de sostenimiento adecuado, marcos reticulados y mallas de acero y hormigón proyectado.

Fase II – Bóveda

- 1- Repetir los pasos de 1 a 3, para completar otro avance.

- 2- Colocar la segunda capa de sostenimiento en los 2 avances, malla de acero y hormigón proyectado.
- 3- Rebajar el contrafuerte temporal.

Fase III – Contravóveda

- 1- Excavar el tramo de 200 cm en contravóveda.
- 2- Colocar sello de hormigón proyectado para confinar el suelo natural.
- 3- Colocar el sistema de sostenimiento adecuado, marcos reticulados y mallas de acero y hormigón proyectado.
- 4- Colocar la segunda capa de sostenimiento, malla de acero y hormigón proyectado.
- 5- Colocar capa de revestimiento, malla de acero y hormigón proyectado.
- 6- Colocar relleno temporal sin dañar hormigón instalado.

Fase IV - Bóveda

- 1- Colocar la capa de revestimiento, malla de acero y hormigón proyectado. Esta actividad se puede realizar al final una vez terminado el túnel o a una distancia de la frente que no interfiera los trabajos de excavación.

La Figura 2.5 esquematiza la secuencia constructiva del método NATM.

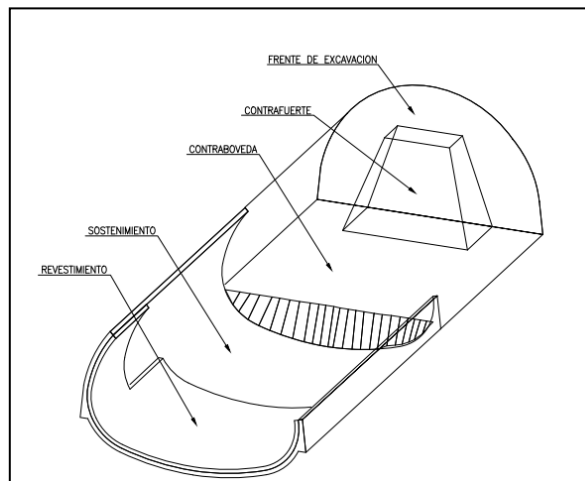


Figura 2.5 Esquema de avance método NATM en sección con contravóveda.

La utilización de este método permite excavar el túnel desde múltiples frentes, tantos como cantidad de piques se construyan.

2.2.3 Excavación con máquinas tuneladoras

Las máquinas para la excavación de túneles se conocen comúnmente como tuneladoras y hacen referencia a una serie de máquinas capaces de excavar un túnel a sección completa, a la vez que se colabora en la colocación de un sostenimiento provisional o en la puesta en obra del revestimiento definitivo.

Para la construcción de túneles en terrenos blandos e inestables, y sobre todo en suelos permeables sometidos a carga freática, se utilizan tuneladoras del tipo *Escudos*. Los escudos son máquinas con cabeza circular giratoria, con el mismo diámetro de la sección a excavar, equipadas con herramientas de corte como picas y discos de corte y una cámara de presión en el frente, avanza mediante el empuje de una serie de gatos perimetrales que se apoyan sobre el revestimiento definitivo, después del avance se incorpora una nueva sección de dovelas al retraerse los cilindros. Todo esto dentro de una coraza metálica que da el nombre de escudo a este tipo de máquinas.

Existen varios tipos de escudos, una primera y muy importante diferencia entre ellos, reside en las características del frente de trabajo y sobre todo en la estabilidad o inestabilidad del mismo, difícil de determinar en el caso de suelos. En función de la estabilidad del frente se podrá hablar de *escudos abiertos* para frentes estables y de *escudos cerrados* para aquellos frentes que puedan presentar señales de inestabilidad.



Figura 2.6 Maquinas tuneladoras, Escudo Slurry (izq) y EPB (der).

Los rendimientos de estas máquinas suelen ser muy elevados, aunque sean muy variables en función del tipo de dovela a colocar y del tipo de escudo a que se refiera. Además este método está sujeto a ciertas limitaciones como geometría de la sección (sólo circular), longitud mínima del túnel para ser rentable, radios de curvatura mínimos de 250 m, etc.

El detalle de este tipo de tuneladoras y otras existentes, se detallará en el siguiente capítulo de este trabajo.

3 MÁQUINAS TUNELADORAS

Las tuneladoras son máquinas integrales capaces de excavar la sección completa de un túnel mediante el giro de su cabeza de corte, colaborando en el sostenimiento del terreno, dependiendo de las características geológicas de este.

Actualmente existen varios tipos de tuneladoras diseñadas para ser utilizadas en terrenos completamente distintos, por un lado se encuentran los *TOPOS* que son tuneladoras concebidas principalmente para excavar en rocas duras y medias, sin gran necesidad de colocar sostenimiento en el túnel, y por otro lado, los *ESCUDOS* que son tuneladoras mucho más complejas y se utilizan especialmente en la excavación de rocas blandas y suelos, frecuentemente inestables y a veces por debajo del nivel freático. Con la evolución de estos dos tipos de tuneladoras, se ha desarrollado el *DOBLE ESCUDO* que es un tipo de máquina capaz de trabajar como topo o como escudo, en función de la calidad del macizo rocoso, siendo la mejor solución para terrenos con tramos variables suelo-roca. Finalmente, en los últimos años, nuevos túneles han sido proyectados a través de suelos mixtos, por lo que se ha debido crear nuevas máquinas que optimicen el avance de acuerdo al tipo de suelo predominante, este nuevo concepto de máquina recibe el nombre de *ESCUDOS MIXTOS*.

A continuación se detallará cada uno de los tipos de tuneladoras mencionados en el párrafo anterior, indicando sus fortalezas y debilidades. Además se hará mención al sistema Back Up que entrega soporte a la máquina principal.

3.1 Topos o Tuneladoras abiertas

3.1.1 Topo (Gripper)

Diseñadas para terrenos de roca dura y estable, estas máquinas son relativamente simples, constan de una cabeza giratoria, del diámetro nominal del túnel a excavar, la cabeza de corte está equipada con cortadores de disco que se sitúan estratégicamente para optimizar el corte de la roca. Mientras la cabeza gira, la tuneladora se apoya en los costados del túnel mediante un sistema de zapatas de anclaje o grippers que la mantienen estacionaria, unos cilindros de empuje se extienden empujando la viga principal de la máquina y transmitiendo un empuje que presiona a los cortadores contra la roca, logrando que esta se fracture y desprenda del frente de excavación. Cangilones instalados en la cabeza voltean y depositan el escombros en una cinta transportadora que los lleva hacia la parte trasera de la máquina para su evacuación del túnel. Una vez alcanzado el avance de excavación, las patas traseras de la tuneladora se extienden hasta el suelo, se retraen los cilindros de empuje y los grippers se posicionan para el siguiente ciclo de perforación. Se vuelven a anclar los grippers a los hastiales de túnel, se levantan las patas traseras y la perforación comienza nuevamente.

Al tratarse de una tuneladora abierta de viga principal, permite el rápido acceso a la parte trasera de la cabeza de corte para la instalación de medidas de sostenimiento que el terreno requiera, como pernos, cerchas, mallas y hormigón proyectado. En la Figura 3.1 se presenta un esquema de las partes de un topo.

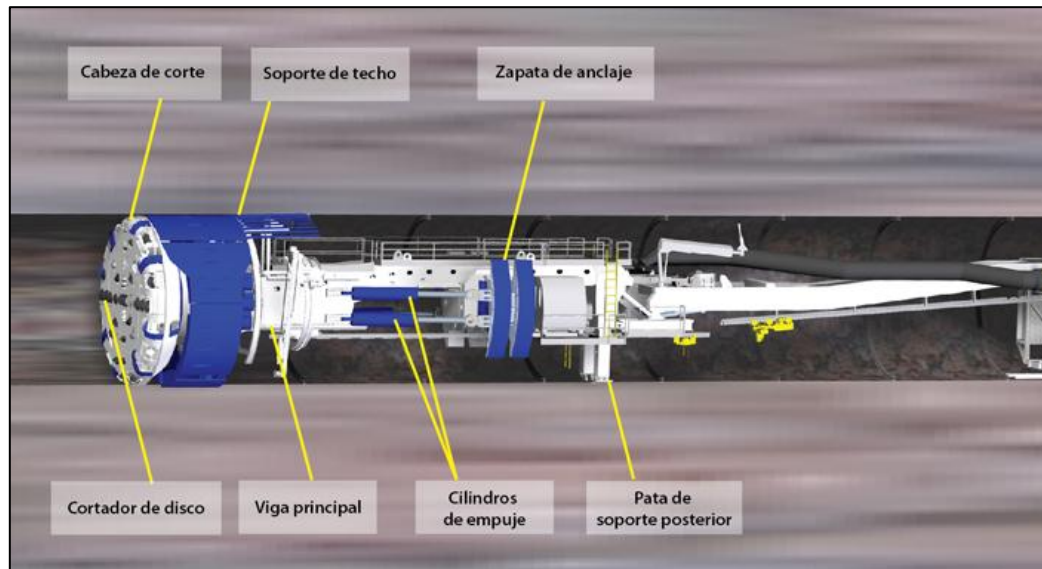


Figura 3.1 Esquema Topo.

3.1.2 Tuneladora Simple Escudo

Para terrenos de roca dura con poca estabilidad, susceptibles a desprendimientos, se hace necesaria la incorporación de un escudo protector tras la cabeza de corte y la posterior colocación de un anillo de revestimiento prefabricado. El escudo no funciona como un sostenimiento temporal, sino que sólo como una barrera que impide la caída de rocas dentro de la máquina y a los trabajadores. Para el avance la maquina puede apoyarse en el anillo de revestimiento, por lo que los grippers no son necesarios. El resto de los componentes son idénticos a los del topo sin escudo. En la Figura 3.2 se presenta un esquema de las partes de un topo con escudo.

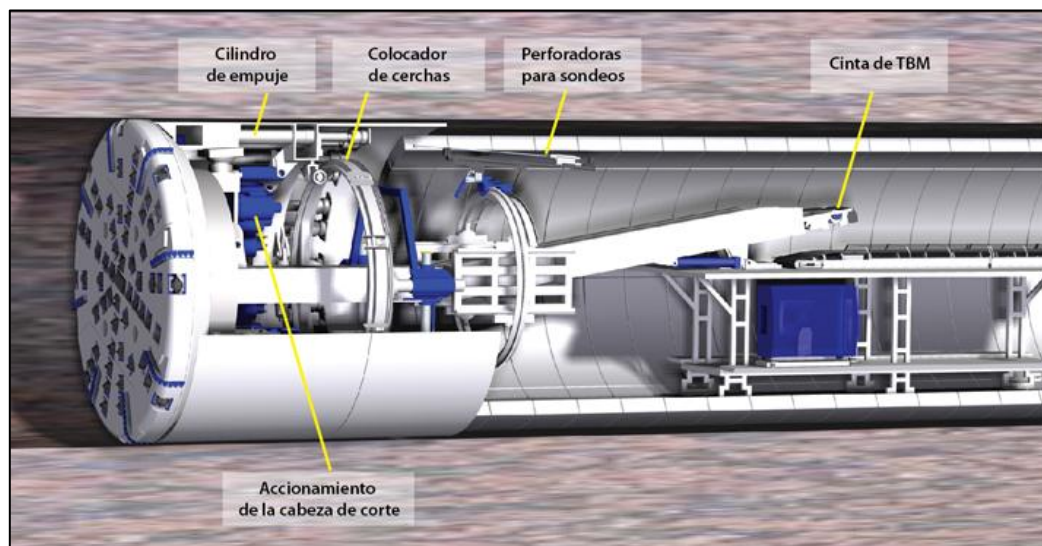


Figura 3.2 TBM simple escudo.

3.2 Tuneladora Doble Escudo (Double Shield Machine)

Las máquinas doble escudo consisten en dos partes dispuestas una detrás de la otra, el escudo delantero está equipado con la cabeza de corte y con los cilindros principales de empuje, mientras que el escudo trasero alberga los cilindros auxiliares, los grippers de apoyo y el sistema erector de dovelas. Al interior y entre ambos escudos, se desliza un escudo telescópico de menor diámetro, que permite avanzar al escudo delantero manteniendo la máquina a cubierto y protegida del terreno durante el avance de excavación. Esta estructuración le permite distintos funcionamientos de acuerdo a la calidad del terreno excavado.

En terrenos de roca dura y estable esta TBM funciona como un doble escudo, donde los grippers son los encargados de resistir el empuje del avance y el torque producido por el giro de la cabeza de corte. La fijación segura de la parte trasera por parte de los grippers permite la colocación simultánea de un segmento de anillos en la cola del escudo, mientras la excavación se encuentra en progreso. En casos de que la roca sea muy estable, la colocación de revestimiento prefabricado puede ser omitida.

En terrenos inestables, donde los grippers no encuentran la resistencia necesaria para apoyarse en el macizo rocoso, esta TBM funciona como un simple escudo. Los grippers se cierran y el empuje necesario para el avance puede ser soportado por el último anillo de dovelas colocado. Los escudos delantero y trasero se retraen y avanzan juntos, empujados por los cilindros de empuje auxiliares apoyados en el revestimiento. En este caso, no es posible realizar de forma simultánea la excavación y el montaje del anillo de dovelas como revestimiento.

En consecuencia, esta tuneladora puede trabajar como doble o simple escudo, en función de la calidad del macizo rocoso, siendo la mejor solución para tramos de tipología variable suelo-roca. En la Figura 3.3 se presenta un esquema de las partes principales de un Doble Escudo.

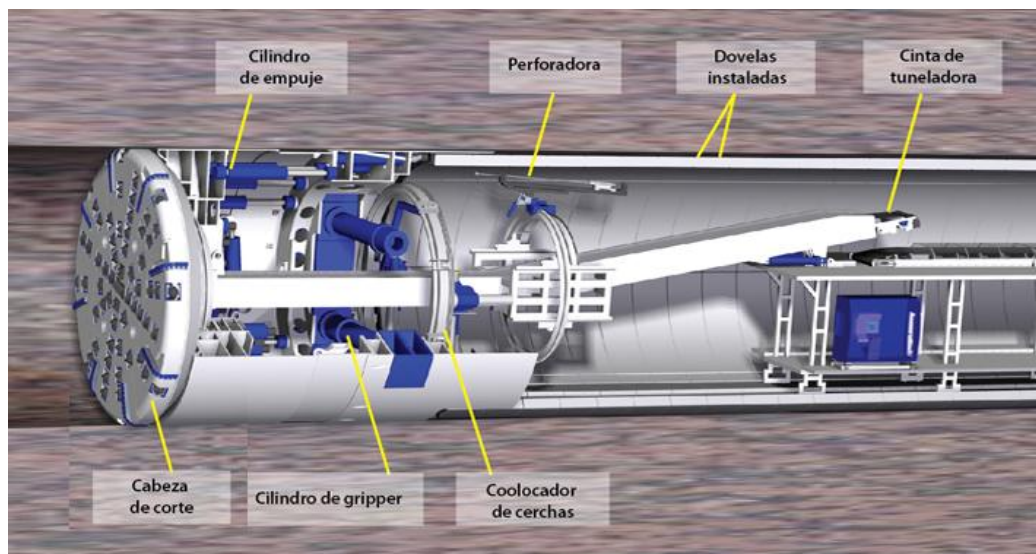


Figura 3.3 Esquema Doble Escudo

3.3 Escudos (Shield Machine)

Los escudos son tuneladoras diseñadas para excavar rocas blandas o suelos, terrenos que necesitan sistemáticamente la colocación de un sostenimiento para la estabilidad del túnel. A diferencia de los topes comunes, los escudos cuentan con una carcasa metálica exterior que sostiene provisionalmente el terreno entre el frente de avance y el lugar donde se coloca el revestimiento definitivo, que normalmente consiste en un anillo formado por un conjunto de dovelas prefabricadas, que garantizan la estabilidad del terreno en todo momento. Además, el escudo debe garantizar la estabilidad del frente de avance que en muchas ocasiones puede encontrarse bajo el nivel freático. Existen varios tipos de escudos que pueden excavar el frente en su sección completa, con diferentes sistemas de soporte, ya sean mecánicos, de aire comprimido, estabilización con lodos, presiones de tierra, etc. En esta ocasión se detallarán los más usados en la actualidad.

3.3.1 Escudo abierto

Se utiliza normalmente cuando el frente del túnel es estable y las afluencias de agua reducidas, bien por trabajarse por encima del nivel freático o bien por ser terrenos impermeables.

En este tipo de escudos, el elemento excavador puede ser manual o estar constituido por un brazo excavador o un brazo rozador. Dentro de este grupo, se deben incluir también los escudos mecanizados con cabeza giratoria, dotada de picas, que en ocasiones pueden ser cortadores de discos, convirtiéndose la máquina en un auténtico topo escudado.

En cualquier caso, son máquinas relativamente sencillas, que se adaptan bien a condiciones variables de terreno, siempre que éstas no sean extremadamente difíciles.

Notar que la condición de frente abierta, no permite controlar las subducciones del suelo y los posibles asentamientos en superficie. La Figura 3.4 muestra una fotografía de un escudo pequeño con una rozadora como elemento excavador.



Figura 3.4 Escudo abierto con rozadora.

3.3.2 Escudo de balance de presión de tierras (Earth Pressure Balance - EPB)

Los escudos de presión de tierra, también llamados escudos EPB, (sigla en inglés Earth Pressure Balance) han sido diseñados para resolver el problema que plantea la estabilidad del frente de excavación cuando el terreno es inestable, estos escudos remoldean el material excavado formando una pasta de suelo que se usa como un medio de soporte plástico y flexible, haciendo posible el equilibrio de las condiciones de presión en el frente de excavación, evitando la entrada incontrolada de suelo en la máquina y permitiendo un avance rápido con un mínimo asentamiento del terreno en superficie.

El funcionamiento de estos escudos, se basa en una cámara de excavación, que se encuentra detrás de la cabeza de corte y recibe el material excavado, esta cámara mantiene una presión producida por la entrada y salida de material en la misma. Gracias a esta se consigue un confinamiento artificial del terreno excavado, permitiendo controlar posibles asentamientos en la superficie, así como un colapso repentino del terreno. El control de esta presión está determinado por la velocidad de avance del escudo, las revoluciones de la rueda de corte, la adición de espuma o arcillas al material excavado y las revoluciones del tornillo sin fin. Este último es el encargado de extraer el material de la cámara de tierras y liberar presión, el escombros es conducido hasta una compuerta regulable donde es vaciado hacia una correa transportadora que lo lleva a la parte trasera de la máquina para su eliminación. En la Figura 3.5 se presenta un esquema de las partes de un escudo del tipo EPB, y en la Figura 3.6 se aprecia un diagrama con el equilibrio de presiones entre la cámara de tierras y el terreno del frente de excavación.

Al igual que en el resto de los escudos, una vez excavada la longitud precisa para un avance, se coloca un anillo de dovelas de hormigón prefabricado en la cola del escudo, sirviendo de revestimiento para el túnel y de apoyo para el siguiente avance de excavación. La colocación de

las dovelas se efectúa mediante un erector giratorio, al cual se le suministran una por una, siendo unidas entre sí a través de tornillos y al terreno mediante la inyección de mortero en el trasdós, que evita la subsidencia del terreno en superficie.

En suelos estables, el escudo EPB puede ser operado en modo abierto, sin presión en la cámara de tierras y con sólo un llenado parcial de esta. En el caso de tener ingreso de agua, la operación también se puede realizar con la cámara parcialmente llena y la incorporación de aire comprimido. En ambos casos no hay control de subsidencias, por lo cual siempre se recomienda trabajar en presión.

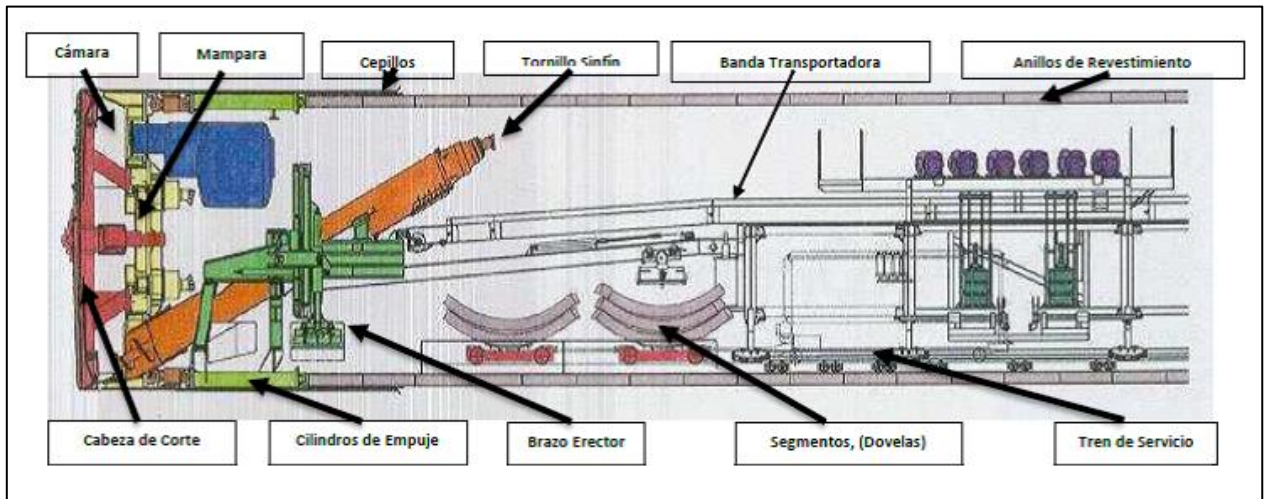


Figura 3.5 Esquema Escudo con Equilibrio de Presión de Tierras o EPB.

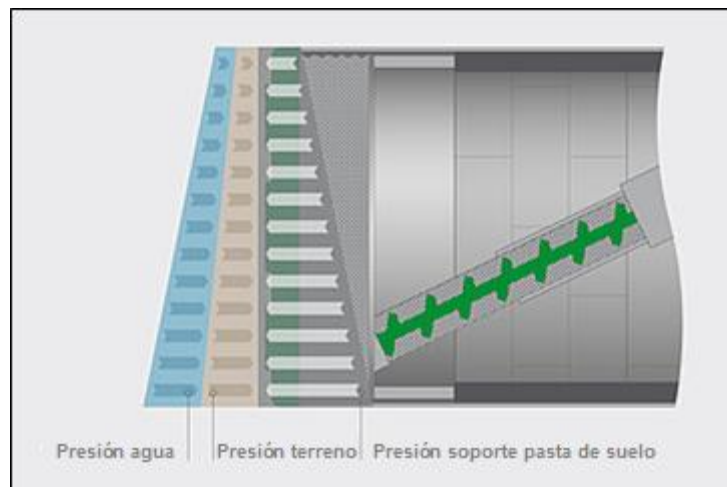


Figura 3.6 Diagrama de equilibrio de presiones en un EPB.

3.3.3 Escudo con presión de lodos (Slurry Shield)

Se trata de tuneladoras con una cabeza de corte cerrada que proporciona sostenimiento al frente de excavación inyectando una suspensión (típicamente bentonita) a presión dentro de la cámara de excavación. Estas máquinas son las más adecuadas para excavar túneles en materiales granulares no cohesivos, inestables, y sometidos a una presión elevada de aguas subterráneas.

La cabeza de corte funciona como medio de excavación, mientras que el sostenimiento del frente se consigue mediante la contrapresión de la inyección, normalmente de una suspensión de bentonita o una mezcla de arcilla y agua (lechada). Esta suspensión se bombea hacia el interior de la cámara de excavación, donde llega al frente y penetra en el suelo formando la torta plástica que garantiza la transferencia de la contrapresión al frente de excavación y proporciona una cierta cohesión que el suelo natural no posee.

Los escombros excavados por las herramientas de la cabeza de corte están formados por suelo natural y por la mezcla de bentonita o arcilla y agua. Dicha mezcla se bombea desde la cámara de excavación hasta una planta de separación situada en la superficie, la que permite reciclar la suspensión de bentonita y enviar el resto del escombros a un botadero.

La colocación del revestimiento y el sistema de avance del escudo, siguen el mismo concepto utilizado en el escudo de presión de tierras, colocando un anillo de dovelas de hormigón prefabricado y apoyándose en este último para empujar el escudo hacia el siguiente avance de excavación.

Estas máquinas resultan especialmente adecuadas para excavar suelos inestables no cohesivos. Desde el punto de vista granulométrico, las tuneladoras de escudo de lodos resultan especialmente adecuadas para la excavación en arenas y gravas con limos. La instalación de una machacadora en la cámara de excavación permite ampliar el campo de aplicación a partículas mayores, al triturar todos los trozos que, de otro modo, no pasarían por el sistema hidráulico de desescombro. Además se pueden utilizar polímeros para mejorar las características reológicas y lograr el bombeo de suelos.

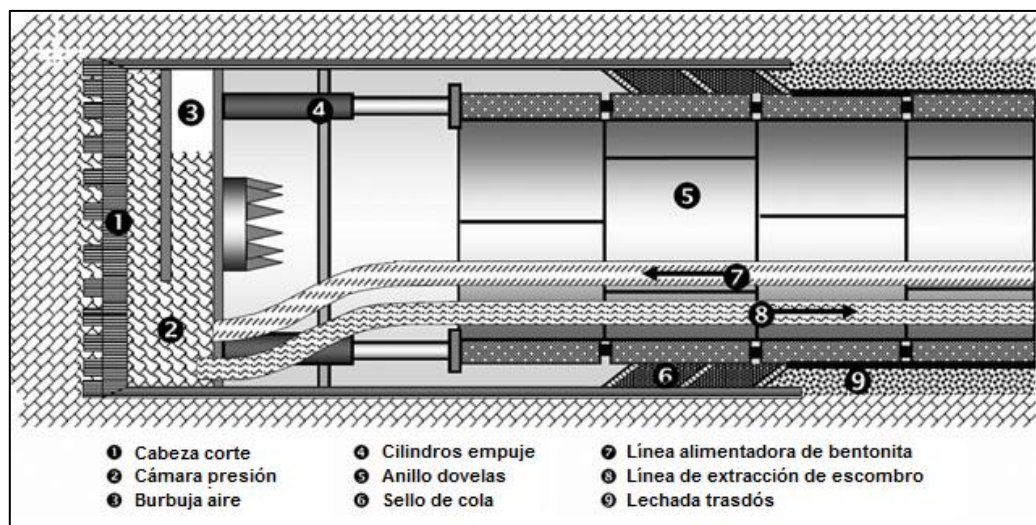


Figura 3.7 Esquema Escudo de presión de lodos o Slurry Shield.

3.4 Escudos Mixtos (Mixshield)

Es cada vez más común, que los nuevos proyectos de túneles atraviesen terrenos de condiciones geológicas altamente cambiantes, que pueden ir desde roca dura hasta un suelo blando de baja compactación. Bajo estas desafiantes condiciones, los Escudos Mixtos se han transformado en una de las mejores soluciones. Dentro de las combinaciones más usadas se encuentran EPB/Slurry y EPB/Topo.

Las máquinas mixtas tienen el potencial de reducir el riesgo y hacer posible excavaciones muy complicadas, siempre y cuando se cuente con información geológica bien detallada. Por ejemplo una máquina híbrida EPB/Topo se puede optimizar hacia uno u otro extremo, en función de si la mayor parte del túnel se encuentra en suelos blandos o en roca dura, para lograr el mayor avance posible a lo largo de todo el proyecto. Si el túnel es un 80% de suelo blando y un 20% de roca dura, el diseño general de la máquina se optimizará hacia EPB. En otras condiciones, tales como un suelo blando y roca, mezclado con sectores de alto contenido de agua, una máquina híbrida Slurry/EPB es deseable.

La Figura 3.8 muestra un esquema de un escudo mixto del tipo Slurry/EPB construido por la empresa alemana Herrenknecht. Es fácil notar el sistema de bombeo Slurry y el tornillo sin fin para el trabajo en EPB.

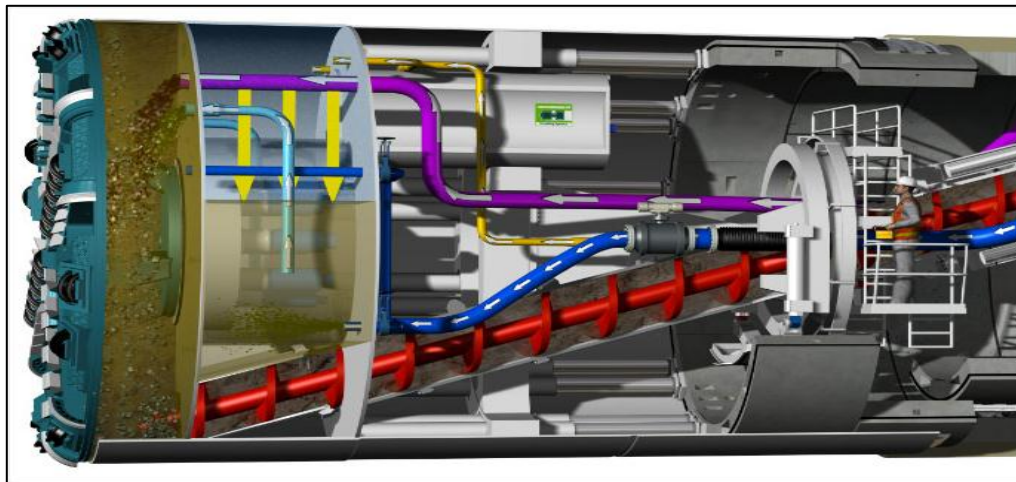


Figura 3.8 Esquema Escudo Mixto o Mixshield del tipo Slurry/EPB.

3.5 Sistema Back-up

Los rendimientos de excavación de un túnel se ven frecuentemente limitados por la velocidad de evacuación del escombros y por el suministro a la tuneladora de los materiales necesarios para la construcción del mismo. El sistema back-up tiene en este punto una importancia tan alta como la misma tuneladora, ya que el ciclo de trabajo se dimensiona con el condicionante fundamental de que no se produzcan tiempos de espera en el frente ocasionados por el transporte. De esta forma, tanto el sistema de transporte como las instalaciones auxiliares del back-up deben ser dimensionados en base al tiempo de excavación de la tuneladora.

El sistema back-up se conforma por un conjunto de plataformas posteriores al escudo, que son arrastradas por la maquina en su avance y que, normalmente, pueden alcanzar longitudes de hasta 130 m, donde se incorporan los siguientes equipos:

- Transporte y almacenamiento de develas.
- Polipastos para manejo de vías y dovelas.
- Sistema de relleno del anillo de dovelas.
- Transformadores y carretes de cables de alta tensión.
- Generadores e iluminación de emergencia.
- Casetes de tuberías de ventilación que almacenan habitualmente 100 m de tubería.
- Sistema de engrase y refrigeración de la tuneladora.
- Bombas hidráulicas.
- Sistema de guiado.
- Sala de máquinas o cabina del operador.
- Ventiladores.

El diseño del back-up se debe adecuar al método de construcción del túnel y al tipo de tuneladora, pudiendo construir desde sistemas simples porticados hasta sofisticados equipos de doble vía y control remoto. Es muy importante decidir cuál diseño representa la mejor opción para el proyecto, ya sean equipos rodantes o deslizantes compatibles con el desescombro mediante trenes, cinta o vehículos con neumáticos.

Los sistemas de back-up más usados se pueden agrupar en los siguientes tipos:

Sistemas back-up de vía única

Un sistema back-up de vía única tiene la ventaja de su poca longitud y su facilidad de operación y mantenimiento. Si su túnel es de pequeño diámetro o de poca longitud, o bien la zona de montajes de equipos tiene sus dimensiones muy restringidas, el uso de un back-up de vía única puede ser la solución más adecuada. Asimismo se suelen utilizar este tipo de sistemas cuando el lugar de arranque de la tuneladora es el fondo de un pozo. Los back-up de vía única pueden combinarse con el desescombro mediante trenes o cinta transportadora, dependiendo de los requisitos del proyecto y la programación de los trabajos.

Sistemas back-up de doble vía

El back-up de doble vía asegura una producción máxima en túneles de gran diámetro donde se desescombra mediante trenes. El retraso de los trenes puede minimizarse aún más instalando un cambio californiano detrás del back-up, para que los vagones vacíos esperen cerca del punto de carga donde, mientras tanto, se llenan otros.

Sistemas back-up para vehículos sobre neumáticos

Este tipo de sistema permite el desescombro mediante cinta o camiones, lo que hace posible la construcción del camino en contrabóveda simultáneamente a la construcción del túnel. Esta flexibilidad hace que este tipo de equipos se utilice frecuentemente en la construcción de túneles de gran diámetro para proyectos de ferrocarril, carreteros o hidroeléctricos.

Cada uno de estos sistemas de back-up se complementa con los más modernos sistemas de evacuación de escombros que pueden adoptar diversas configuraciones, siendo las más frecuentes:

- i. Tren de tolvas: está constituido por una batería de tolvas en número igual al de los vagones de cada tren y con idéntica geometría y colocación. Estas tolvas sirven como regulación y acopio, y se cargan mediante una cinta repartidora del material, no siendo necesaria la presencia del tren que puede estar viajando. Cuando el tren regresa vacío, se sitúa debajo de las tolvas y mediante la apertura simultánea de todas ellas se carga éste de forma prácticamente instantánea, repitiéndose el ciclo.
- ii. Cinta puente: puede alojar en su interior el tren completo y lo carga mientras éste pasa por debajo de la misma. Un cambio californiano, previo a la cinta, permite la espera de un segundo tren. Es necesario realizar las maniobras mediante la locomotora. Todo el conjunto va montado en plataformas que ruedan sobre la vía principal del túnel arrastradas por el topo en su avance.
- iii. Sistema Rowa: consiste en un conjunto de dos vías paralelas, una para vagones vacíos y otra para vagones cargados. Los vagones se mueven sin la locomotora mediante cadenas de arrastre y el cambio de vía se efectúa mediante un sistema hidráulico. Todo el sistema se controla por un operador situado ante un monitor de TV.
- iv. Cintas convencionales: que transportan el escombros desde la máquina hasta el exterior, eliminándose el transporte sobre vía. Este procedimiento de transporte continuo cada vez se utiliza más frecuentemente, porque aumenta el rendimiento al eliminarse tiempos muertos (descarrilamientos, esperas, ...). La cinta dispone de 125 –150 m, que permite realizar el avance semanal sin necesidad de empalmarla.



Figura 3.9 Sistema Back Up de un escudo Herrenknecht.

4 EXPERIENCIA DE TUNELADORAS EN EL MUNDO

Un gran cambio ha tenido el mundo de la construcción en las últimas décadas y más aún cuando de infraestructura subterránea se trata. El crecimiento de la población y las ciudades han exigido estructuras de alta capacidad para atender las necesidades de las personas, estas han debido buscar lugar bajo tierra debido a la saturación en superficie, es así como hoy en día se construyen megaestructuras subterráneas por todo el mundo, autopistas, líneas de Metro y sus respectivas estaciones, túneles ferroviarios, entre otros. Dentro de estos proyectos de túneles, la tendencia hacia el uso de tuneladoras se ha impuesto sobre los métodos tradicionales, tal como se muestra en el gráfico de la Figura 4.1. Las razones por las cuales el uso de tuneladoras ha experimentado este crecimiento, son principalmente su rapidez y seguridad. A continuación se mencionan algunas experiencias de Metro a nivel mundial y local:

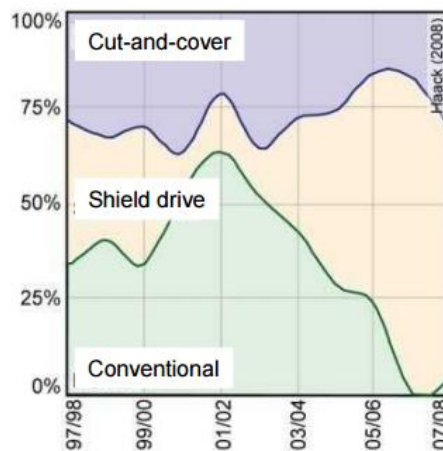


Figura 4.1 Proporción de diferentes métodos constructivos para túneles de Metro (Haack, 2008).

4.1 Experiencia en Europa - Ampliación Metro de Madrid 2003 – 2007

El Plan de Ampliación de la red del Metro de Madrid 2003-2007 ha supuesto, con una inversión de 4.352 millones de Euros, poner en servicio 82,9 km de nueva red de Metro, de la cual 64,7 km son subterráneos. Para la ejecución de los correspondientes túneles se han utilizado diferentes métodos constructivos en función de las características del trazado, del terreno existente en el subsuelo a atravesar y del tipo de urbanización y edificación existentes en superficie. Así, se han utilizado el denominado Método tradicional de Madrid, el sistema de excavación entre pantallas, y la perforación mediante tuneladora.

Con fecha 30 de octubre de 2006 se habían ejecutado un total de 39,7 km con tuneladora, gracias al trabajo de **10 máquinas tuneladoras, operando en doce frentes de ataque distintos**. En diciembre de 2006 se completaron los 40,7 km previstos inicialmente en el plan.

Las tuneladoras, trabajando en tres turnos diarios los siete días de la semana y sin más interrupciones que las derivadas de las necesarias operaciones de mantenimiento o reparaciones,

avanzan de forma continua excavando el terreno tras fluidificarlo, recubren el túnel con el revestimiento definitivo y rellenan el trasdós del mismo con lechada de cemento o mortero para evitar la presencia de huecos, de forma que una vez ha finalizado su trabajo, sólo resta una adecuada limpieza, y el montaje de vía, de la alimentación eléctrica de los trenes, de las señales y de las comunicaciones.

En la Tabla 4.1 se identifican las diferentes tuneladoras utilizadas en este proyecto de ampliación, cabe mencionar que de las 10 tuneladoras, 7 han sido usadas en otros proyectos y varias de ellas ya tenían más de 10 km de túneles excavados. Dato importante al momento de evaluar económicamente el proyecto, ya que permite amortizar la inversión de la máquina en más de una obra.

Tuneladora	Tipo	Diámetro [m]	Rendimiento promedio [m/mes]	Long exc [m]	Rendimiento máximo [m]	Estado	Observaciones
Carpentana	EPB	9.4	380	2.601	655	Usada	Parada 45 días aprox por avería
Carpentana	EPB	9.4	450	2.013	-	Usada	
Excavolina	EPB	9.4	460	2.153	855	Usada	11,6 km ya construidos
Rompearenas	EPB	7.3	-	4.030	900	Usada	
Mascastiza	EPB	9.4	390	5.583	700	Usada	11 km ya construidos
Guster	EPB	9.4	415	4.301	900	Nueva	
Adelantada	EPB	9.4	450	2.489	900	Usada	14,5 km ya construidos
Verne	EPB	8.9	370	3.090	700	Usada	Parada 45 días aprox por avería
Metromachine	EPB	9.4	410	4.886	700	Nueva	
Madriladora	EPB	9.4	420	3.843	-	Usada	
Chotis	EPB	9.4	310	4.476	700	Nueva	Retraso de 2 meses por avería
Adelantada	EPB	9.4	660	1.320	-	Usada	

Tabla 4.1 Tuneladoras EPB que trabajaron en la ampliación del Metro de Madrid 2003-2007 (MINTRA, 2007)

Notar varias de las máquinas, incluso las usadas, superaron el rendimiento promedio de 450 m/mes, esto hace prácticamente 10 años. Por lo cual se espera que las mejoras realizadas en los diseños de las actuales tuneladoras, superen sin problema estos desempeños.

4.2 Experiencia en Latinoamérica

Las grandes ciudades de latinoamericanas también han aumentado considerablemente su densidad poblacional, lo cual trae consigo grandes problemas de movilización, especialmente en rutas de alto tráfico, es por eso que en varias de estas ciudades se ha decidido construir las primeras líneas de metro o construir nuevas para reforzar la red existente. Es así como en varios de estos proyectos se ha decidido optar por la excavación mecanizada de los túneles mediante el uso de tuneladoras. A continuación en la Tabla 4.2 se muestra información recopilada de diferentes presentaciones en seminarios de túneles, donde se han entregado detalles de algunos de los proyectos de Metro desarrollados en desarrollo en los países de la región:

País	Proyecto	Tipo tuneladora	Diámetro [m]
Panamá	Línea 1 Panamá	EPB	7,73
Venezuela	Metro Caracas	EPB	5,85
Brasil	L5 Sao Paulo	EPB	10,54
Brasil	L4 Río Janeiro	EPB	11,46
Perú	L2 Lima	EPB y Slurry	10,2
Ecuador	L1 Quito	EPB	9,43
Colombia	L1 Bogotá	EPB	-
Argentina	Línea Sarmiento B. Aires.	EPB	11,46

Tabla 4.2 Líneas de Metro proyectadas y en construcción en Latinoamérica

Sin ir más lejos, el año 2013 en el *Seminario Metro en Curitiba – Contribuciones de la Ingeniería*, se presentaron los gráficos de la Figura 4.2, en que se muestra cómo ha cambiado el porcentaje de utilización de los distintos métodos constructivos en el Metro de Sao Paulo, donde las máquinas tuneladoras que partieron con una participación del 10% en la Línea 1, han llegado a construir el 75% de la Línea 5 y 6.

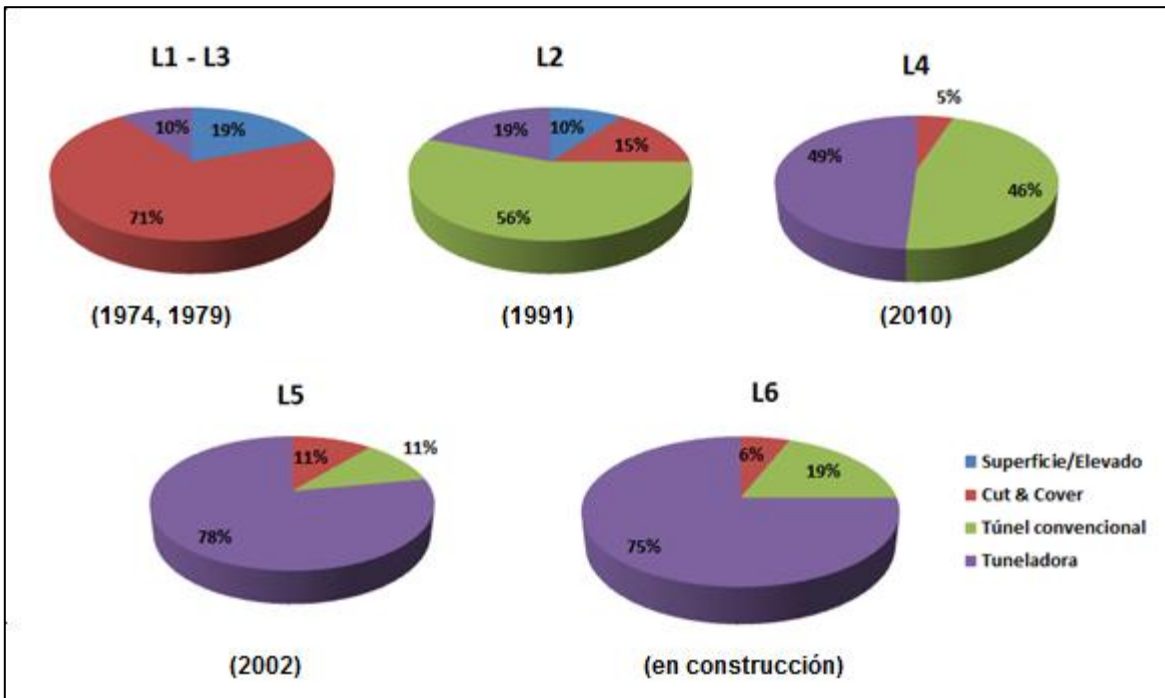


Figura 4.2 Porcentajes de utilización de distintos métodos constructivos en la construcción del metro de Sao Paulo, Brasil. (Rocha, 2013).

4.2.1 Proyecto Metro de Lima Línea 2 y Ramal Línea 4.

En marzo del 2015 se dio inicio a la construcción de la Línea 2 y el Ramal Línea 4 en Lima, Perú. Proyecto que consiste en la implementación de una línea de Metro subterráneo en el eje Este – Oeste de la ciudad, de 27 km de longitud (Línea 2 de la Red Básica del Metro de Lima), y un ramal de 8 km que une Lima con Callao,

En un plazo de 5 años y con una inversión aproximada de US\$5.400 millones, el proyecto contempla

- La Construcción de un total de 35 km de túnel subterráneo (27 km de la línea Este – Oeste y 8 km del tramo Av. Elmer Faucett – Av. Néstor Gambetta).
- La construcción de estaciones de pasajeros, las cuales serán construidas mediante el método Cut and Cover y en caverna.
- La construcción e implementación de patios talleres.
- La implementación de la superestructura, el equipamiento electromecánico, sistemas ferroviarios y la alimentación eléctrica, necesarios para la operación del metro.
- La adquisición de material rodante.

La solución tecnológica constructiva prevista para la realización del túnel interestación, es la excavación mecanizada mediante el uso de dos tuneladoras de 10,2 m de diámetro, una del tipo EPB para los suelos de gravas arenosas y otra del tipo Slurry Shield en los tramos con suelos con una importante carga hidráulica. Es primera vez que se usarán tuneladoras en la ciudad.

Ambas máquinas han sido encargadas a la empresa alemana Herrenknecht, empresa que tiene gran presencia en el mercado de las tuneladoras, y llegaron a Lima durante el primer trimestre del año 2016, donde se ensamblan bajo tierra y se preparan para la puesta en marcha. Mientras tanto, los avances de los túneles en la etapa 1-A se van realizando con el método tradicional NATM, se han proyectado un total de 9 km con este método y 26 km para las tuneladoras.

La tarea de excavación no se detendrá ningún día ni hora de la semana, gracias a un sistema rotativo de dos turnos, más de 80 personas bajo tierra y el mismo número en superficie, se encargarán del adecuado funcionamiento de las tuneladoras, aunque en los primeros días de excavación se contará sólo con 44 trabajadores extranjeros especialistas con experiencia en tuneladoras: mecánicos, electricistas, pilotos y erectoristas, que a lo largo de los meses irán entrenando personal local para estas tareas.

4.3 Experiencia en Chile

Aunque Chile es uno de los países mineros más importantes del mundo y está dentro de aquellos que emplean un alto nivel de tecnología, la utilización de máquinas tuneladoras ha sido escasa comparada con los países vecinos. Dentro de los proyectos que han innovado en el uso de esta técnica de excavación de túneles se cuentan proyectos de exploración minera y centrales hidroeléctricas de paso, constituyendo sólo experiencias de excavación en roca. A continuación se mencionan detalles de dos proyectos importantes, primero el Proyecto Construcción Túnel Sur de la Minera Los Bronces que ya está terminado y luego un proyecto nuevo que se encuentra en proceso de montaje de las tuneladoras, Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo.

4.3.1 Proyecto Construcción Túnel Sur – Minera Los Bronces

En el año 2012 y como necesidad de contar con un acceso permanente, expedito y seguro para sondear un futuro yacimiento de sulfatos, se comenzó a desarrollar la construcción de un túnel de 8.125 m de longitud desde un portal ubicado a 3.608 metros sobre el nivel del mar, en la División Los Bronces. Este proyecto se ejecutó en un solo frente, demandando numerosos desafíos técnicos y logísticos.

La tuneladora utilizada para excavar este túnel es del tipo TBM de doble escudo híbrida acondicionada para realizar un ciclo de excavación de 1,4 m, con un diámetro de 4,5 m y 90 m de longitud incluyendo el sistema back-up (Figura 4.3). Las marinas de la excavación fueron llevadas a la superficie por una cinta transportadora, el sistema logístico se realizó a través de una vía férrea usando locomotoras diésel con sistemas de filtros de contaminantes de alta tecnología, la vía férrea fue montada sobre dovelas de piso de hormigón prefabricado. La fortificación del túnel fue compuesta por pernos de anclaje y malla de acero en terreno de buena calidad, mientras que en los sectores con terrenos de mala calidad geomecánica, se utilizaron dovelas metálicas para evitar la caída de roca fracturada, tal como se muestra en la Figura 4.4.



Figura 4.3 Doble escudo híbrida, Proyecto Túnel Sur - Minera Los Bronces.

Los primeros meses fueron de puesta en marcha, en este periodo se realizaron algunas modificaciones a la TBM y a la metodología de trabajo, además del entrenamiento y adaptación del personal especializado. La dotación de este personal incluyó 6 personas para el erector de dovelas, 3 instalando dovelas de piso y 3 en fortificación, en el back-up trabajaron otras 12 personas, entre las cuales se encuentra el operador de la TBM, el maestro mecánico y electrónico de la máquina y el personal de apoyo, como eléctricos, mecánicos, soldadores, supervisores, encargados del ingreso de materiales y de prolongar la cinta transportadora, entre otras faenas.

Una vez alcanzada la roca competente, la TBM alcanzó tasas de avance por sobre los 20 m/día, superando en ocasiones los 35 m/día, con avances cercanos a los 400 m/mes, no sin dificultades, pero con una clara demostración de que se pueden obtener avances significativos con esta tecnología.



Figura 4.4 Interior Túnel Sur, sostenimiento con dovelas metálicas.

Si bien el armado, operación y mantención de la TBM fue responsabilidad del fabricante de la tuneladora, tanto el mandante Anglo American como el contratista Consorcio Dragados Besalco, vieron la necesidad de formar especialistas nacionales para la ejecución de futuros túneles con TBM en el país. Para cumplir este objetivo, en 2010 se comenzó con la formación de operadores TBM y especialistas eléctricos y mecánicos en la mantención de la TBM, Así los cuatro turnos de trabajo contaron con operadores y especialistas nacionales a medida que avanzó el proyecto.

4.3.2 Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo

El Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo, que constituye una nueva central hidroeléctrica de paso al interior del Valle Cajón del Maipo, constituye un gran desafío en cuanto a construcción subterránea, ya que requiere de la excavación de 67 km de túneles para la captación y devolución de las aguas de los ríos.

Los túneles serán excavados mediante dos métodos constructivos, Drill and Blast (perforación y tronadura) en 38 km de longitud y mediante tuneladora los 29 km restantes, para los cuales el proyecto Alto Maipo contempla tres TBM de última generación de diámetros 4,1; 4,5 y 6,9 metros, construidas por Herrenknecht en Alemania y Robbins Company en EEUU. Estas tuneladora recientemente han comenzado la excavación, por lo cual no se tiene información de su rendimiento.



Figura 4.5 TBM Proyecto Alto Maipo.

5 SELECCIÓN DE TUNELADORA PARA LOS SUELOS DE SANTIAGO

Con el fin de evaluar el tipo de máquina y soporte del frente requerido para un determinado proyecto, existe una cantidad mínima de información necesaria para que el proveedor realice un diseño que se ajuste a las características propias del proyecto. Teniendo en cuenta que el aporte de mayor información ayudará a definir con mayor precisión las especificaciones de la máquina y conducirá a una decisión más estudiada.

5.1 Información requerida para las especificaciones de la tuneladora

Dentro de la información necesaria para definir las especificaciones y requerimientos para garantizar el uso de una tuneladora adecuada para un proyecto en particular, se deben considerar las siguientes:

- Geología del terreno a excavar
- Trazado del proyecto (tanto perfil vertical como horizontal)
- Restricciones del sitio de trabajo
- Conocimiento y experiencia local
- Disponibilidad de aditivos y costos
- Sensibilidad del comprador al costo total

5.1.1 Geología

Las condiciones geológicas previstas a lo largo del trazado son críticas para la selección de la tuneladora. El tipo de suelo, las rocas y la presencia de agua tienen un impacto fundamental en la selección de la máquina. El tipo de información proporcionada generalmente incluye, tipo, descripción y parámetros de resistencia del suelo o roca, curvas granulométricas de los suelos, permeabilidad y el nivel de agua por encima o debajo del trazado del túnel.

Simple cambios en la geología o la presencia de agua pueden cambiar el tipo de tuneladora de una simple máquina de frente abierto a una máquina de frente completamente presurizado como una EPB o Slurry Shield, tipos de máquinas con parámetros operativos complejos.

5.1.2 Trazado del túnel

El trazado del túnel es otra información crítica para la selección de una adecuada tuneladora. La máquina debe ser diseñada y construida para ser capaz de excavar el túnel proyectado a lo largo del trazado preestablecido. Detalles como el radio mínimo de curva horizontal o vertical pueden tener un impacto considerable en el diseño y configuración de la máquina. Una curva de radio 300 m es abordable para la mayoría de los tipos de tuneladoras, pero si el radio se reduce a 200 m o menos, el diseño de la tuneladora debe hacerse cuidadosamente para asegurar que esta y todo su equipo auxiliar pueda afrontar esta ajustada curva.

También, parte del trazado está definida por la pendiente del túnel. La mayoría de los túneles de Metro, carreteras o hidráulicos, poseen límites de pendientes definidas por el uso final que este tendrá. Sin embargo, ha habido casos en los que se han excavado túneles con pendientes de hasta

un 70%, bajo estas condiciones de inclinación, el diseño de la tuneladora debe considerar la ergonomía de la operación en pendiente así como las limitaciones del sistema hidráulico.

Un punto de interés para los fabricantes y diseñadores de tuneladoras es la profundidad del túnel a excavar, la que puede influir en las presiones de carga del suelo que debe resistir la carcasa de la tuneladora.

Por último, el diseño de una máquina para excavar un túnel de 1.500 m de largo, no es el mismo diseño para una máquina que excavará un túnel de 15.000 m de largo. El funcionamiento y los principios de la máquina pueden ser los mismos, pero la selección de los componentes individuales debe cambiar con el fin de alcanzar la vida operativa para el túnel más largo.

5.1.3 Restricciones del sitio de trabajo

El acceso y tamaño al sitio de trabajo puede impactar en la selección de la tuneladora. El tamaño del lugar de trabajo, la capacidad de disponer de grúas para levantar y colocar la tuneladora en posición para iniciar la excavación, dictará el tamaño de los módulos individuales en los que la máquina puede ser enviada por el fabricante.

La ubicación del lugar también podrá restringir el tamaño permitido de los módulos en que se enviará la tuneladora, cuanto menor sea el tamaño de los componentes individuales, mayor será el tiempo de desmontaje en la planta de fabricación y el montaje en el lugar de trabajo. Dentro de los factores a considerar en la ubicación del lugar de trabajo se pueden mencionar los siguientes.

- **Espacio disponible:** se debe verificar se es suficiente para la instalación de los equipos y para el funcionamiento eficaz de la obra.
- **Restricciones de acceso:** estudiar si los caminos locales de acceso a la obra son del tamaño suficiente para permitir el tránsito de grandes piezas de equipos y una eficiente eliminación de los escombros de la excavación.
- **Equipamiento disponible:** revisar si existe una grúa con capacidad suficiente para levantar el máximo tamaño de los componentes de la tuneladora que serán enviados.

5.1.4 Aditivos

En el caso de que la selección de la tuneladora esté entre el tipo EPB y Slurry, de deberá considerar el uso de aditivos para su operación con el fin de controlar el comportamiento del material excavado. En una tuneladora del tipo EPB los aditivos incluyen agua, espumas, polímeros, arcillas o cualquier combinación de ellos. En una tuneladora del tipo Slurry los aditivos están formados principalmente por bentonita en suspensión, pero también pueden incluir polímeros especiales y otros agentes que ayuden a la separación de los suelos de granos más finos de la bentonita.

La disponibilidad de los aditivos en cantidad y precio, además del uso permitido (la bentonita es considerada un contaminante en algunos países), pueden restringir la selección del tipo de tuneladora.

5.1.5 Experiencia del comprador y soporte local

El nivel de experiencia del contratista y la mano de obra local también puede dictar preferencias a un tipo de tuneladora y a una marca de fabricante en particular. Si los contratistas y trabajadores locales han utilizado un tipo de máquina en proyectos pasados, entonces la infraestructura local estará disponible para apoyar este tipo de máquina. Un nuevo tipo de tuneladora puede tener una curva de aprendizaje más larga, requiriendo una asistencia por más tiempo después de la puesta en marcha y las empresas locales no estarán preparadas para dar soporte al equipamiento.

5.1.6 Estructuras críticas en superficie

La presencia de estructuras importantes al nivel de superficie tales como monumentos históricos, edificios antiguos, subterráneos, servicios, etc. y el nivel de asentamientos que estas estructuras pueden tolerar, obligará al uso de una tuneladora con presión en el frente, del tipo EPB o Slurry, con el fin de reducir al máximo esta subsidencia o al menos poder controlarlas a valores admisibles utilizando los dispositivos disponibles en la máquina.

5.1.7 Programación del proyecto

Con el objetivo de acortar los tiempos en la adquisición de la tuneladora, el uso de equipos reacondicionados o ya disponibles puede imponer el tipo de máquina a usar, aprovechando lo que el contratista pueda tener en sus manos rápidamente en el diámetro requerido, pero que no siempre resulta ser la máquina más adecuada.

El calendario también puede forzar el uso de más de una máquina, que en el caso de la tuneladora del tipo Slurry puede tener un gran impacto en el tamaño de la planta de tratamiento de lodos en superficie.

Los ingenieros deben ser conscientes de la programación que están exigiendo y del impacto en el tipo de máquina que estará disponible para el proyecto, ya que en vez de una tuneladora hecha a la medida para las especificaciones del proyecto puede que sólo haya disponible máquinas que son adecuadas, pero no ideales para las condiciones previstas a lo largo del trazado.

Los programadores también deben considerar que la velocidad de avance de cada tipo de tuneladora será diferente. Máquinas del tipo EPB bajo buenas condiciones de terreno y funcionamiento pueden ir más rápido que una máquina de del tipo Slurry cuya velocidad de avance será más restringida por el sistema de lodos detrás de él. Sin embargo, la máquina EPB probablemente requerirá más mantenimiento de las herramientas de la cabeza de corte. Así al final del día la máquina EPB tendrá una mayor producción, pero en el transcurso de una semana o mes la tuneladora Slurry pondrá acortar esa ventaja

5.2 Geología de Santiago

Uno de los factores principales a la hora de escoger el tipo de tuneladora adecuada para construir un túnel para una línea de Metro en Santiago, es la geología del terreno a excavar. La experiencia acumulada en las obras subterráneas desarrolladas en Santiago, sumado a innumerables estudios geológicos, han llevado a definir un detallado perfil geotécnico de los suelos presentes en la cuenca de Santiago que permitiría elegir de mejor manera la tuneladora más eficiente bajo estas condiciones.

La ciudad de Santiago está conformada principalmente por depósitos aluviofluviales provenientes de las hoyas hidrográficas de los ríos Maipo y Mapocho, y en un menor grado, por material proveniente de remociones en masa. Geológicamente el subsuelo de la mayor parte del Gran Santiago, se ubica principalmente en la zona correspondiente a la unidad geológica denominada “ripio típico de Santiago”, la cual está compuesta por gravas arenosas de cantos redondeados, con bolones aislados y finos arcillo-limosos rodeando las partículas gruesas provenientes de los depósitos fluviales de los ríos Mapocho y Maipo. Estos sedimentos son homogéneos y de mediana a alta compacidad, con algunos bolsones puntuales de gravas carentes de arena y zonas sueltas poco consolidadas en estratos de depositaciones más recientes.

Otra unidad importante y presente en el norte de Santiago, es la denominada “finos del noreste” formada por depositaciones de limos y arcillas de plasticidad media que se extienden hasta más de 25 m de profundidad, con intercalaciones de gravas, arenas y cenizas de origen volcánico.

En las cercanías del límite oriental de la cuenca, los sedimentos mencionados engranan con depósitos finos de conos de deyección que se desprenden de quebradas orientadas este oeste, provenientes de la Cordillera de los Andes.

La distribución de estas unidades predominantes de la ciudad de Santiago, se puede observar en la Figura 5.1, correspondiente a una carta geológica de la Región Metropolitana.

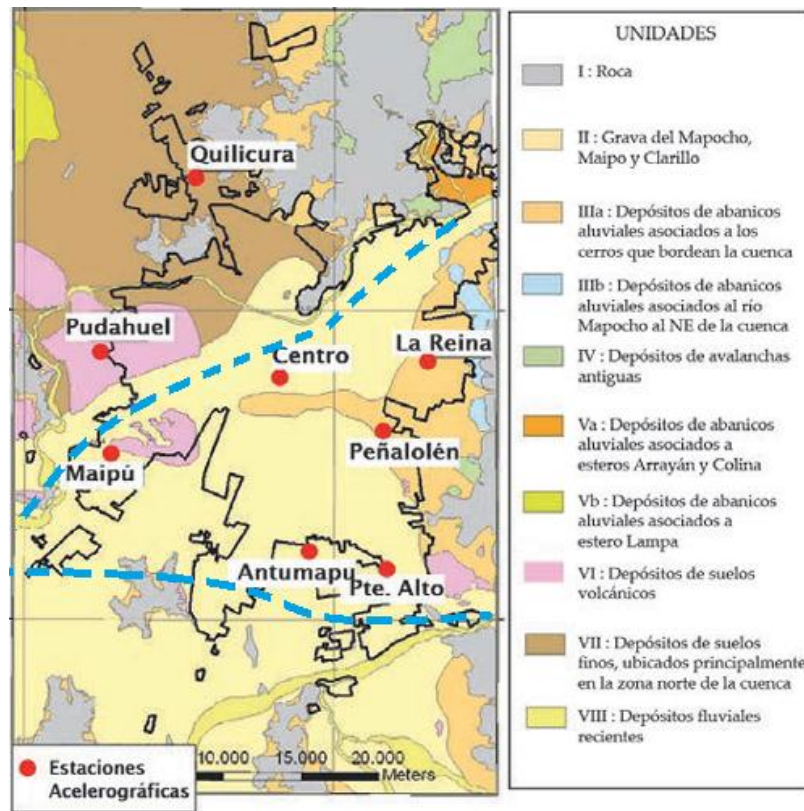


Figura 5.1 Carta geológica de Santiago de Chile (Leyton et al., 2011)

Es importante mencionar que es posible encontrar zonas intermedias que mezclan depósitos de gravas y finos con compacidad media a alta, que no difieren demasiado de las unidades anteriormente mencionadas.

Por otra parte, el nivel freático, debido a la naturaleza permeable de los depósitos de la cuenca de Santiago y al agotamiento de las napas subterráneas en algunos sectores, presenta una profundidad bastante variable a lo largo y ancho de la cuenca de Santiago. La Figura 5.2 muestra en planta las diferentes profundidades de la napa freática existentes en la Región Metropolitana, los datos provienen de un proyecto Fondef realizado por la Universidad de Chile en conjunto con Aguas Andinas, en donde se realizó una discretización bastante gruesa de los datos, dando origen a 4 intervalos: profundidades entre 0 m y 10 m; entre 10 m y 20 m; entre 20 m y 30 m; y entre 30 m y 230 m. Es fácil identificar que en más de la mitad de Santiago la napa freática supera los 30 m de profundidad, salvo los sectores norte y poniente, donde el nivel freático no supera los 10 m en promedio. Sin embargo, existen singularidades como lo evidenciado por la construcción de la Línea 3 en el sector de Conchalí, en donde las excavaciones han superado los 25 m sin encontrar presencia de agua.

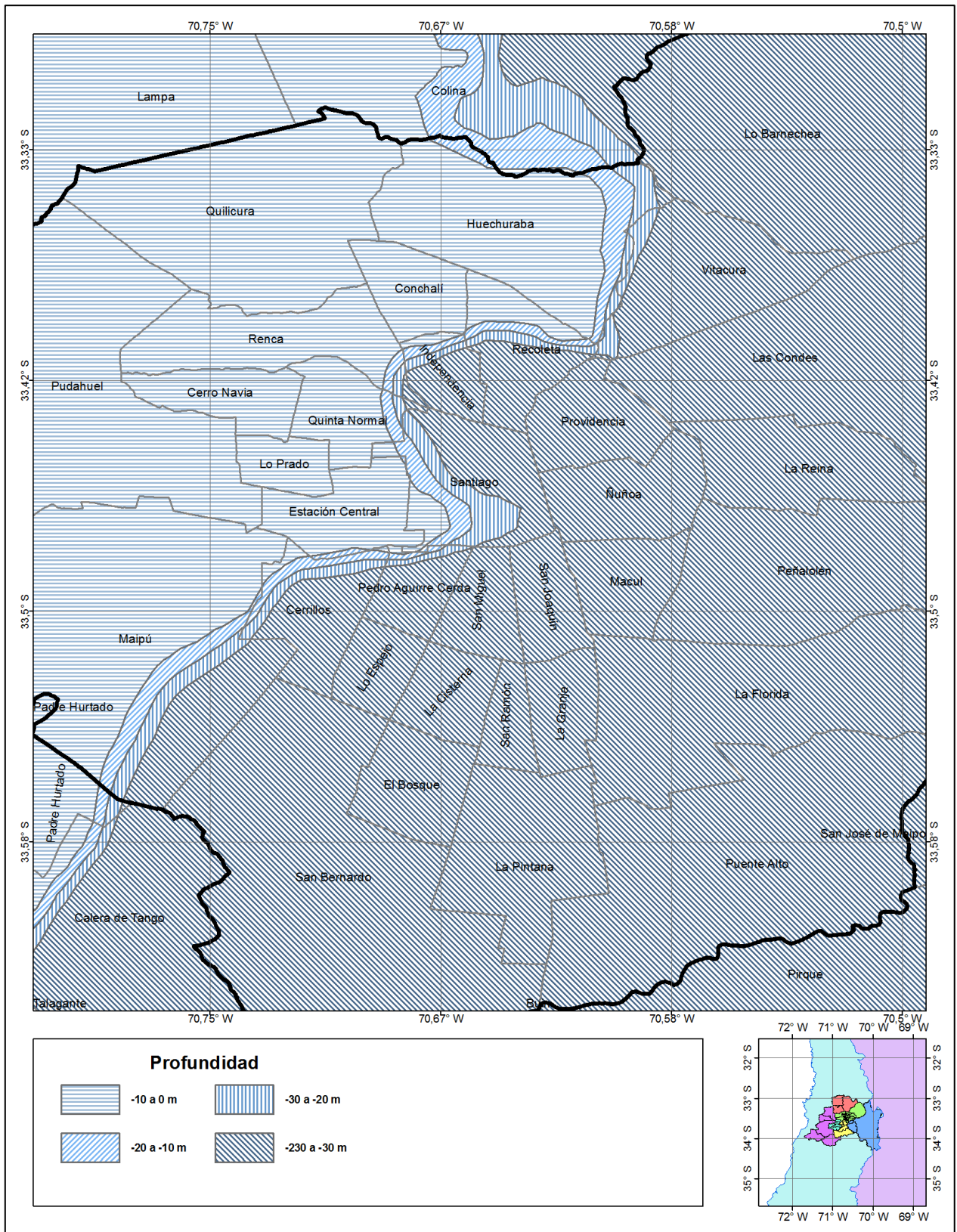


Figura 5.2 Nivel freático cuenca de Santiago (Universidad de Chile, 2003)

Basado en la última experiencia de construcción de la Línea 3 del Metro de Santiago, se puede apreciar claramente en la Figura 5.3 y la Figura 5.4, las condiciones típicas del terreno tanto para gravas como suelos finos. La estabilidad del frente de excavación es evidente.

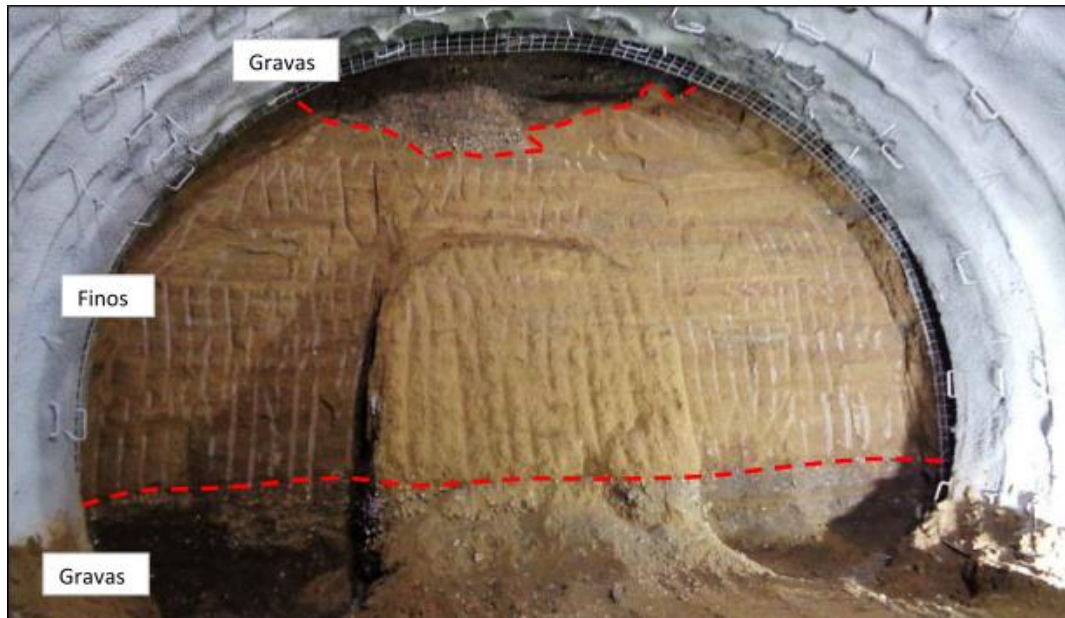


Figura 5.3 Sección de interdigitación entre suelos finos y gravas.

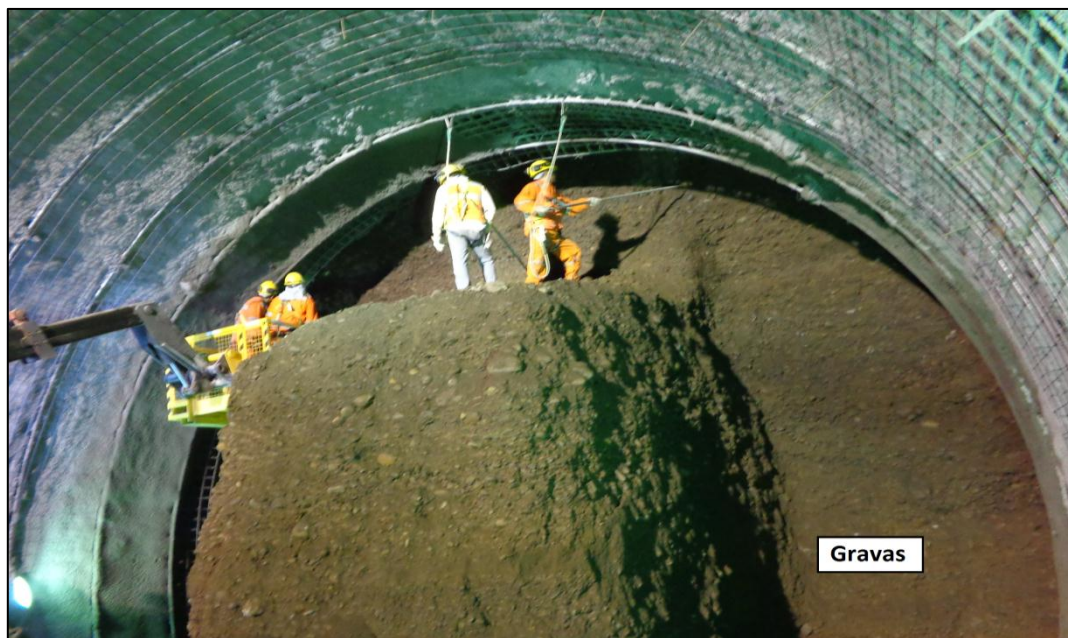


Figura 5.4 Sección con predominación de Gravas.

5.3 Casos críticos a enfrentar

Afortunadamente la cuenca de Santiago es bastante homogénea y conocida, y no presenta grandes desafíos geológicos dentro de los posibles trazados de las futuras líneas del Metro de Santiago, la presencia de gravas y finos limo arcillosos predomina bajo la superficie de la capital. Sin embargo hay pequeños eventos particulares con los cuales una excavación de túnel se puede encontrar y deben ser enfrentados con el debido cuidado. Se pueden nombrar los siguientes:

- Lentas de arena suelta a nivel de la clave del túnel.
- Bolsones de gravas pobremente graduadas y sin cohesión.
- Napas subterráneas cerca de los cursos de agua.
- Napas colgadas, infiltraciones de canales o servicios sanitarios.
- Roca, sólo en el caso de que el trazado cruce bajo algunos de los cerros presentes dentro de la cuenca, como el Cerro San Cristóbal y el cerro Santa Lucia por ejemplo.

5.4 Máquina tuneladora adecuada para los suelos de Santiago

En consideración de la geología reinante en la cuenca de Santiago, en donde predomina la presencia de gravas arenosas de matriz arcillo limosas, cohesivas, bien consolidadas y estables, sólo con eventuales lentes de arena suelta. Además de la profundidad importante de la napa subterránea, salvo en lugares cercanos a la rivera de ríos o eventuales napas colgadas. Se prevé excavar un material cohesivo de alta compacidad, con baja probabilidad de presencia del nivel freático y sin presencia de rocas con bolones de tamaño máximo aproximado 30 cm. En resumen, se trata de un suelo blando de buena calidad y estabilidad, sin presencia importante de agua.

En consecuencia a lo anterior, existe más de un tipo de máquina tuneladora adecuada para excavar en los suelos de Santiago, los escudos del modo EPB y Slurry se establecen como las mejores opciones para realizar estos trabajos de excavación, eventualmente se descartaría un escudo abierto ya que no permite el control de deformaciones en la superficie; aunque hoy en día el método de excavación convencional utilizado es abierto, por lo que una máquina de este tipo para Santiago se podría estudiar con mayor profundidad.

- El *Escudo de Balance de Presión de Tierras o EPB*, ofrece un rendimiento eficiente bajo suelos cohesivos, principalmente los arcillosos. Los suelos gravosos también son excavados con éxito por este tipo de máquinas, siempre y cuando se agreguen aditivos como espumas, suspensiones de arcilla o polímeros, incluso agua, que ayuden a remodelar la pasta de suelo, evitando un desgaste excesivo de las herramientas de corte, cámara de presión y el tornillo transportador. A la vez este tipo de máquinas puede trabajar en modo abierto, sin presión en la frente, en sectores donde la estabilidad de terreno lo permita, situación que pareciera ser recurrente en los suelos de Santiago de sectores poco edificados. Esta máquina sería la adecuada para enfrentar los suelos finos sector norte y el paso a gravas más al centro de la capital. Uno de los principales problemas a enfrentar con este tipo de máquina sería el tamaño de los bolones que podrían obstruir el paso por el tornillo sinfín, salvo que éste se diseñe especialmente para esta condición o bien se introduzca algún sistema de chancado como el utilizado por las máquinas Slurry para disminuir el tamaño máximo del árido grueso a transportar.

- El *Escudo de presión de Lodos o Slurry Shield*, brinda un rendimiento óptimo en suelos granulares gruesos y mezclas bien graduadas no cohesivas, en especial bajo una importante carga hidráulica. Esta máquina podría enfrentar las gravas arenosas del centro de Santiago, aunque con dificultades debido a su alto contenido de finos. Al igual que con el escudo EPB, su campo de aplicación se puede ampliar mediante la adición de material de grano fino (arenas finas), aditivos que mejoren las propiedades reológicas (viscosidad, compactación, etc) del material excavado y un gran contenido de bentonita. Si bien la velocidad de avance de este tipo de escudos es menor, el bajo desgaste de las herramientas de corte y otras partes, hace que el rendimiento promedio mensual sea muy similar al escudo EPB.

Ambos tipos de escudos son capaces de ampliar su campo de aplicación con el uso de algunos aditivos, por lo cual, técnicamente ambos serían una buena alternativa para una excavación óptima del túnel, sin embargo la elección se inclina hacia el escudo EPB con el fin de evitar el tratamiento necesario de los escombros por el uso de bentonitas en el proceso de excavación del escudo Slurry, lo cual implica contar con una planta de tratamiento de lodos, considerando costos, logística y permisos ambientales que eso significa.

Queda como decisión final del contratista evaluar la posibilidad de trabajar con un escudo EPB nuevo o de segunda mano. La experiencia documentada indica que con un buen trabajo de reacondicionamiento, las tuneladoras son capaces de lograr rendimientos iguales o superiores a los logrados cuando eran nuevas.

6 ESCUDO DE BALANCE DE PRESION DE TIERRAS – EPB

Tal como se vio en el punto 5.4 de este trabajo, el tipo de máquina que aparentemente de adecuaría mejor a las condiciones existentes para la construcción de una nueva línea del Metro de Santiago, sería el escudo de balance de presión de tierras o EPB, por lo cual en este capítulo se profundizará el análisis de este tipo de máquinas en cuanto a su estructura, funcionamiento y rendimiento esperado.

6.1 Principios de su diseño y funcionamiento

Este tipo de escudo se desarrolló inicialmente para resolver el trabajo en terrenos arcillosos, procurando lograr un sistema de trabajo continuo, lo que se hizo a través de tres ideas básicas:

- i. Estabilizar el frente con un material a presión, que es el propio escombros excavado, una vez convertido con productos de adición en una mezcla de consistencia visco-plástica.
- ii. Lograr que la mezcla tenga la consistencia adecuada para ser transportable por cinta y vagón, y finalmente,
- iii. Lograr que esa mezcla se pueda extraer sin perder la presión en el frente para garantizar una continuidad del proceso.

Puede decirse que los escudos del tipo EPB se han ideado para excavar suelos arcilloso-limosos y limo-arenosos de consistencia pastosa y blanda, con un contenido de finos superior al 25% - 30%, situados en el área izquierda (celestes) de la Figura 6.1. La zona señalada con flechas indica una extensión del rango de acción de los escudos EPB, posible gracias al acondicionamiento de las propiedades del suelo mediante la adición adecuada de aditivos en la cámara que forman una mezcla idónea. Para lograr esa mezcla hay que incorporar al escombros del frente suspensiones en agua de arcillas y/o espumas y polímeros en cantidades limitadas que se inyectan al frente y a la cámara de forma que el aditivo se reparta lo más uniformemente posible.

En los últimos años, tanto el desarrollo de los escudos como el de los aditivos acondicionadores, ha permitido que el rango de utilización de los escudos EPB abarque gran parte de los suelos en que la competitividad era exclusiva para los escudos del tipo Slurry.

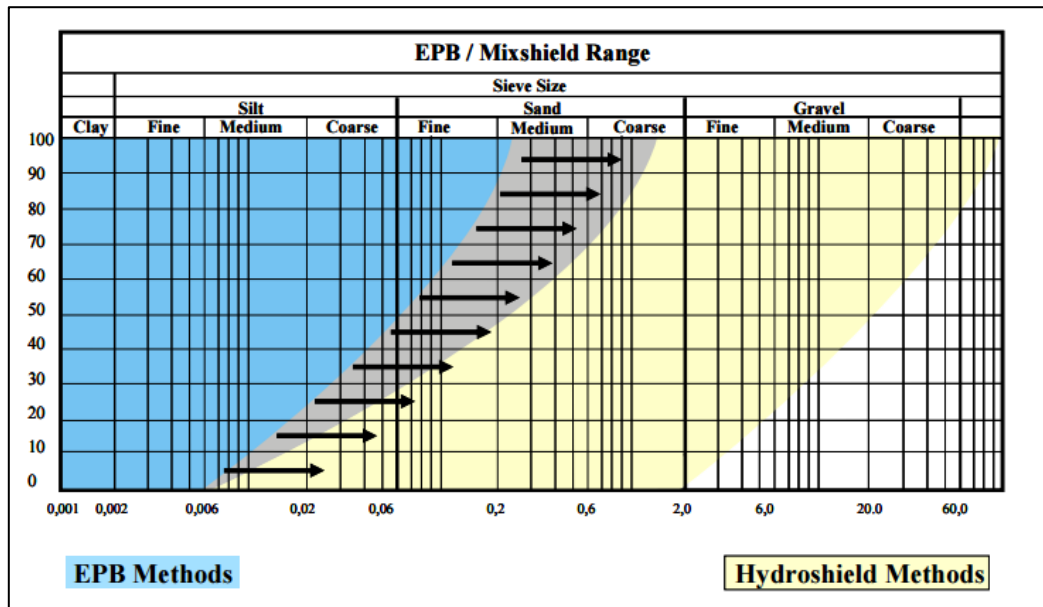


Figura 6.1 Granulometría de los terrenos y aplicación a los escudos EPB (Tobergte & Curtis, 2013).

En general, el diseño de la mezcla es relativamente fácil de lograr en terrenos homogéneos, teniendo que recurrir a fórmulas estudiadas en el laboratorio del fabricante del producto y ensayadas en obra, para tratar los terrenos heterogéneos.

6.2 Partes del EPB

En la Figura 6.2 se recoge el esquema de un escudo de presión de tierra en el que se distinguen 3 partes: la anterior, denominada cabeza o rueda de corte; el escudo intermedio y la posterior o cola de la tuneladora.

Su estructura está diseñada para soportar la presión de las tierras, la del agua, las fuerzas de reacción de los cilindros hidráulicos del escudo y la fuerza de reacción de la excavación.

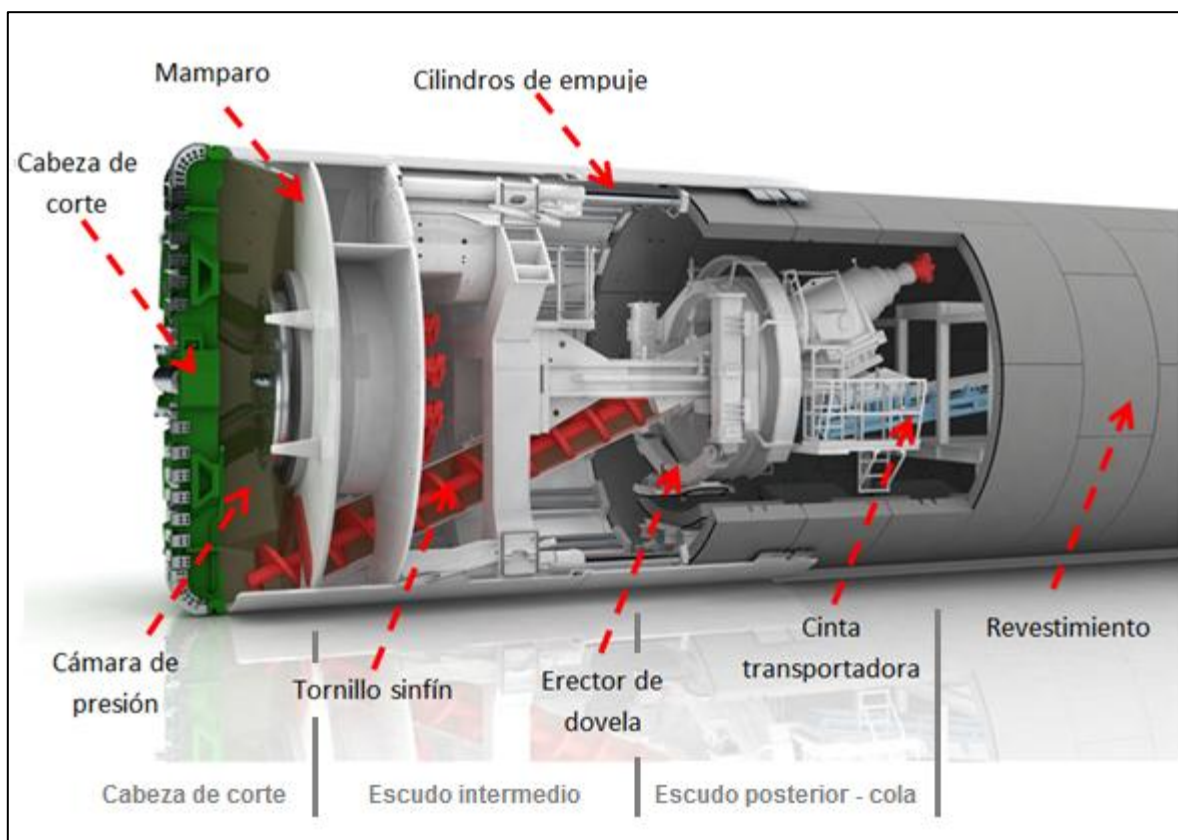


Figura 6.2 Partes principales de un escudo EPB

La cabeza lleva, en su cara frontal, las herramientas de corte y las toberas de los productos de adición, y, en su interior o cámara de presión, los dispositivos de homogeneización y preparación del terreno excavado para su extracción en forma de masa plástica. En la cámara se disponen también de dispositivos para el control de las presiones en la masa excavada para asegurar la estabilidad del frente.

El escudo intermedio, cuya parte anterior es una estructura metálica denominada mamparo, que soporta toda la presión de la cámara, lleva los componentes de accionamiento de la máquina, así como el mecanismo para transmitir el movimiento a la rueda, que comprende la corona dentada y sus rodamientos de apoyo, a ese conjunto se le suele denominar cojinete principal de la máquina y es un producto del “know-how” de cada fabricante. En la parte inferior del mamparo se monta un único tornillo sinfín encargado de extraer el material excavado. Los cilindros del escudo utilizados para su avance están distribuidos uniformemente en sentido circunferencial alrededor de la periferia exterior de la zona trasera del escudo intermedio.

Por último, la parte posterior o cola del escudo es el espacio en el que se desarrolla el montaje de los anillos de revestimiento mediante un erector de dovelas, y es donde el tornillo sin fin descarga el material excavado en una cinta transportadora que lo dirige fuera del túnel. En general, para facilitar la gestión de los trazados en curva, la junta entre escudo y cola está articulada.

6.3 Funcionamiento

El funcionamiento de un escudo EPB o de equilibrio de la presión de tierras, tiene por objetivo excavar una sección circular a cierta profundidad, contrarrestando la presión del terreno en el frente, evitando así deformaciones que se traducirían en asentamientos significativos en la superficie.

Para lograrlo, el escudo excava por rotación de la cabeza de corte y avanza por el accionar los gatos de empuje, los cuales reaccionan con el último anillo de revestimiento colocado e impulsan el escudo contra el terreno. La velocidad de avance es regulada con el flujo hidráulico que controla la presión de los gatos de empuje del escudo.

Al cortarse el terreno, éste se introduce en la cámara frontal del escudo EPB y una inyección de espuma - mezcla de agua, producto tensoactivo, polímeros estabilizadores y aire - a una determinada presión, y la agitación producida por la cabeza de corte, convierten el terreno excavado en un lodo que se presuriza debido a la presión ejercida por los cilindros hidráulicos de empuje.

La presión dentro de la cámara es controlada por medio de la velocidad de rotación del tornillo sinfín y de la apertura de la compuerta situada en la descarga del tornillo. El volumen de terreno excavado que entra en la cámara, sustituye al equivalente que ha de extraerse de la misma sin pérdida de presión. La retirada del material excavado se hace mediante una cinta transportadora, continua hasta el exterior del pique de ataque.

Una vez alcanzado el recorrido total de los gatos o un desplazamiento mínimo para la colocación de un nuevo anillo de dovelas, se procede a su detención, lo cual significa que la excavación ha concluido, procediéndose a la colocación del revestimiento en la cola del escudo.

Al término de cada empuje se verifica en el sistema de guiado automático la posición real del escudo y se compara con la del proyecto, lo cual da la pauta a seguir para la programación de la colocación del anillo de dovelas antes del siguiente empuje y corregir así la posición del escudo.

Para la colocación de los anillos subsecuentes se realizan las siguientes actividades.

- a) Se retraen los gatos del escudo ubicados en la posición donde se coloca la primera dovela.
- b) La dovela es tomada por el brazo erector, previamente se verifica que cuente con los tornillos necesarios para la colocación de la misma, procediendo con la colocación de la dovela en su sitio correspondiente y fijando la tornillería a los insertos “tuercas”.
- c) Se apoyan dos, tres o cuatro gatos a la dovela dependiendo de la posición de la misma para poder retirar el brazo erector, trasladándolo para posicionarse en la siguiente dovela por colocar.
- d) Se retiran los gatos necesarios para alojar la segunda dovela.
- e) Se hacen coincidir el orificio del tornillo con el del inserto “tuerca”, colocando los tornillos correspondientes.
- f) Nuevamente se apoyan dos, tres o cuatro gatos de acuerdo con la posición de la dovela, se retira el brazo erector para desplazarse a la siguiente dovela situada sobre la mesa de traslación.

- g) Se repetirá la misma secuencia descrita hasta colocar todas las dovelas y la cuña dentro de la cola del escudo.
- h) Estas actividades serán repetidas para la colocación de los anillos durante todo el proceso de excavación del túnel, procurando que las dovelas no se traslapen en las juntas para que no se formen líneas de fallas longitudinales por la posición repetitiva de los anillos. Cabe mencionar que todas las posiciones de los anillos que se utilizan son para formar las curvas existentes y/o para corregir la línea o nivel en caso de existir desviaciones del trazo teórico.

Cabe mencionar que los anillos de dovelas pueden ser del tipo universal, izquierdos o derechos, de manera que por medio de las múltiples posiciones posibles se pueden seguir las curvas o tangentes del trazado y perfil del proyecto. El anillo universal, aunque de diseño más complejo, se utiliza cada vez más por razones económicas, ya que permiten emplear un solo tipo de anillo, sea cual sea la curvatura que se haya de realizar en el túnel.

Una vez colocado el anillo, se está en condición de realizar otro empuje o avance, el cual comienza con el giro de la cabeza de corte y el empuje de los cilindros.

Simultáneo al empuje, se realiza la inyección de una mezcla o mortero en el espacio anular comprendido entre el terreno y los anillos de dovelas, con el fin de evitar deformaciones superficiales del terreno. Este proceso se ejecuta de manera simultánea a la excavación a lo largo de todo el túnel, en los anillos que vayan saliendo de la cola del escudo. Para tal fin se emplea un sistema de inyección basado en el concepto Bi-componente, con una mezcla donde el componente A es una suspensión coloidal de una mezcla de conglomerantes hidráulicos y el B es un acelerante, generalmente silicato sódico, ambos reaccionan y endurecen en un tiempo que permite llenar todo el gap entre el anillo y el terreno excavado.

También en forma paralela a la excavación y colocación de anillos, se coloca un radier para el avance del back up y el sistema vagones que alimentan de dovelas, equipo y demás materiales al escudo, durante la excavación. Este sistema puede moverse sobre rieles o sobre ruedas neumáticas.

6.4 Rendimientos

El rendimiento de un escudo EPB depende de muchas variables, como el tipo de suelo excavado y la presencia de napas subterráneas, el diámetro de la excavación, potencia de la máquina, sistema de eliminación de escombros y por supuesto la experticia de los operadores.

Tal como se describió en el punto 6.3, el ciclo de trabajo de un escudo EPB se puede dividir en dos actividades principales, la excavación y empuje del escudo, y la colocación del anillo de dovelas que sirve como sostenimiento del túnel. Los tiempos de ejecución de cada actividad se muestran en la Tabla 6.1.

El ciclo total de un escudo EPB, *sin considerar interferencias* como mantenciones, cambio de herramientas, averías u otras, tiene una duración de 49 minutos para un túnel de sección

promedio para uso de Metro, lo cual entrega un *rendimiento máximo teórico* de 29 anillos colocados en 24 horas, equivalente a un avance máximo real de 42 ml.

Operación	EPB - Slurry Minutos
Excavación	25
Colocación de anillo	22
Ajuste de gatos	2
Ciclo total	49
Avances teóricos en 24 h	29 anillos
Longitud dovela, m	1,5
Avance teórico, m/mes (Teórico máximo sin paradas, averías ni mantenimientos)	1305
Avances reales máximos en 24 h	28 anillos
Avances reales máximos en 24 h	42 m

Tabla 6.1 Actividades principales en el ciclo de un escudo EPB y avances máximos (Melis, 2000)

Con el fin de establecer un rendimiento realista para un escudo EPB en los suelos de Santiago, se ha buscado información del desempeño de en otros proyectos similares. Así es como la Tabla 6.2 resume el trabajo de los 6 escudos EPB que construyeron los 65,2 km de túneles de las dos grandes ampliaciones del Metro de Madrid de los años 1995-99 y 1999-2003. Como se observa, se ha logrado alcanzar rendimientos máximos sobre los 1000 metros en un mes, con una media de 490 m/mes, lo que se traduce en un rendimiento medio diario de 15 m.

Diámetro		9,4 m	9,4 m	9,4 m	9,4 m	9,4 m	7 m	7,4 m
Fabricante		Hkn	Hkn	Hkn	Mitsub	Mitsub	Hkn	Lovat
Propietario		Necso	ACS	Ferrovial	Dragados	FCC	Necso	Dragados
Nombre		Paloma	Almudena	Mares Sur	Chata	Adelantada	Puerta Sol	Cibeles
Obra								
Suma m 1995-99	26.051	3.426	3.524	-	5.048	8.418	1.939	3.696
Suma m 1999-03	39.197	6.197	7.439	6.467	6.282	6.723	-	6.089
Suma m Totales	65.248	9.623	10.963	6.467	11.330	15.141	1.939	9.785
Metros/mes, media	496	468	479	402	553	607	-	468
Metros/mes, máximo	-	-	-	-	-	1.020	-	1.230
Metros/día, media	16	15	15	13	18	20	-	15

Tabla 6.2 Rendimientos alcanzados en las ampliaciones del Metro de Madrid 1995-99 y 1999-2003 (Melis, 2005)

La gran diferencia entre el rendimiento mensual promedio y el máximo alcanzado, de más del doble, indica que existen grandes defectos en los ciclos de trabajo con pérdidas de tiempo en actividades tales como el cambio de cortadores, picas y otros elementos de la cabeza de corte, descarrilamientos y averías varias. En la ampliación del Metro de Madrid, un resumen típico de estos tiempos perdidos es el que se muestra en la Tabla 6.3.

Conceptos	Total (h)	%
Tiempo de excavación	1.300	17%
Colocación de dovelas, relleno trasdós	1.438	19%
Mantenimiento, lubricación e inspección cabeza de corte	1.374	18%
Limpiezas, problemas hidrogeológicos	155	2%
Fallos de: agua, aire y energía eléctrica	30	0%
Problemas con vagones y descarrilamientos	863	12%
Supervisión de trabajos, topografía	49	1%
Paradas debidas al escudo y backup	827	11%
Averías especiales	143	2%
Otros	1.261	17%
Total	7.440	100%

Tabla 6.3 Desglose de tiempos en la construcción de la Línea 7 del Metro de Madrid (Melis, 2005)

Se observa que el tiempo realmente útil de la máquina es solamente el dedicado a la excavación (17%) y a la colocación del anillo (19%), es decir, un 36% del tiempo total. El resto, el 64%, es tiempo perdido principalmente en actividades de mantenimiento, reparación, limpieza y supervisión, como puede apreciarse en el Gráfico 6.1.

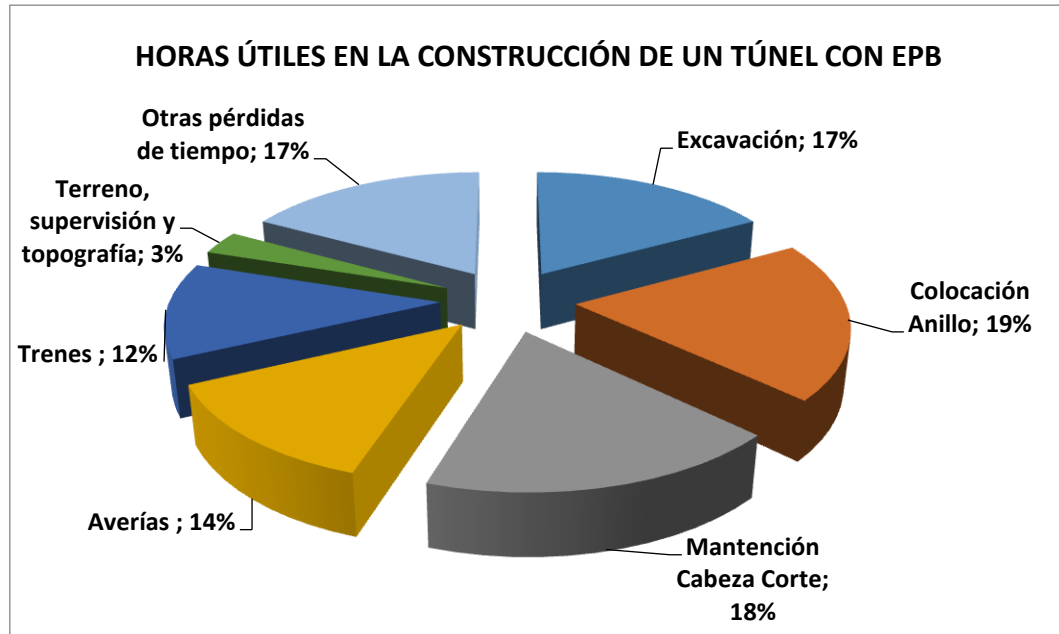


Gráfico 6.1 Horas útiles en la construcción de un túnel con EPB en las ampliaciones del Metro de Madrid (Melis, 2005)

Dentro de las pérdidas de tiempo más importantes en este proyecto, el cuidado de la cabeza de corte y el cambio de picas y cortadores, llevaba la delantera, incluso consumiendo más tiempo que la propia excavación. La realidad es que el cambio de las herramientas de la cabeza de corte, era una actividad mal estudiada, mal diseñada, con maniobras lentas y muy peligrosas que consumían un tiempo exagerado. Por lo cual las nuevas máquinas del tipo EPB se han rediseñado, mejorando los sistemas mecánicos de levante y montaje de las piezas, además de plataformas donde los operarios puedan trabajar con mayor seguridad.

Otra pérdida de tiempo importante detectada en las ampliaciones del Metro de Madrid, fueron las averías en la máquina e instalaciones auxiliares, la mayor parte de ellas debidas a componentes mal dimensionados, ahorro de potencia y motores pequeños. Actualmente los escudos son diseñados con mayor potencia que los de hace 10 o 15 años atrás, superando la mayoría de estos inconvenientes.

Finalmente, otro de los puntos importantes mejorados con el tiempo se relaciona a los problemas con la vía, los trenes y sus descarrilamientos. Estas averías tuvieron lugar siempre con los trenes cargados con los residuos de la excavación y muy pocas veces durante la entrada de los trenes vacíos. Por lo cual la tendencia ha sido eliminar los trenes de extracción de residuos,

reemplazándolos por cintas transportadoras, así los trenes sólo se utilizan para la entrada de dovelas y mortero de inyección.

Con el pasar de los años y la retroalimentación obtenida del gran número de proyectos excavados con escudos EPB, el desarrollo de este tipo de máquinas ha experimentado una gran evolución logrando reducir considerablemente los tiempos perdidos, siempre de la mano de un equipo de profesionales bien entrenados. La Tabla 6.4 muestra la evolución de los tiempos de espera en cinco obras sucesivas, hechas con el mismo escudo EPB mejorado. El porcentaje tiempo de tiempo útil, correspondiente a la excavación y colocación del anillo de dovelas, pasó de la primera obra a la última del 36% al 50%.

% de tiempo en cada actividad	Línea 7	Línea 8	Alcobendas	Línea 10	Metrosur
Excavación	17%	28%	31%	29%	29%
Colocación Anillo	19%	19%	21%	20%	21%
Subtotal útil	36%	47%	52%	49%	50%
Mantenimiento cabeza	18%	7%	11%	5%	6%
Limpiezas	2%	6%	7%	2%	0%
Trenes y descarrilamientos	12%	9%	5%	9%	9%
Supervisión y topografía	2%	0%	0%	0%	0%
Paradas escudo y backup	11%	8%	10%	11%	4%
Paso de estaciones	2%	8%	0%	0%	23%
Otros	17%	15%	15%	24%	8%

Tabla 6.4 Evolución de los tiempos perdidos en cinco obras consecutivas hechas con el mismo escudo EPB (Melis, 2005)

Entonces, para determinar un rendimiento medio mínimo de escudo EPB moderno, se podría pensar en el rendimiento máximo teórico de la Tabla 6.1 con la eficiencia del 36% obtenida en la Línea 7 de la ampliación del Metro de Madrid (Tabla 6.4), mientras que para el rendimiento medio máximo no sería extraño pensar en un rendimiento del 55%, considerando las mejoras logradas en las distintas actividades y los nuevos materiales que reducen el desgaste de las herramientas y del mismo escudo. Así, se tiene que el rendimiento medio de un escudo EPB trabajando en condiciones normales y con un buen equipo profesional, puede estar en el siguiente rango de valores.

Rendimiento medio		Valor [m/día]
Mínimo	$R_{mín}^{EPB}$	15
Máximo	$R_{máx}^{EPB}$	23

Tabla 6.5 Rango de rendimientos esperados para un escudo EPB

7 ¿CÓMO SE CONSTRUYE UNA LÍNEA DE METRO?

Una línea de Metro subterráneo está compuesta por un conjunto de estructuras bajo tierra que se conectan entre sí, formando un ducto continuo por donde se transporta a miles de pasajeros diariamente. Para construirla existen varias posibilidades, en primera instancia se determina la ubicación del trazado ya sea en superficie, elevado por viaductos o subterráneo por medio de túneles. En el caso de optar por un trazado subterráneo, y tal como se ha visto en el capítulo 2, existen diferentes métodos para la construcción de los túneles y estaciones. A continuación se describirá el proceso constructivo para materializar una línea de Metro, considerando la construcción de túneles mediante método NATM y el uso de un escudo EPB.

7.1 Descripción general.

La construcción de una nueva línea de Metro subterránea queda definida por un conjunto de parámetros y decisiones, entre los que se destacan su longitud, el número de estaciones, el trazado y su geometría, la sección de los túneles y el método constructivo a utilizar. No es lo mismo construir una línea de 10 km de largo con 11 estaciones en las comunas periféricas de la ciudad, que construir una línea de 20 km que cruce el centro de la ciudad, con 19 estaciones. La diferencia logística es tremenda, por lo cual decisiones como la geometría de los túneles y el método constructivo a utilizar, son cruciales.

Como se aprecia en la Figura 7.1, la construcción de una línea de Metro se puede abordar desde varios frentes, por un lado se encuentra la excavación de cada una de las estaciones y por otro lado se tiene la excavación del túnel interestación. El túnel puede ser construido en varios tramos de acuerdo a sus características geotécnicas, planificación de la obra o método constructivo utilizado, de ahí que para una línea de Metro extensa, algunos tramos pueden ser construidos siguiendo el método NATM y otros mediante el uso de una o más máquinas tuneladoras de igual o distinta tipología.

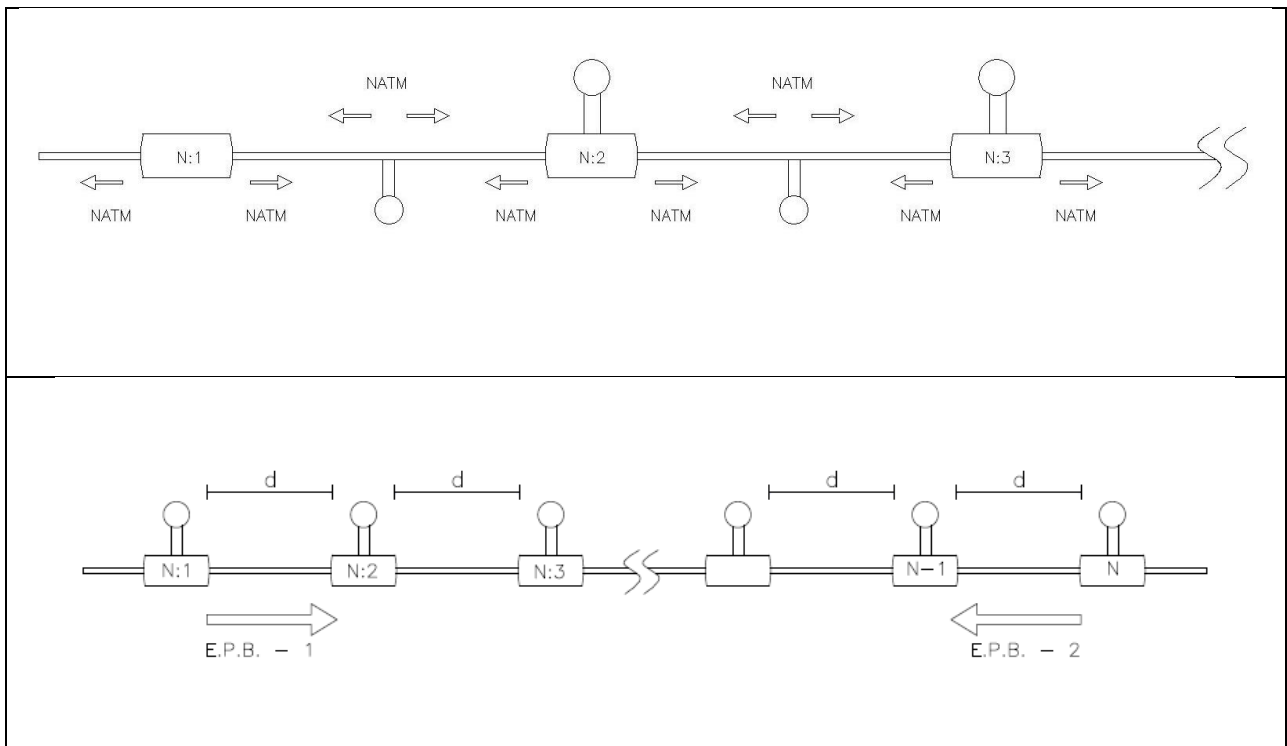


Figura 7.1 Esquema construcción típica de una Línea de Metro.

Cualquiera sea el método de construcción elegido, NATM o escudo EPB, existe una serie de aspectos a considerar, como las instalación de faena y su ubicación estratégica, el número de ataques o frentes de trabajo simultáneos, la construcción de estructuras previas de soporte y acceso a la construcción de túneles, la maquinaria a utilizar y su disponibilidad, etc. Todos estos aspectos y otras consideraciones importantes para cada método constructivo se detallaran a continuación.

7.2 Construcción de una línea de Metro con el método NATM

7.2.1 Obras previas

Piques, galerías y estaciones, forman parte de las obras previas que deben iniciarse antes de la excavación de los túneles de vía. A través de estas estructuras se hace posible el acceso al lugar donde se ubica el trazado y donde comienza la excavación de los túneles. Por lo general, las estaciones se construyen paralelamente con los túneles, sin interferir unos con otros. En consecuencia, los piques y galerías dan lugar a los frentes de trabajo de los túneles, siendo allí donde se concentra el ingreso de maquinarias, personal y materiales de construcción, y la salida de todo el material excavado.

El proceso constructivo de estas obras previas, se detalla a continuación:

7.2.1.1 Estaciones

Con el fin de no interrumpir el tránsito en las calles que coinciden con el trazado de la Línea, la construcción de las estaciones se aborda de manera subterránea, haciendo necesaria la construcción de un pique al costado del trazado, seguido de una galería que permita el acceso a la excavación de un túnel de gran sección que albergará los andenes de la estación. Dada la naturaleza de estas obras, no es posible ejecutarlas de manera simultánea, por lo cual se sigue la siguiente secuencia.

- i. Pique circular
- ii. Galería de acceso
- iii. Túnel estación

La Figura 7.2 muestra cada uno de los elementos que integran una estación subterránea típica y el orden de su construcción, además se puede apreciar la continuidad y diferencia de sección entre el túnel estación y el interestación.

Las características de cada elemento de la estación son las siguientes:

El pique tiene un diámetro de 25 m y una profundidad que dependerá de la cota necesaria para la excavación de la galería de acceso, típicamente entre 20 y 35 m., durante la construcción servirá para el ingreso y salida de personal, maquinarias, materiales y escombros de la excavación, y en la etapa de servicio será parte del acceso principal a la estación.

La galería de acceso tiene una longitud necesaria para comunicar el pique con el túnel estación, que típicamente va entre los 25 y 40 m., en la etapa de servicio albergará el sector de boleterías y el acceso a los andenes.

El túnel estación tiene una longitud de 120 m y una sección variable entre 160 m² y 200 m² dependiendo del tamaño de la estación, mucho mayor a la sección de los túneles interestación, en su interior se ubican los andenes de pasajeros que permiten el ingreso al tren.

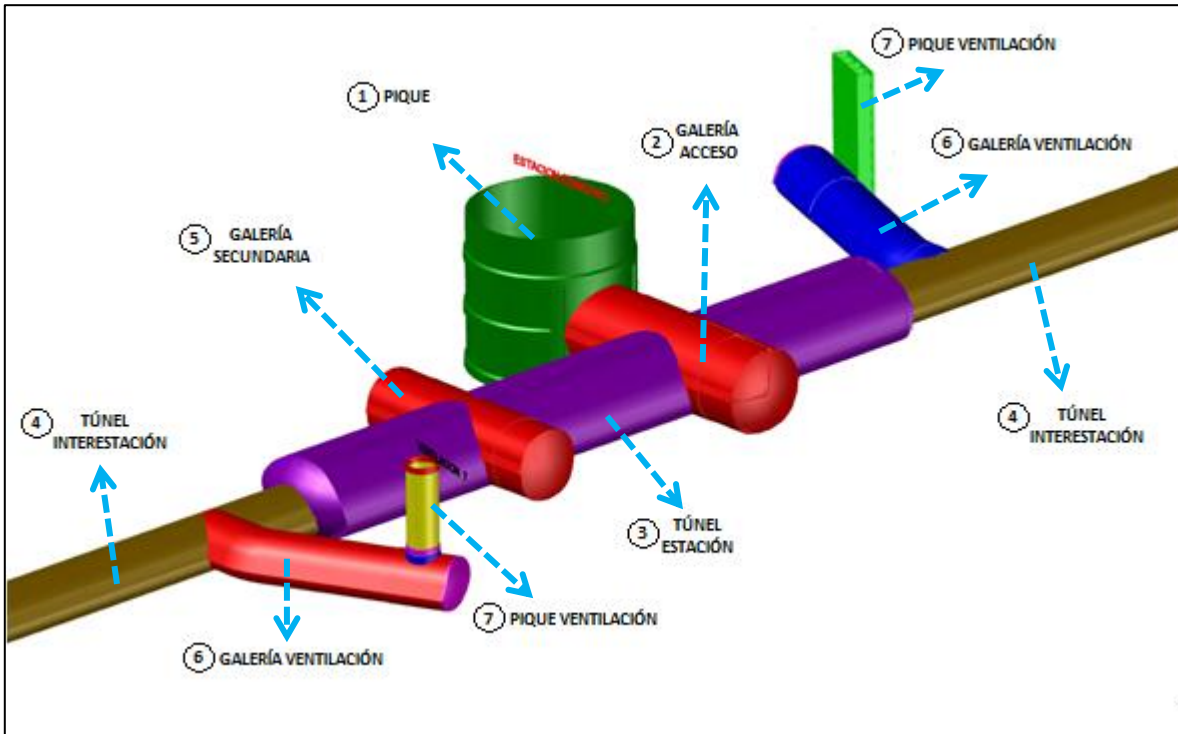


Figura 7.2 Esquema de estación tipo Metro de Santiago Línea 3

La ejecución de un pique circular se inicia con la construcción del brocal, la excavación se realiza con medios mecánicos empleando una excavadora convencional, en pases de entre 1 y 2 m, la profundidad queda determinada por la cota de las vías, típicamente entre 20 y 25 m.

La excavación de cada pase se divide en cuadrantes que se excavan y sostienen sucesivamente. El orden de excavación es por cuadrantes opuestos tal y como se muestra en la Figura 7.3.

Una vez terminada la excavación de cada una de las subfases descritas, se proyecta una capa de sello y posteriormente dos capas de shotcrete reforzado con malla electrosoldada. La siguiente fase no se podrá iniciar hasta que se finalizan los ciclos de la fase previa.

Siguiendo la secuencia constructiva expuesta se alcanza el nivel inferior del pique y por último, se ejecuta el anillo de fundación.

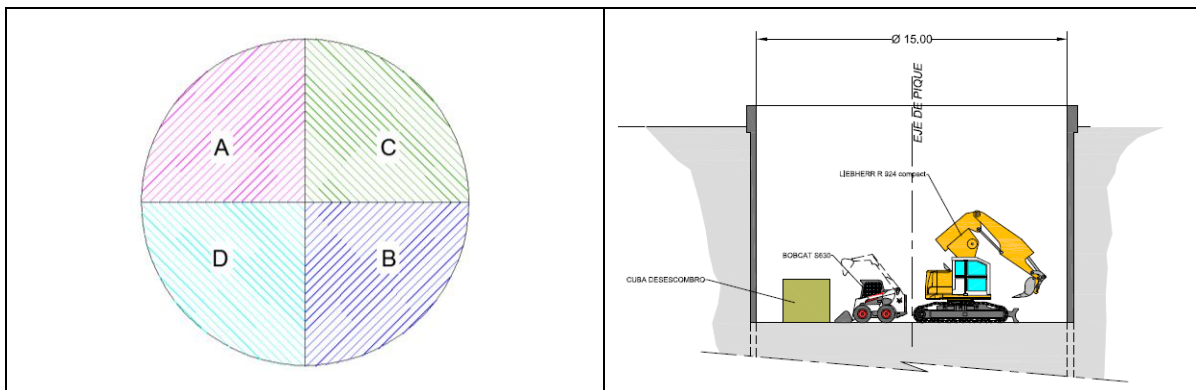


Figura 7.3 Fases de excavación del pique en cuadrantes y maquinaria empleada.

Tanto el túnel como la galería de acceso de la estación poseen tamaño y geometría similar, ambos presentan una sección transversal con contrabóveda, con un ancho de excavación aproximado de 16 m y una altura máxima de 12 m. La longitud de la galería depende de la distancia entre el pique y el túnel estación, por lo general se excavan galerías entre 30 y 45 m, mientras que el túnel tiene una longitud de 120 m. Adicionalmente, cabe mencionar que la sección del túnel estación está diseñada para albergar las vías y andenes de 3,5 a 5 m de ancho. El ancho del andén depende del flujo de pasajeros que la estación deberá atender y por lo tanto define el tamaño de cada estación.

La Figura 7.4 muestra la sección de excavación típica de un túnel estación.

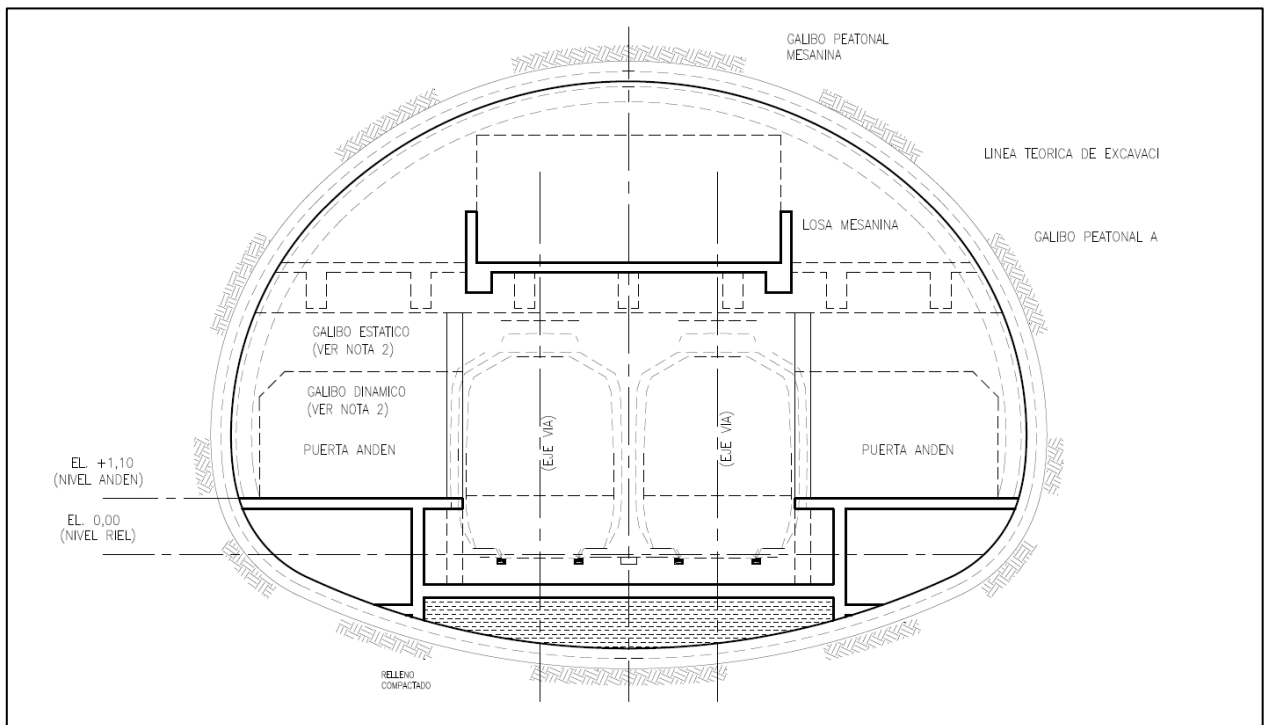


Figura 7.4 Sección típica túnel Estación Hospitales, Línea 3.

Se considera que las excavaciones de las galerías principales y túneles estación se ejecutan siguiendo el mismo proceso constructivo. Sus importantes dimensiones a excavar, hacen necesaria su ejecución en diferentes fases de sección más pequeña que eviten inestabilidades del terreno, es por ello que la sección completa se divide en dos secciones más pequeñas llamadas *side drift*, separadas por un muro temporal de hormigón proyectado y marcos de acero. A su vez, cada *side drift* se divide horizontalmente en tres secciones bóveda, banco y contrabóveda. La excavación de cada *side drift* sigue la siguiente secuencia constructiva:

- Excavación y sostenimiento de la BOVEDA en avances de 1 m hasta tener un distanciamiento de 4 m con el banco..

- Excavación y sostenimiento del BANCO en avances de 2 m, quedando a 2 m de la bóveda.
- Excavación y sostenimiento de la CONTRABÓVEDA en avances de 2 m, quedando a 2 m del banco.
- La excavación del side drift 2 sigue la misma secuencia y puede iniciarse sólo cuando la contrabóveda terminada del side drift 1 tenga un avance mínimo de 20 m.
- Al finalizar ambos side drift, se comienza con la demolición del muro temporal.

La Figura 7.5 muestra un esquema de la secuencia constructiva, las diferentes secciones de avance y el distanciamiento entre los side drift 1 y 2.

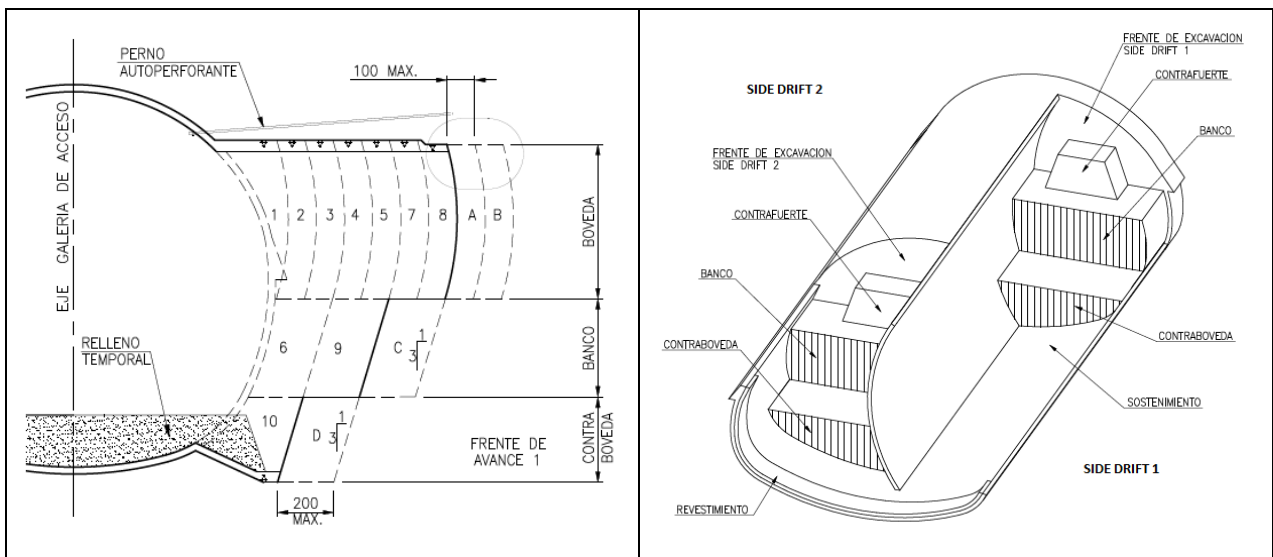


Figura 7.5 Secuencia de excavación en túnel estación y galería de acceso.

La altura de la bóveda será de alrededor de 5.5 m lo que permite la circulación de la maquinaria habitual, mientras que banco y contrabóveda tendrán alturas aproximadas de 3,5 m. Estas medidas son orientativas, ya que las dimensiones de la sección varían ligeramente de una estación a otra.

La excavación en varias fases más pequeñas desfasadas entre sí, hacen de esta tarea un proceso lento, con un rendimiento mucho menor que el de la excavación del túnel interestación.

7.2.1.2 Piques de construcción

A diferencia de las estaciones que forman parte integral del trazado de la Línea, los piques de construcción constituyen obras auxiliares emplazadas en medio del tramo entre dos estaciones consecutivas, desde cada pique se avanza hacia ambos lados con frentes de trabajo independientes que tienen como fin calar en el túnel estación colindante, de esta forma se optimiza los tiempos de ejecución de las obras, permitiendo iniciar la excavación del túnel interestación sin tener que esperar el avance en la construcción de las estaciones.

Un pique de construcción está formado por un pique vertical de diámetro 15 m, ubicado a un costado del trazado, haciendo necesario la construcción de una galería horizontal que conecte el pique con el túnel interestación y permita la entrada y salida de personal, maquinarias, materiales y escombros de la excavación del túnel. La Figura 7.6 muestra los elementos que integran un pique de construcción y su conexión con el túnel.

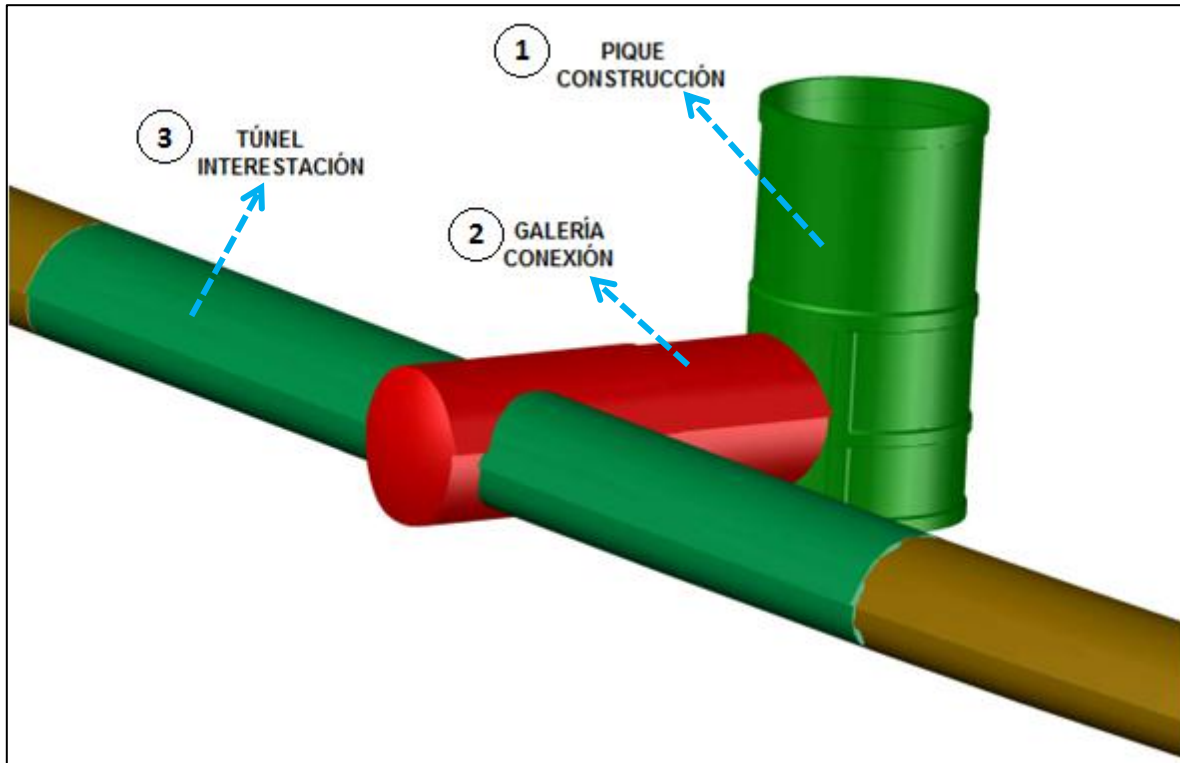


Figura 7.6 Esquema pique de construcción típico.

La ejecución del pique vertical, sigue la misma lógica del pique construido para la estación, con avances de 1 a 2 metros, excavados en cuartos opuestos, tal como se detalló en el punto 7.2.1.1.

Las galerías que conectan los piques con el túnel interestación poseen una geometría ovalada similar a la geometría de la galería de acceso de la estación, pero con una sección mucho menor, del orden de 70 m^2 , su anchura de excavación es de aproximadamente 9,5 m y la altura alcanza los 9 m, tal y como se puede ver en la Figura 7.7, estas dimensiones hacen razonable la excavación de una gran bóveda en avances de 1 m y luego, retrasada 4 m, una sección más pequeña para cerrar en contrabóveda en avances de 2 m.

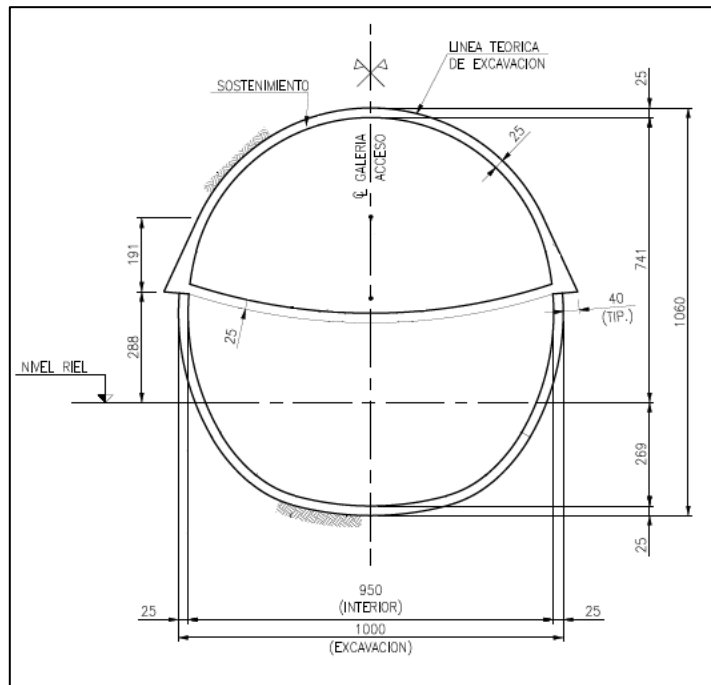


Figura 7.7 Geometría de las galerías de conexión de piques, Línea 3.

7.2.2 Túnel interestación

Como se ha mencionado, una de las cualidades del método NATM es la posibilidad de trabajar en varios frentes simultáneos, ya que no necesita de maquinaria específica ni grandes recursos para implementarse. Esta condición debe ser aprovechada para reducir los tiempos de excavación del túnel interestación, considerando los bajos rendimientos de un frente en NATM versus una máquina tuneladora. Con este objetivo se construyen piques intermedios entre las estaciones, así el número de frentes excavando el túnel simultáneamente se multiplica, logrando un gran rendimiento conjunto de todos los frentes. Rendimiento que en definitiva dependerá del número de piques que sea posible construir.

La Figura 7.8, representa un tramo de túnel entre dos estaciones con un pique de construcción intermedio, en el que flechas rojas representan el avance de los dos frentes de trabajo, la excavación finaliza al calar el túnel interestación con el túnel estación correspondiente. Al repetir este proceso en cada tramo, se logra la excavación completa de la Línea de Metro proyectada.

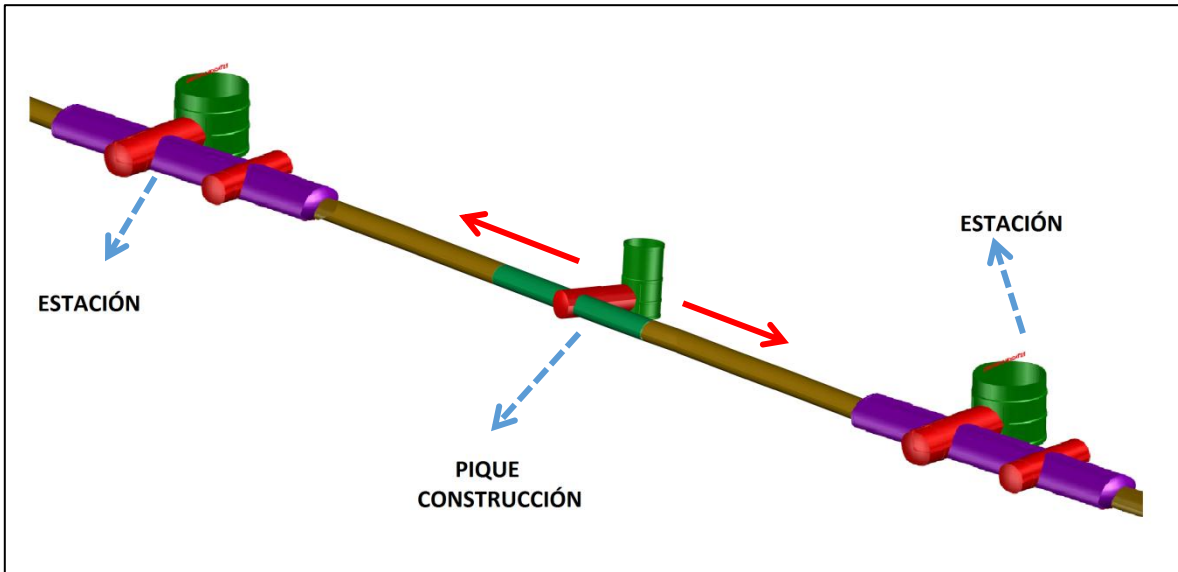


Figura 7.8 Pique de construcción y tramo de túnel interestación.

El túnel interestación tiene una sección tal que supone excavar aproximadamente 65 m^2 , con una anchura máxima de $10,0 \text{ m}$ y una altura de $7,8 \text{ m}$. Esta sección se muestra en la Figura 7.9.

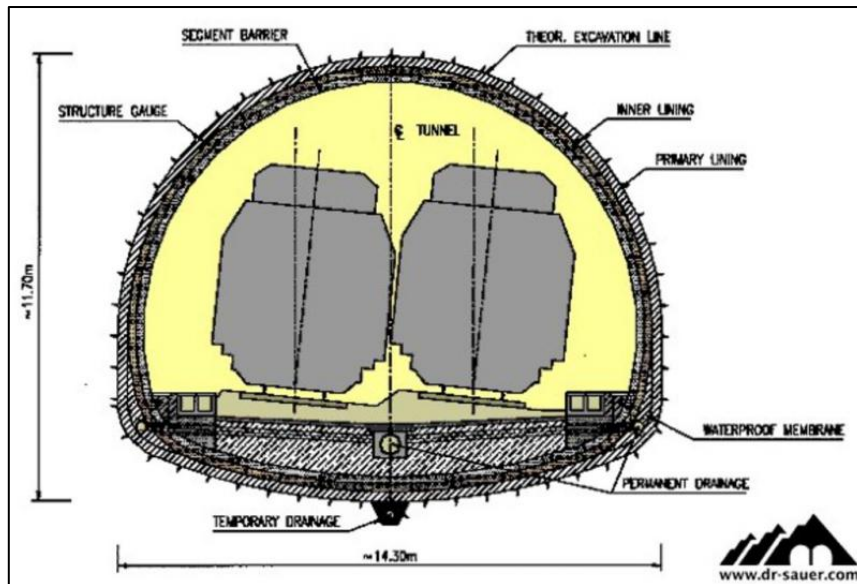


Figura 7.9 Geometría del túnel interestación.

La excavación, tanto de los piques como de las galería y túneles se realizará con medio mecánicos tal y como se muestra en la Figura 7.10.

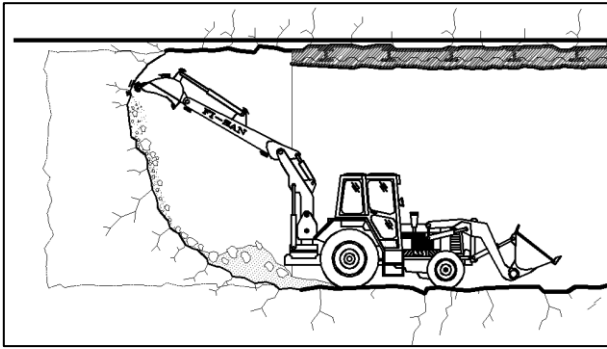


Figura 7.10 Excavación de túnel por medios mecánicos.

Se contemplan pases de excavación de 1 m de longitud para las fases de la bóveda y de 4 m en la ejecución de la contrabóveda. Estas corresponde a las longitudes máximas debiendo reducirse si la características del terreno lo hacen necesario. Del mismo modo, en estos casos también se podrán dividir las fases de excavación en varias subfases.

Para la evacuación de escombros se hace necesario un sistema compatible con los rendimientos estudiados y que debe tener en cuenta que el desescombro solo se realizará en horario diurno. El sistema óptimo para este tipo de trabajos es el de cintas verticales que vierten el material a una tolva en superficie que carga directamente los camiones. También existen sistemas de capachos elevados por polipastos o grúas torre, más económicos pero poco recomendables por sus bajos rendimientos y sistemas con carros verticales que han mostrados un buen desempeño. El esquema de la Figura 7.11, muestra el sistema de evacuación de escombros de cintas verticales.

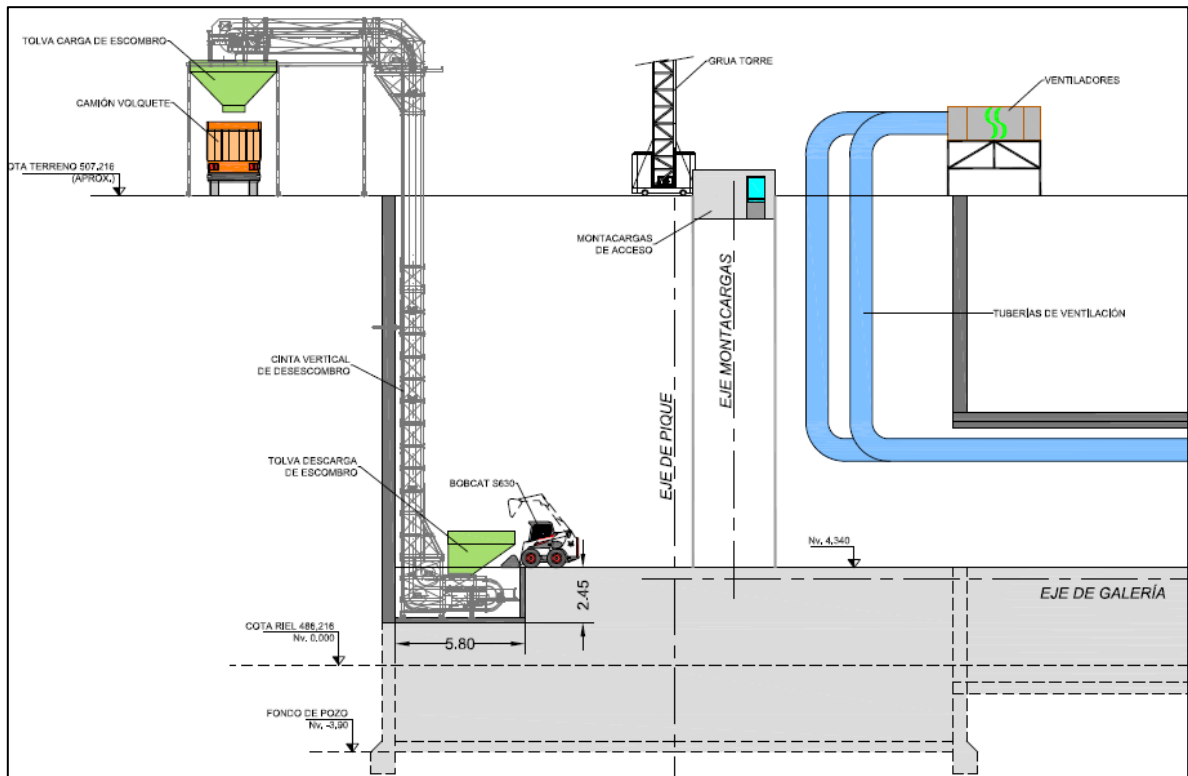


Figura 7.11 Sistema de evacuación de escombros mediante cintas verticales

Cada pique debe contar con la maquinaria, personal y recursos necesarios para desempeñar cada una de las actividades de excavación, sostenimiento y evacuación del material excavado de cada frente. Para fines prácticos, cada pique funcionará como una obra independiente.

7.3 Construcción de una línea de Metro mediante el uso de un escudo EPB.

Para construir una línea de Metro mediante el uso de un escudo del tipo EPB, se debe tener presente algunas consideraciones especiales antes de aventurarse en un proyecto de este tipo.

Uno de los puntos más importantes a considerar es la disponibilidad del escudo EPB, ya que tener una de estas máquinas al pie de la obra, no siempre es factible y requiere de un estudio complejo de una serie de variables como las que se indican en el punto 5.1, y de un diseño, construcción y transporte que tarda por lo menos 12 meses, un plazo no menor que deberá ser considerado en el programa maestro de la obra

Cada una de estas máquinas es fabricada especialmente para una obra determinada, aunque hoy en día, existe la posibilidad de utilizar maquinaria reacondicionada, que entregue un desempeño similar al de una máquina nueva y que cumpla con los requerimientos que el nuevo proyecto impone. Por lo general, las grandes constructoras de túneles a nivel mundial, cuentan con varios escudos en su parque de maquinarias.

7.3.1 Obras previas

A diferencia del método NATM, donde se puede contar con múltiples frentes de excavación simultáneos, el uso de máquinas tuneladoras condiciona el número de frentes, a la cantidad de máquinas que se disponga y que comúnmente no supera las 2 unidades por línea.

Como ya se ha mencionado anteriormente, un escudo EPB nuevo tarda por lo menos 12 meses en estar disponible en la obra, ensamblado y puesto en marcha. Durante ese tiempo se avanza en la construcción de estaciones, piques y portales de entrada para la tuneladora, además de la fabricación de dovelas e instalaciones que darán soporte a la máquina.

Es muy importante que la excavación de las estaciones esté terminada y se haya construido un radier antes de que la tuneladora las alcance, ya que de lo contrario se tendrá que detener la excavación de la máquina, perdiendo tiempo valioso para la excavación del siguiente tramo del túnel. Aunque existen casos en que se ha construido primero el túnel de vías con dovelas y luego se excava la estación, siendo necesario demoler las dovelas en un tramo, situación no deseable, pero técnicamente posible.

La Figura 7.12 muestra el momento exacto cuando un escudo EPB rompe el muro de una estación en la construcción del Metro de Sydney. El cruce de una estación da tiempo para inspeccionar y realizar mantenciones a la maquinaria y prepararla para el nuevo tramo a excavar.

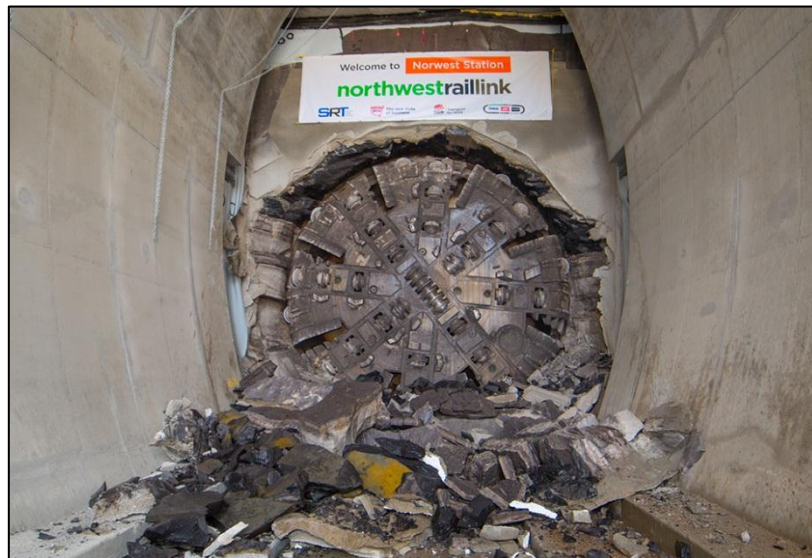


Figura 7.12 Escudo EPB rompe muro de estación en el Metro de Sydney

Con el fin de no retrasar el paso de la tuneladora, es común inclinarse por la construcción de estaciones rectangulares, mediante el método Cut and Cover. Este tipo de estación se aplica en contextos donde hay disponibilidad de espacio superficial para poder realizar las obras. Toda la estación se construye desde el nivel calle. El largo de la estación es equivalente al del túnel de las estaciones tipo caverna, 120 m, y la profundidad es consecuencia de la cota riel del trazado. En el interior de la estructura se realizan todas las obras e instalaciones para convertirla en accesible.

En general, con la finalidad de limitar el impacto ambiental superficial y restituir lo antes posible la vialidad de las áreas, se prefiere la metodología de ejecución en Cut and Cover con la modalidad Top-Down. En esta metodología, se realizan de inmediato todas las losas horizontales en hormigón armado para luego ejecutar, sucesivamente, las excavaciones bajo la cobertura. De este modo es posible restituir el tránsito en un plazo muy acotado. En la Figura 7.13 se muestran las etapas del método Cut and Cover con modalidad Top-Down.

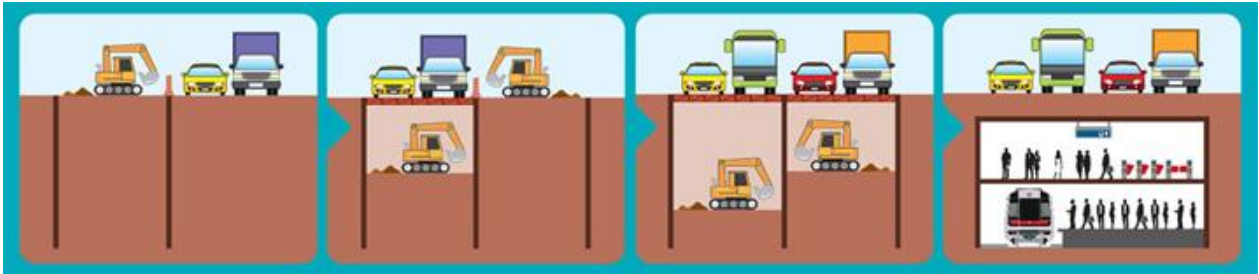


Figura 7.13 Esquema Cut and Cover modalidad Top Down.

Las estaciones en Cut & Cover poseen ventajas en términos de inversión, facilidad de conexión con la superficie, con los sistemas de ventilación, y por último plazos de construcción notablemente inferiores. Sin embargo, para los proyectos del Metro de Santiago se privilegia la elección de estaciones tipo caverna debido a la nula interferencia con el tránsito vehicular. Este tipo de estaciones también pueden ser atravesadas sin problemas por las tuneladoras, ya que el túnel de la estación tiene una sección mayor que el túnel de vías, permitiendo una libre circulación de la máquina. En este último caso, la construcción de las estaciones pasa a ser una tarea crítica capaz de retrasar el avance de la tuneladora.

Otra de las obras previas mencionadas, es la fábrica de dovelas y el resto de infraestructuras que alimentan a la tuneladora, ya sea de energía, agua, mortero o herramientas. Dichas instalaciones suelen ubicarse al costado del portal de entrada o fuera del pique donde se inicia la excavación con tuneladora. Esto no es un problema menor, ya que se requiere de un terreno lo suficientemente amplio para albergar las instalaciones y los sectores de acopio de dovelas y del material excavado. La Figura 7.14 muestra una instalación de faena típica, dentro de una zona urbana.



Figura 7.14 Instalación de faena típica dentro de una zona urbana.

7.3.2 Túnel interestación

La excavación del túnel comienza desde un portal de entrada en un extremo del trazado, o bien desde algún pique intermedio preparado especialmente para recibir la máquina tuneladora. Desde allí comienza la excavación con un ritmo de avance creciente durante un periodo de aprendizaje, logrando promedios de avance sobre los 15 m diarios, que completarán el túnel interestación hasta alcanzar el cruce de la primera estación.

En la Figura 7.15, se esquematiza el avance de un escudo EPB, que excava el túnel interestación hasta alcanzar una estación ya construida, para luego continuar al siguiente tramo, las estaciones pueden ser del tipo caverna o rectangulares. Notar que para esta modalidad no se requiere de pique intermedio entre las estaciones.

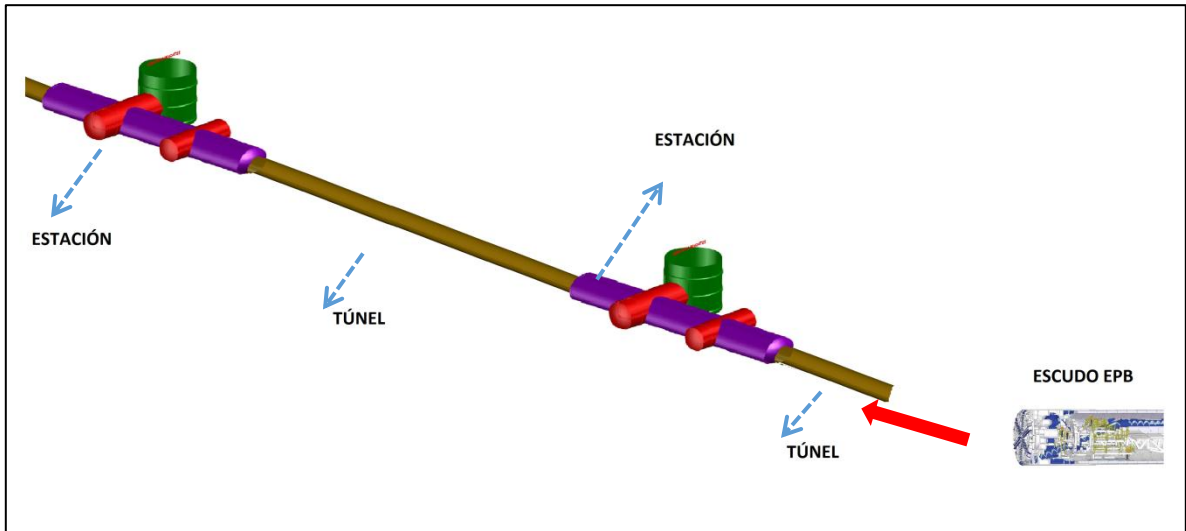


Figura 7.15 Esquema de avance de una máquina tuneladora

El túnel interestación tiene una sección circular con un diámetro interior de 8,5 m aproximadamente, dado por el tamaño final del anillo de revestimiento, este diámetro permite la circulación de dos vías al interior del túnel. Otra opción es la construcción de dos túneles gemelos paralelos, con un diámetro interior más pequeño de aproximadamente 5 m, que albergará cada una de las vías. Ejemplos de ambas secciones se muestran en la Figura 7.16 y la Figura 7.17.

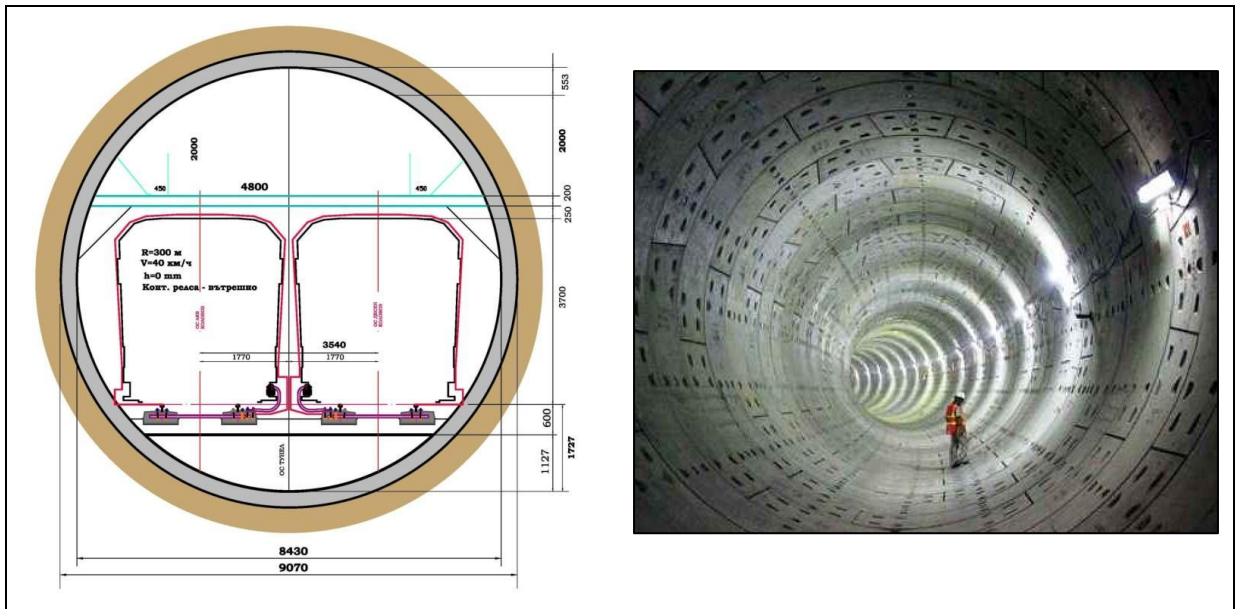


Figura 7.16 Sección circular doble vía.

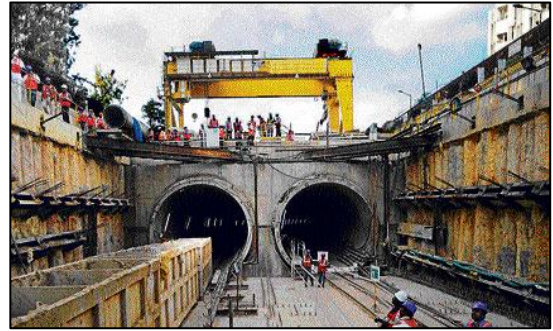
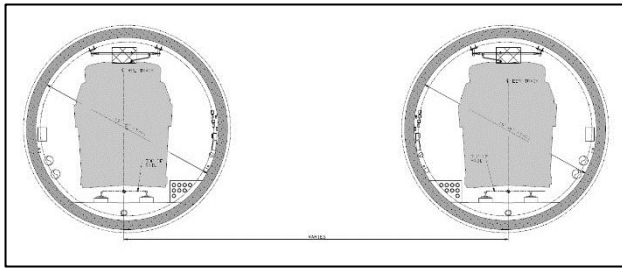


Figura 7.17 Sección circular bi-tubo, vías separadas.

7.4 Comparación ambos métodos.

En resumen, la construcción de una línea de Metro puede realizarse mediante el método NATM o el uso de máquinas tuneladoras, incluso se puede utilizar ambos métodos en tramos distintos, tal como se realiza en la construcción de la Línea 2 del Metro de Lima, donde 9 km de la primera etapa son construidos con NATM mientras se espera la llegada de dos escudos EPB que construirán los 26 km restantes.

Ambos métodos trabajan con el mismo objetivo, excavar la sección del túnel minimizando los riesgos de inestabilidades y deformaciones en superficie, pero lo hacen con técnicas muy diferentes, por un lado el método NATM considera al terreno como parte del soporte y permite su deformación controlada mientras se aplica el sostenimiento, y por otro lado el escudo de balance de presión de tierras o EPB, que excava la sección completa del túnel aplicando una presión del confinamiento a través del mismo suelo excavado y tratado con aditivos. Estas diferencias conceptuales se traducen en una serie de otras diferencias que se resumen en la Tabla 7.1.

Concepto	NATM	TBM
Sección Transversal	Ovalada, aprox 70 m2	Circular, aprox 80 m2
Sostenimiento	Marcos reticulados, malla y shotcrete	Anillo de hormigón prefabricado (dovelas)
Eliminación de escombros	En todo los piques, mediante capachos y camiones	Sólo un acopio en el portal, mediante cintas transportadoras
Inversión en maquinaria	Pequeña	Grande, sobre USD 25 millones para la máquina
Obras previas	Piques e Instalaciones de faena	Estaciones, Fabrica de dovelas e instalaciones de soporte
Terrenos necesarios	Terrenos para las estaciones y cada uno de los piques de construcción	Terreno para las estaciones y un gran terreno para las instalaciones de faena
Tipo de estaciones	Caverna	Preferencia Cut and Cover, pero puede ser cavernas también.
Número de Contratistas	Varios contratistas, uno para cada tramo	Pocos contratistas, la tuneladora es rentable para tramos largos

Tabla 7.1 Comparación de la implementación del método NATM y uso de escudo EPB

7.4.1.1 Rendimientos

i. NATM

El rendimiento de excavación y sostenimiento del túnel interestación mediante el método NATM se ha determinado a partir de informes semanales de avance de dos contratistas de la construcción de la Línea 3 del Metro de Santiago. Se ha escogido un periodo al azar de 4 semanas consecutivas, graficando el avance diario promedio de cada semana en cada frente de trabajo (frentes F-1, F-2, F-3, etc). El Gráfico 7.1 muestra los avances de un contratista que alcanza un promedio aproximado de 1,0 [m/día] mientras que el Gráfico 7.2 muestra los avances de otro contratista con un mejor desempeño que alcanza rendimientos del orden de 2,5 a 3,0 [m/día]. Para efectos de este trabajo se considerará un rendimiento promedio de 2,0 [m/día] para la comparación de los métodos constructivos en estudio.

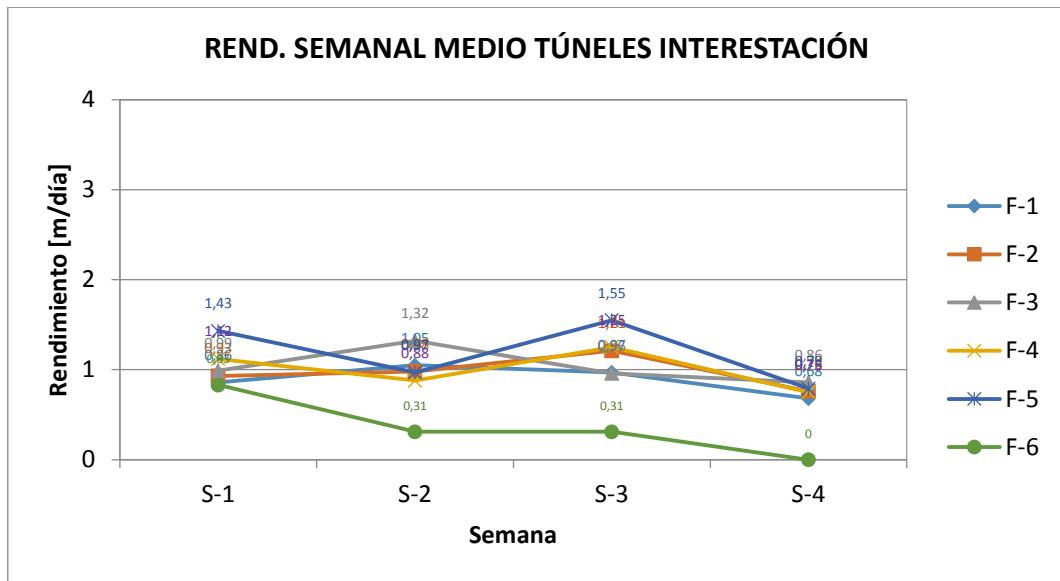


Gráfico 7.1 Rendimientos contratista N°1 en túnel interestación

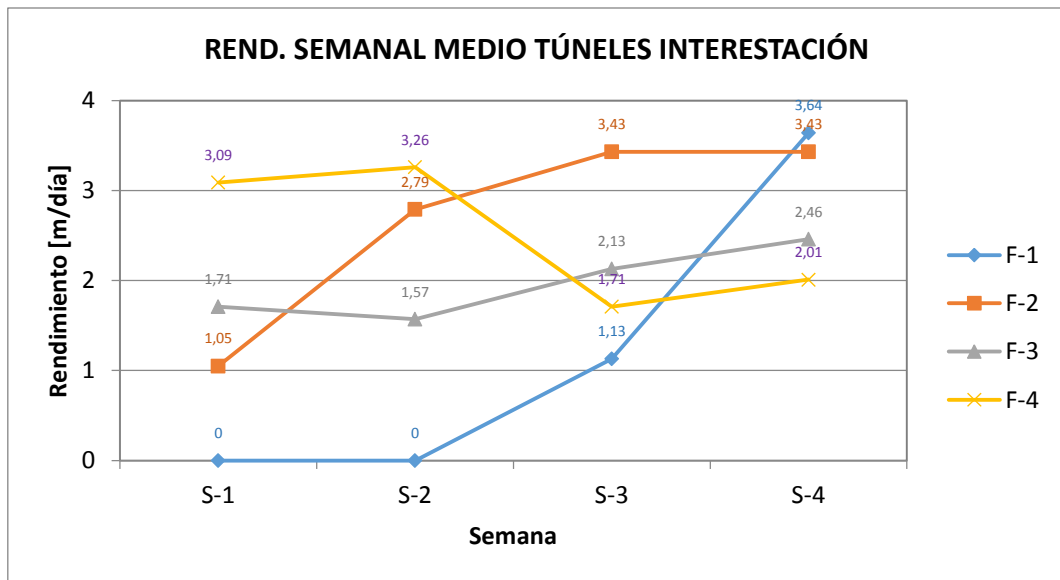


Gráfico 7.2 Rendimientos contratista N°2 en túnel interestación

ii. **TBM**

El rendimiento de excavación y sostenimiento del túnel interestación mediante el uso de una máquina tuneladora se ha determinado en el punto 6.4 de este trabajo, fijando un rango entre 15,0 y 23,0 [m/día]. Para efectos de este trabajo se considerará un rendimiento promedio de 18,0 [m/día].

8 DETERMINACIÓN DEL PLAZO DE EJECUCIÓN DE LAS OBRAS

Para definir la elección de un método constructivo sobre otro, es necesario evaluar un conjunto de factores que determinarán cual es el método más adecuado para las condiciones del proyecto. Uno de los factores más importantes a la hora de tomar la decisión, es el plazo de ejecución de las obras, plazo que se debe cumplir considerando todas las restricciones del proyecto.

Es por ello que en el presente capítulo se evaluarán los dos métodos constructivos en estudio, comparando el tiempo de ejecución de las obras de una línea de Metro hipotética construida bajo distintas condiciones que se detallarán más adelante.

Puesto que el objetivo principal de este trabajo es comparar dos métodos constructivos para la excavación de los túneles interestación, el resto de las obras previas que forman parte de una línea de Metro, como los piques de construcción y las estaciones, serán consideradas como obras secundarias, con un tiempo de duración fijo que no tendrá mayor discusión, pero que responde a las condiciones reales de un proyecto de este tipo. Los tiempos de ejecución de estas obras previas, se han conseguido del programa de construcción de las Líneas 3 y 6 del Metro de Santiago, en donde se especifica su tiempo de ejecución, considerando una secuencia lógica de construcción.

Como ya se ha mencionado en capítulos anteriores, en caso de utilizar el método NATM, la cantidad de frentes de trabajo estará determinado por la posibilidad de materializar piques de construcción y también por la posibilidad de iniciar la excavación desde las estaciones en una etapa intermedia de su construcción. Por otra parte, para el caso de excavación con tuneladoras, la cantidad de frentes de trabajo está condicionada al número de máquinas disponibles, que comúnmente no supera las 2 unidades.

A continuación se presenta un resumen de estos tiempos, considerando los detalles de construcción mencionados en el capítulo 7 de este trabajo. Más adelante se evaluarán distintos escenarios que se pueden presentar en un proyecto de este tipo-

8.1 Tiempo de ejecución para piques, estaciones y túneles

8.1.1 Estaciones tipo Caverna

El tiempo de ejecución de las obras de una estación construida en cavernas comprende desde la construcción de un brocal para iniciar la excavación del pique, hasta el revestimiento y radier que finalizan con las tareas del túnel estación.

El tiempo promedio a considerar para la construcción de una estación es de 600 días y ha sido determinado a partir los datos del programa de construcción de diferentes contratistas presentes en la construcción de las Líneas 3 y 6 del Metro de Santiago.

Dentro de la información disponible se han escogido 7 estaciones del tipo caverna, el tiempo de ejecución de cada elemento se detalla en la Tabla 8.1. Así luego de promediar y redondear las cifras, se tiene un tiempo promedio aproximado que se muestra en la Tabla 8.2. Sólo se han considerado las obras de excavación y sostenimiento del pique, galería y túnel, que permiten

conectar la estación con el túnel interestación, la construcción de la galería secundaria, andenes y otros, no son relevantes para este trabajo.

Estación	Línea	Tiempo [día]		
		Pique	Galería	Túnel
N1	L3	205	147	259
N2	L3	199	104	198
N3	L3	197	144	233
N4	L3	207	144	205
N5	L3	212	152	295
N6	L6	227	167	226
N7	L6	209	169	295

Tabla 8.1 Tiempos de ejecución estaciones L3 y L6.

Elemento	Tiempo [día]
Pique	200
Galería Acceso	150
Túnel Estación	250
Total Construcción Estación	600

Tabla 8.2 Tiempos de ejecución de elementos que componen una estación caverna.

8.1.2 Estaciones rectangulares, tipo Cut and Cover

Las estaciones rectangulares construidas por el método Cut and Cover, tienen tiempos de ejecución mucho menores que las del tipo Caverna, ya que las excavaciones se hacen en grandes secciones y a cielo abierto, dado la estabilidad que proporcionan las pantallas de pilotes. Para este trabajo se considera una estación estándar, con geometría rectangular de 20 m de ancho y 120 m de largo, con una profundidad entre 20 y 25m.

El tiempo a considerar para la excavación, sostenimiento y construcción del radier, será de 330 días aproximadamente y tiene como referencia los tiempos de construcción de la estación terminal de la Línea 3 del Metro de Santiago. El resto de actividades como la construcción de accesos y otros niveles intermedios, no son relevantes para este análisis.

Elemento	Tiempo [día]
Ejecución de pilotes	130
Excavación pique	200
Total estación rectangular	330

Tabla 8.3

8.1.3 Piques de construcción

El tiempo de ejecución de un pique de construcción dependerá de las dimensiones que este tenga, profundidad del pique y el largo de la galería, además de las condiciones del suelo a excavar. Para este trabajo se considerará un pique estándar de 20 m de profundidad, con una galería de 25 m de largo. El tiempo a considerar para la materialización de este pique será de 220 días, que incluye las tareas de rompimiento de para el inicio de la excavación del túnel interestación.

Elemento	Tiempo [día]
Pique	160
Galería conexión	60
Total Pique Construcción	220

Tabla 8.4 Tiempos de ejecución para elementos de un pique de construcción.

8.1.4 Tiempo de ejecución túnel interestación

La construcción del túnel interestación corresponde a una obra lineal con ciclos bien definidos, donde el tiempo total de ejecución de las obras dependerá, entre otras cosas, de la cantidad de frentes de trabajos que se puedan implementar simultáneamente y del rendimiento de excavación alcanzado en cada uno de ellos, determinado por el método constructivo empleado.

En cuanto a los rendimientos alcanzados por cada método constructivo, se tomarán los siguientes valores como promedio, ambos valores determinados en el punto 7.4.1.1 de este trabajo.

Método Constructivo	Rendimiento por frente [m/día]
NATM	2
Tuneladora EPB	18

Tabla 8.5 Rendimientos por frente para cada método constructivo.

Si bien el rendimiento de la tuneladora supera varias veces al del método NATM, hay que considerar la escasa posibilidad de tener a más de una máquina tuneladora trabajando en forma simultánea y otras condiciones para su puesta en marcha.

8.2 Tiempo de ejecución de una línea de Metro

Para determinar bajo qué condiciones el uso de máquinas tuneladoras toma ventajas en términos del tiempo de ejecución sobre el método NATM, es necesario evaluar distintos escenarios posibles, siendo el más importante el escenario donde no existe la posibilidad de construir o implementar piques de construcción.

A continuación se presentan los casos más representativos para la construcción de una línea del Metro de Santiago y se determina el tiempo de ejecución de las obras para cada método constructivo según la descripción realizada en el capítulo 7 y bajo las condiciones impuestas en cada caso. En primera instancia se evaluará un trazado típico, con una distancia fija entre estaciones de 1000 m y la disponibilidad de terrenos para construir piques, condición ventajosa para implementar el método NATM. Para el siguiente caso de estudio se aplicarán restricciones para la construcción de piques y cantidad de frentes simultáneos.

Todos los casos serán representados en Diagramas Tiempo – Camino, representación gráfica de un programa de obra en relación a los ejes de Tiempo y Espacio. Este tipo de diagrama se adapta muy bien a proyectos de construcción lineal como puentes, caminos o túneles. En él se puede observar el avance de cada frente de trabajo para un determinado momento.

8.2.1 Caso 1: Condiciones típicas de construcción del Metro de Santiago.

Las últimas líneas de Metro construidas en Santiago tienen como factor común el método constructivo NATM y una serie de otras consideraciones que se enumeran a continuación.

- i. Disponibilidad de terrenos para piques de construcción.
- ii. Suelos estables de gravas o finos, sin presencia de napas subterráneas importantes.
- iii. Distancia entre estaciones, entre 1 y 1,5 km.
- iv. Las estaciones de inicio y final del trazado serán del tipo *cut and cover*.
- v. Preferentemente las estaciones intermedias serán subterráneas, construidas en NATM.
- vi. En cada extremo se construye un tramo de 250 m de túnel para las maniobras de los trenes, este tramo es construido mediante método NATM.
- vii. La máquina tuneladora tardará 365 días para su construcción, traslado y montaje en obra.

Bajo estas consideraciones se realizará una comparación mediante diagramas Tiempo – Camino que ilustra la construcción de una línea típica del Metro de Santiago mediante el método NATM y el uso de máquinas tuneladoras.

En la Tabla 8.6 y la Tabla 8.7 se muestra un resumen de los tiempos de construcción y rendimientos a considerar para los distintos elementos que conforman una línea típica del Metro de Santiago.

Elemento	Tiempo [días]
Pique construcción	160
Galería construcción	60
Pique estación	200
Galería acceso principal	150
Túnel estación	250
Estación Cut & Cover	330

Tabla 8.6 Resumen tiempos de construcción para una línea de Metro

Parámetro		Valor
Distancia entre estaciones [m]	d	1.000
Largo estaciones [m]	L_{est}	120
Cola de Maniobras [m]	L_{cm}	250
Rendimiento promedio frente NATM [m/día]	R_{NATM}	2
Rendimiento promedio frente EPB [m/día]	R_{EPB}	18

Tabla 8.7 Parámetros y rendimientos a considerar en la evaluación de una línea típica del Metro de Santiago

8.2.1.1 Trazado con 2 estaciones

Como primer ejemplo se presenta el caso más básico, la construcción de un tramo con 2 estaciones separadas 1000 m.

8.2.1.1.1 Construcción mediante NATM

El diagrama Tiempo – Camino del Gráfico 8.1 muestra el progreso de la construcción de un trazado con 2 estaciones mediante el método NATM. Es posible apreciar que el tiempo total de construcción está determinado por la excavación de los tramos de cola de maniobras en ambos extremos, alcanzando los 455 días.

El túnel interestación se excava desde cuatro frentes, dos que inician desde un pique central en direcciones opuestas y otros dos que se parten desde las estaciones, una vez terminada su excavación.

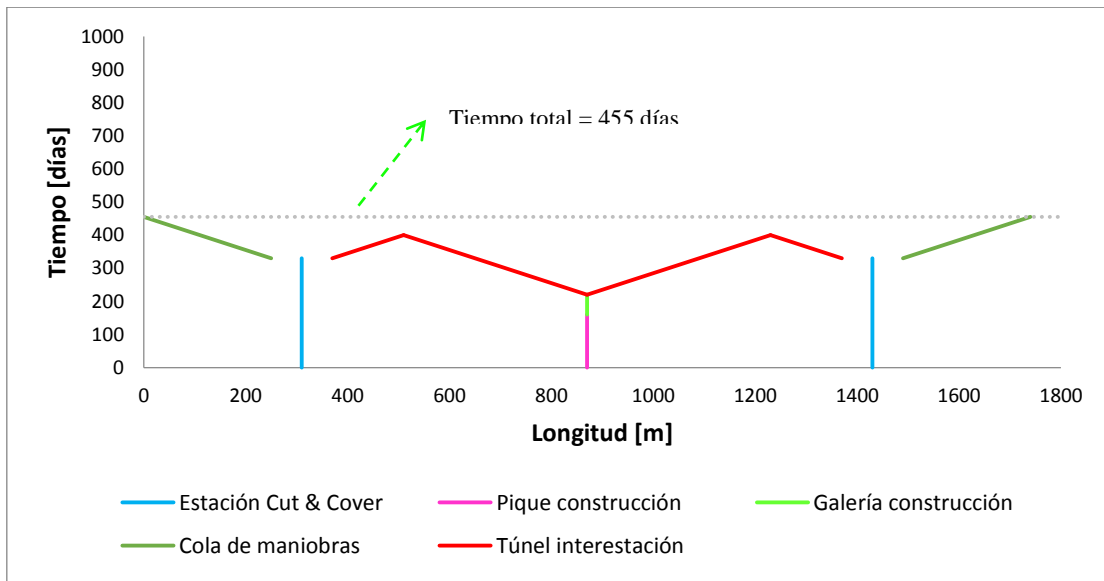


Gráfico 8.1 Diagrama Tiempo - Camino para 2 estaciones (NATM)

8.2.1.1.2 Construcción con máquina tuneladora

Para el caso del uso de máquinas tuneladoras, el túnel interestación se excava desde la primera estación en adelante, atravesando las estaciones que siguen y siendo retirada en la última. Los tramos cortos de las colas de maniobras se excavan mediante NATM.

El Gráfico 8.2 muestra el diagrama Tiempo – Camino, donde el segmento verde corresponde al avance de la máquina tuneladora. El tiempo total de ejecución de las obras es de 455 días y está determinado por el final de la excavación de las colas de maniobras.

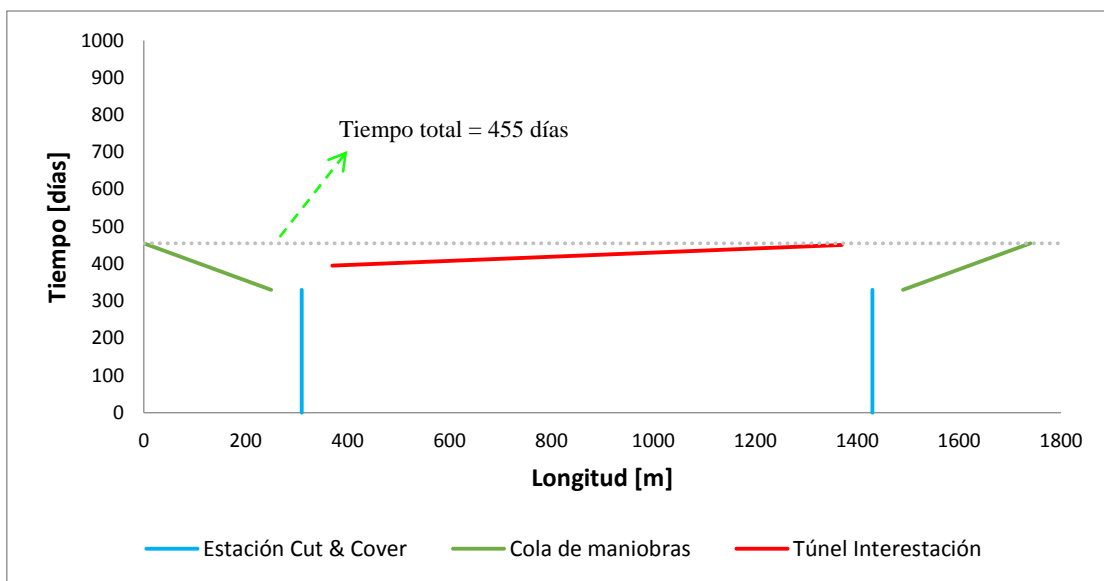


Gráfico 8.2 Diagrama Tiempo - Camino para 2 estaciones (TBM)

8.2.1.2 Trazado con 3 estaciones

Para el siguiente caso se agrega una estación al trazado y se evalúa para ambos métodos constructivos.

8.2.1.2.1 Construcción mediante NATM

Siguiendo las consideraciones iniciales, la estación intermedia se construye en forma subterránea, mediante un pique, una galería de acceso y un túnel estación. La construcción del túnel interestación será atacada únicamente desde los piques intermedios y las estaciones terminales, aunque exista la posibilidad de abrir un frente de excavación en una etapa intermedia de la construcción de las estaciones subterráneas (este caso no será abordado en estos ejemplos).

El diagrama Tiempo – Camino del Gráfico 8.3 muestra que el tiempo de ejecución de la estación subterránea fija un plazo total de ejecución de 600 días, aun cuando la excavación de los túneles finaliza en torno a los 450 días.

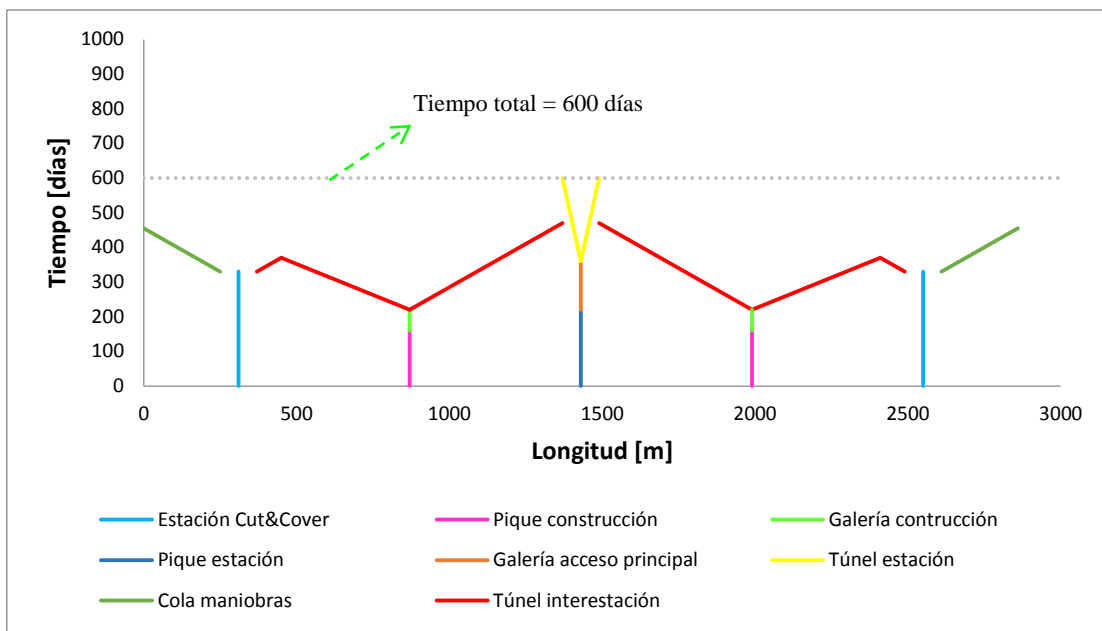


Gráfico 8.3 Diagrama Tiempo - Camino para 3 estaciones (NATM)

8.2.1.2.2 Construcción mediante TBM

El Gráfico 8.4 muestra el diagrama Tiempo – Camino para un trazado de tres estaciones. Para este caso el inicio de excavación de la máquina tuneladora debe ser retrasado con el fin de alcanzar la segunda estación cuando esta se encuentre terminada, de lo contrario la tuneladora deberá detener su excavación unos metros antes de la estación y mantener la estabilidad en el frente hasta que pueda continuar, esta detención podría durar varios meses.

El avance de la máquina tuneladora se representa con la línea verde continua, la cual debe iniciar la excavación aproximadamente el día 550 para poder atravesar la segunda estación inmediatamente después de ser terminada. La situación original se representa con la línea verde segmentada, donde la tuneladora inicia la excavación el día 395 después de su puesta en marcha y alcanza la segunda estación en una etapa intermedia de su construcción, lo que obliga a su detención.

Finalmente el tiempo total de ejecución es de 663 días, determinado por la excavación del túnel interestación, aunque condicionado enormemente por el plazo de la construcción de la estación subterránea.

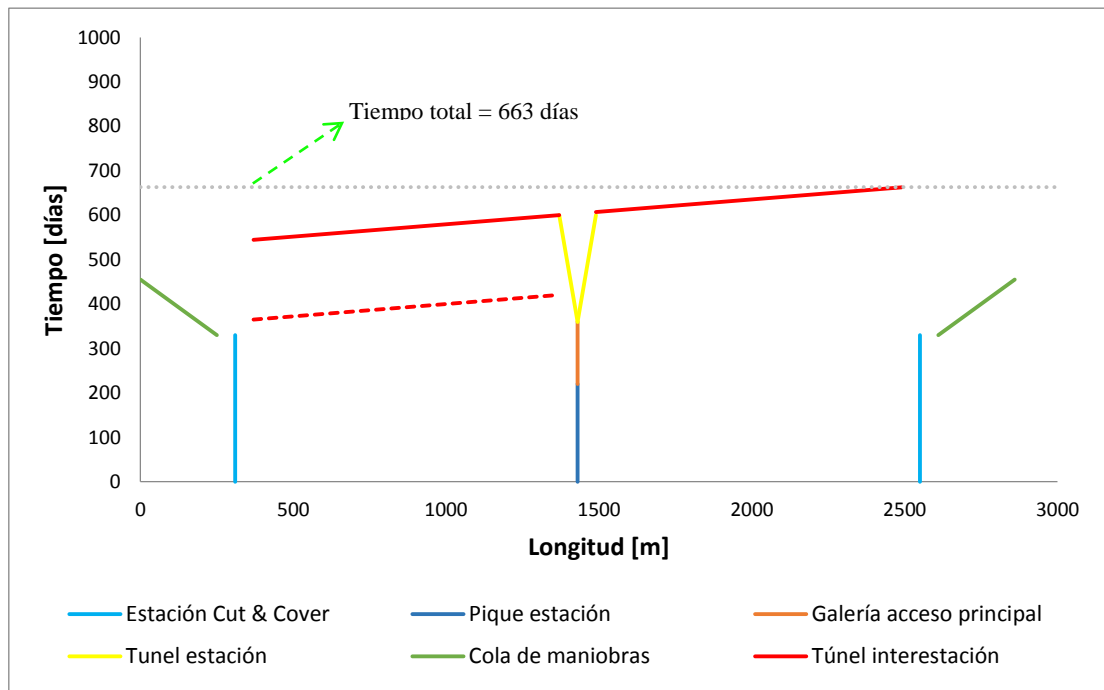


Gráfico 8.4 Diagrama Tiempo - Camino para 3 estaciones (TBM)

Con el fin de optimizar este caso, se considera el mismo trazado con tres estaciones del tipo cut and cover, así el avance de la tuneladora no tendrá interferencia al llegar a la segunda estación. El diagrama Tiempo – Camino del Gráfico 8.5 muestra la condición descrita, la que implica una reducción de 150 días en el tiempo total de ejecución.

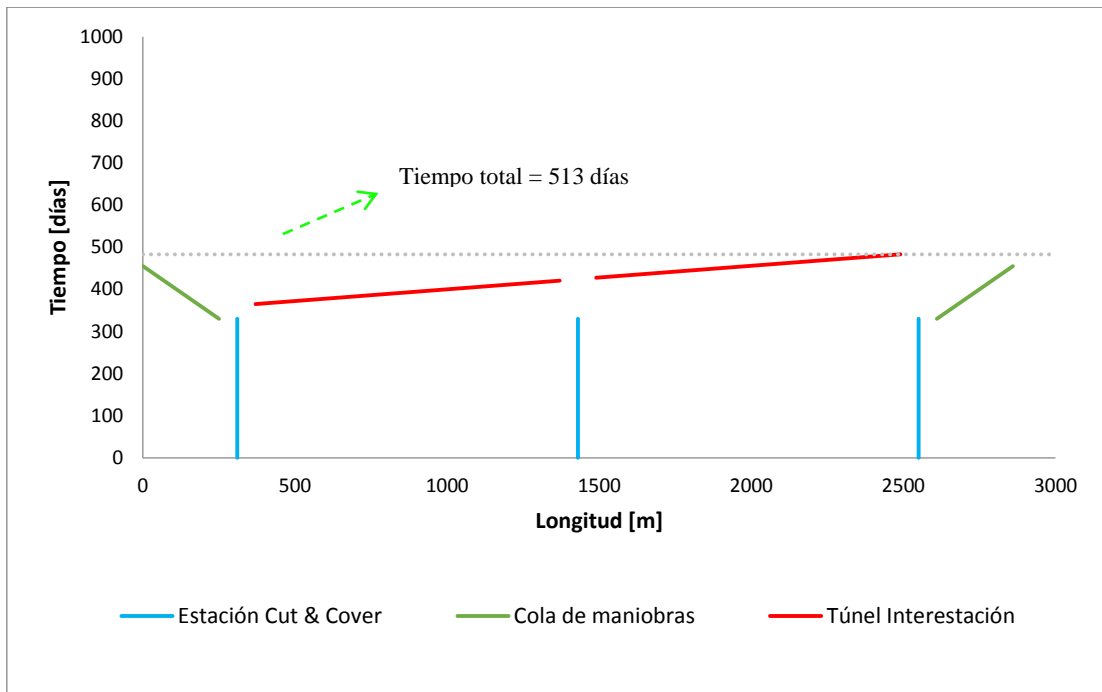


Gráfico 8.5 Diagrama Tiempo - Camino para 3 estaciones cut and cover (TBM)

8.2.1.3 Trazado general con N estaciones

Presentados los casos con dos y tres estaciones, se procede a desarrollar el caso general con N estaciones manteniendo las consideraciones iniciales.

8.2.1.3.1 Construcción mediante NATM

La construcción de las estaciones subterráneas y del túnel interestación a través de piques, se enfrenta como obras independientes, por lo cual basta replicarlas para obtener un trazado con número importante de estaciones. El Gráfico 8.6 muestra un trazado de N estaciones construido mediante el método NATM, donde es fácil apreciar que el tiempo total de ejecución se mantiene sin importar el número de estaciones a construir. Esta condición es tremendamente potente, ya que permite proyectar líneas de Metro de gran longitud y dividir su construcción en distintos tramos para diferentes contratistas, siempre que se tenga la disponibilidad de terrenos donde emplazar los piques de construcción.

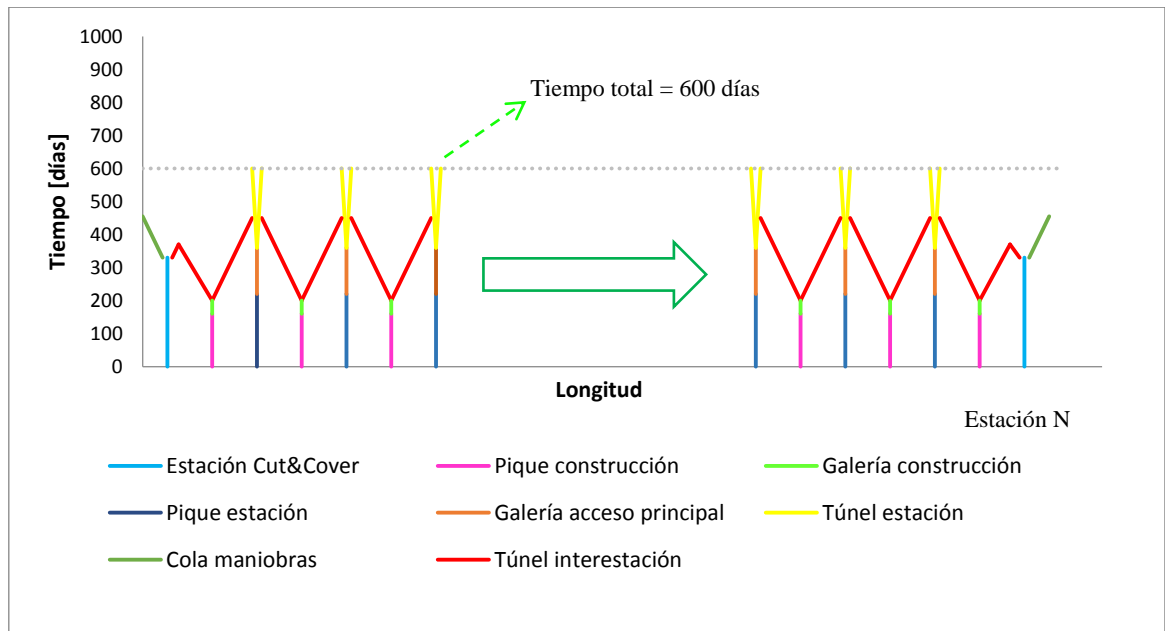


Gráfico 8.6 Diagrama Tiempo - Camino para N estaciones (NATM)

8.2.1.3.2 Construcción mediante TBM

El caso general para el uso de una máquina tuneladora en un trazado de N estaciones se ilustra en el Gráfico 8.7, donde se aprecia que al aumentar la longitud del trazado, el tiempo total de ejecución aumenta significativamente por sobre el tiempo del método NATM.

Si bien la máquina tuneladora tiene un gran rendimiento de excavación, el hecho de trabajar en un único frente le impide competir con la suma de los múltiples frentes posibles del método NATM, de ahí que por cada estación que se agregue la tuneladora deberá excavar el nuevo tramo de túnel, aumentando el tiempo total de la obra.

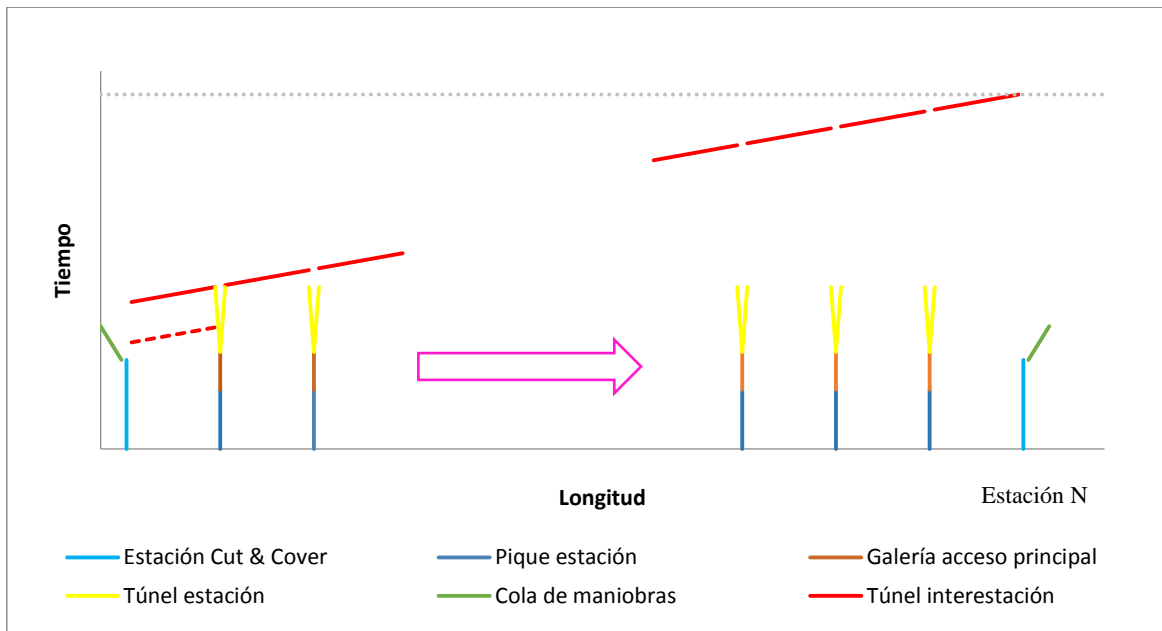


Gráfico 8.7 Diagrama Tiempo - Camino para N estaciones (TBM)

8.2.1.4 Comparación de ambos métodos para Caso 1.

Mediante el uso de diagramas Tiempo – Camino se ha logrado determinar fácilmente que para un trazado típico del Metro de Santiago con una distancia fija entre las estaciones, el tiempo de ejecución de las obras mediante el Método NATM depende exclusivamente del tiempo de construcción de las estaciones tipo caverna que es aproximadamente 600 días, por lo cual sin importar el número de estaciones, este tiempo seguirá siendo el mismo. En cambio, al analizar el tiempo de ejecución de las obras al momento de utilizar una máquina tuneladora para la excavación y sostenimiento del túnel interestación, ocurre que este tiempo crece al aumentar el número de estaciones. El Gráfico 8.8 muestra la evolución de estos tiempos de excavación para cada método y en él se puede apreciar que para un tramo de hasta 5 estaciones, el uso de una máquina tuneladora permite una disminución en los plazos de la obra en comparación con el método NATM, mientras que para tramos con 6 o más estaciones la tuneladora no tiene competitividad, llegando a doblar el tiempo de ejecución para un tramo con 15 estaciones.

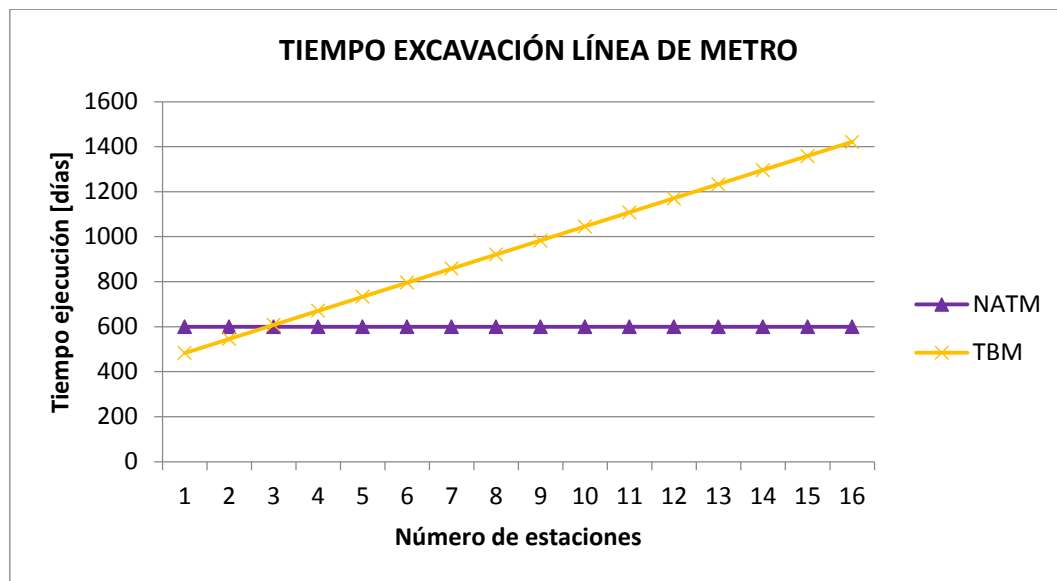


Gráfico 8.8 Tiempo de excavación de una Línea del Metro de Santiago

En resumen, la evaluación de este caso, que representa las condiciones típicas de la construcción del Metro de Santiago, muestra que a pesar de que el rendimiento de la tuneladora supera en varias veces al rendimiento de un frente en método NATM, esta ventaja no se traduce directamente en una reducción del plazo de la obra, y si bien existe un tramo pequeño para el cual ambos métodos entregan tiempos similares, su longitud no justificaría la enorme inversión de una máquina tuneladora. Por lo cual habrá que buscar otras condiciones para las cuales la implementación de la tuneladora genere beneficios.

8.2.2 Caso 2: Condiciones típicas de construcción del Metro de Santiago, modificando distancia entre estaciones.

En vista que bajo las condiciones del caso 1, el uso de una tuneladora no supera el desempeño del método NATM, se analizará un nuevo caso, donde se deja como variable la distancia entre las estaciones, esto con el objetivo encontrar un distanciamiento mayor al típico, a partir del cual el uso de una tuneladora representa un tiempo menor en la ejecución de las obras, manteniendo la condición de múltiples frentes del método NATM.

El tiempo de construcción del túnel interestación para el método NATM, se reduce al tiempo de construcción de un solo tramo entre estaciones, construido con dos frentes desde un pique de construcción en el centro del tramo y se puede representar por la siguiente expresión, resultado de desarrollar la ecuación (8-1).

$$t_{NATM}^2 = t_{pique} + \frac{d}{2R_{NATM}} \quad (8-1)$$

Dónde:

$t_{pique} = 200$ días, tiempo de construcción de piques de acceso.

$R_{NATM} = 2$ m/día, rendimiento método NATM.

El tiempo de ejecución de una línea de Metro, considerando el uso de una máquina tuneladora, corresponde al tiempo que demora en construir, transportar y ensamblar la tuneladora t_{EPB}^0 , más el tiempo de excavación de todos los tramos entre la primera y última estación, además del tiempo empleado en cruzar cada estación intermedia t_{est} . Así el tiempo de ejecución de las excavaciones queda expresado por:

$$t_{EPB}^2 = t_{EPB}^0 + (n - 1) \times \frac{d}{R_{EPB}} + (n - 2) \times t_{est} \quad (8-2)$$

Dónde:

$t_{EPB}^0 = 365$ días, tiempo para iniciar la excavación de la máquina tuneladora.

$R_{EPB} = 18$ m/día, rendimiento tuneladora.

$t_{est} = 7$ días, tiempo para cruzar cada estación.

n , número de estaciones.

Igualando ambas expresiones y despejando el valor d para determinar el distanciamiento entre estaciones en función de los rendimientos de ambos métodos y el número de estaciones del tramo a evaluar, se obtiene la siguiente relación.

$$d = \frac{2 \cdot R_{NATM} \cdot (t_{EPB}^0 - t_{pique} + (n - 2)t_{est})}{\left(1 - 2(n - 1) \frac{R_{NATM}}{R_{EPB}}\right)} \quad (8-3)$$

Al evaluar para distintos números de estaciones, se obtiene la siguiente tabla con distanciamiento mínimo entre estaciones para la equivalencia de ambos métodos constructivos.

Número de estaciones n	Distancia entre estaciones [m] d
3	1250
4	2150
5	6700

Tabla 8.8 Distancia entre estaciones para caso 2.

En la Tabla 8.8 se aprecia que al aumentar el número de estaciones, la distancia entre ellas, requerida para equiparar los tiempos de construcción de los túneles, aumenta considerablemente. Para un tramo con 4 estaciones, es necesario un distanciamiento de 2150 m, distancia útil en el caso de construir una línea expresa con pocas estaciones. Se observa también, que al aumentar a 5 el número de estaciones, el distanciamiento necesario se eleva a 6700 m, caso poco probable para la construcción de una línea de Metro.

8.2.3 Caso 3: No existe posibilidad de materializar piques de construcción, distancia entre estaciones variable.

Un caso interesante de abordar ocurre cuando no existe la posibilidad de materializar piques de construcción entre las estaciones o bien el acceso a ellos es tan complejo que los hace inviables. Esto sucede principalmente en ciudades densamente edificadas, donde la disponibilidad de espacio para construir piques que se mantengan abiertos durante toda la construcción del proyecto es escasa, o bien no existe la posibilidad de acceder a ellos en forma continua con camiones cargados de materiales o escombros. Caso importante ya que la ciudad de Santiago se acerca cada vez más a estas condiciones.

Bajo esta situación, la construcción del túnel interestación mediante el método NATM queda acotada a la posibilidad de abrir frentes de trabajo desde cada estación, esto ocurre en una etapa intermedia de la construcción del túnel estación mediante side drift, donde se puede generar una sección de transición entre la bóveda de la estación y el ojo del túnel interestación tal como se muestra en la Figura 8.1.



Figura 8.1 Transición entre túnel estación e interestación

Este nuevo plan de trabajo aumenta el número de frentes que se atacan desde el mismo pique (estación), por lo cual es necesario mantener una perfecta coordinación y logística para suministrar materiales y extraer escombros, sin disminuir los rendimientos de cada frente.

Suponiendo condiciones ideales de coordinación entre los frentes de trabajos que interactúan dentro de la estación en construcción, se puede considerar que no se generan restricciones ni bajas en los rendimientos del método NATM, es decir, no existirán problemas de acumulación de arena, uso de maquinaria o suministro de hormigón para cada uno de los frentes de trabajo. Así el avance en la excavación de los túneles interestación no influirá en los tiempos de construcción de la propia estación.

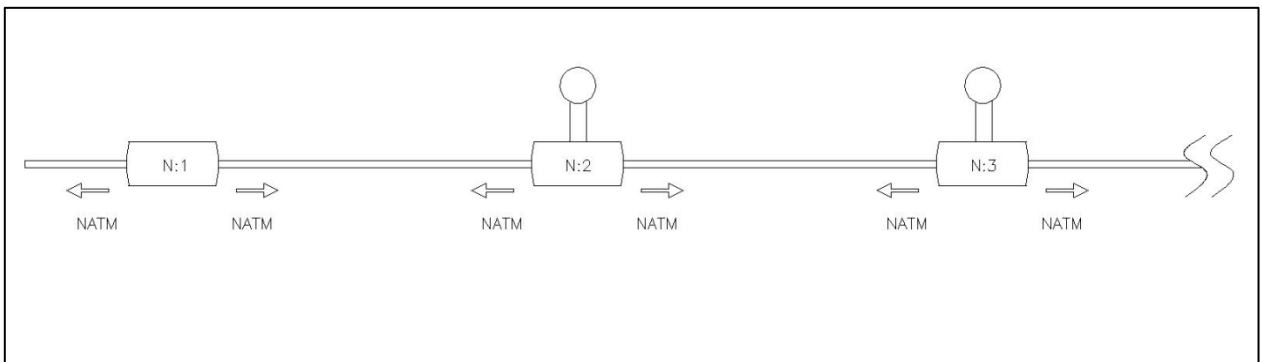


Figura 8.2 Frentes de avance en túnel interestación

La excavación del túnel interestación se realizará a través de dos frentes simultáneos que parten en el extremo de cada estación y se encuentran en el centro de cada tramo de túnel tal como indica el esquema de la Figura 8.2. Por lo tanto, el tiempo de ejecución del túnel, se calcula como el tiempo necesario para excavar la mitad del tramo que separa dos estaciones, que es equivalente al caso en que se excava desde un pique de construcción, con la única diferencia en el tiempo de inicio de las excavaciones, evidentemente mayor al caso de un pique de construcción.

Entonces el tiempo de excavación del túnel interestación queda determinado por la siguiente expresión:

$$t_{NATM} = \frac{d}{2 \cdot R_{NATM}} + \frac{(t_{NATM_1} + t_{NATM_2})}{2} \quad (8-4)$$

Dónde:

$t_{NATM_1} = 430$ días, tiempo en abrir el primer frente de excavación del túnel interestación.

$t_{NATM_2} = 520$ días, tiempo en abrir el segundo frente de excavación del túnel interestación.

$R_{NATM} = 2$ m/día, rendimiento método NATM.

La diferencia entre el inicio de cada frente se debe, entre otras cosas, al desfase en los frentes de excavación de los side drifts del túnel estación. Importante notar que para este caso, el tiempo de inicio de la excavación con el método NATM, t_{NATM_1} , es mayor que el tiempo de inicio de la tuneladora t_{EPB}^0 .

Por otro lado, el tiempo de excavación mediante el uso de una máquina tuneladora queda determinado por la ecuación (8-5).

Igualando los tiempos de ejecución de cada método con las ecuaciones (8-2) y (8-4), se tiene la siguiente relación para el distanciamiento entre estaciones.

$$d = \frac{2 \times R_{NATM} \times \left(\frac{(t_{NATM_1} + t_{NATM_2})}{2} - t_{EPB}^0 - (n - 2)t_{est} \right)}{\left(2(n - 1) \frac{R_{NATM}}{R_{EPB}} - 1 \right)} \quad (8-5)$$

Evaluando en función del rendimiento de la tuneladora R_{EPB} y para distintos números de estaciones n , se obtiene el Gráfico 8.9 que representa la distancia d entre estaciones, para la cual el tiempo de ejecución de los túneles es igual para el método NATM y el uso de TBM. Se ha achurado la zona de los casos más representativos, con distancia d entre 1000 y 2500 m y el rendimiento de la tuneladora entre 15 y 22 m/día.

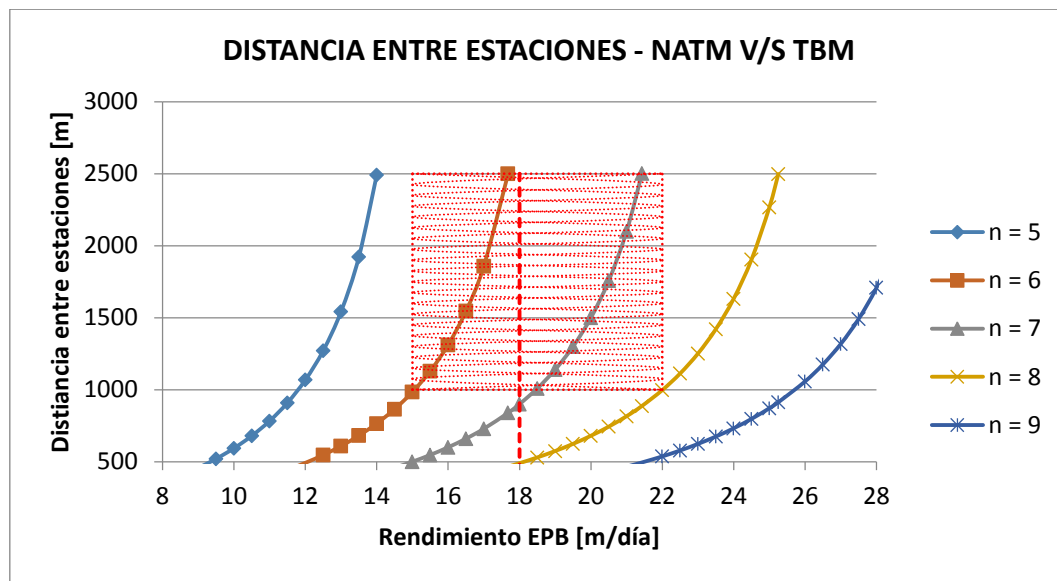


Gráfico 8.9 Distancia entre estaciones vs rendimiento tuneladora para caso 2.

Considerando que para el caso estudiado, el inicio de la excavación de los túneles de vías mediante el método NATM tarda más que el inicio con máquina tuneladora, los resultados representados en el Gráfico 8.9, se pueden interpretar de la siguiente forma:

- Las curvas representan la distancia entre estaciones para la cual la excavación en NATM iguala en plazo a la excavación mediante el uso de una máquina tuneladora. Bajo la curva se encuentra el conjunto de casos para los cuales el uso de una tuneladora se impone en términos de tiempo al método NATM, por el contrario sobre la curva se encuentran los casos en que el método tradicional consigue un menor tiempo en la excavación del trazado completo.
- Siguiendo la lógica del punto anterior, se puede apreciar que para un trazado de 6 estaciones y un rendimiento de la tuneladora $R_{EPB} = 18 \text{ m/día}$ (línea roja segmentada), el tiempo de excavación con TBM será menor que para el método NATM cualquiera sea el distanciamiento dentro de la zona achurada, mientras que para 7 o más estaciones será necesario aumentar el rendimiento de la máquina y reducir el distanciamiento entre estaciones para situarse bajo las curvas respectivas.
- Iniciando más tarde la excavación de los túneles, el método NATM necesita de un trazado más largo y una cantidad de frentes suficiente, que sumen un rendimiento mayor al de la tuneladora, para poder equiparar los tiempos de excavación.

Como ejemplo se ha escogido un tramo con 7 estaciones distanciadas 1000 m, el rendimiento de la máquina tuneladora debe aumentar a 18,5 m/día para equiparar los tiempos de ejecución. El Gráfico 8.10 muestra el diagrama Tiempo – Camino para el caso NATM y el Gráfico 8.11 el caso del uso de una máquina tuneladora, en ambos el tiempo de ejecución ronda los 725 días.

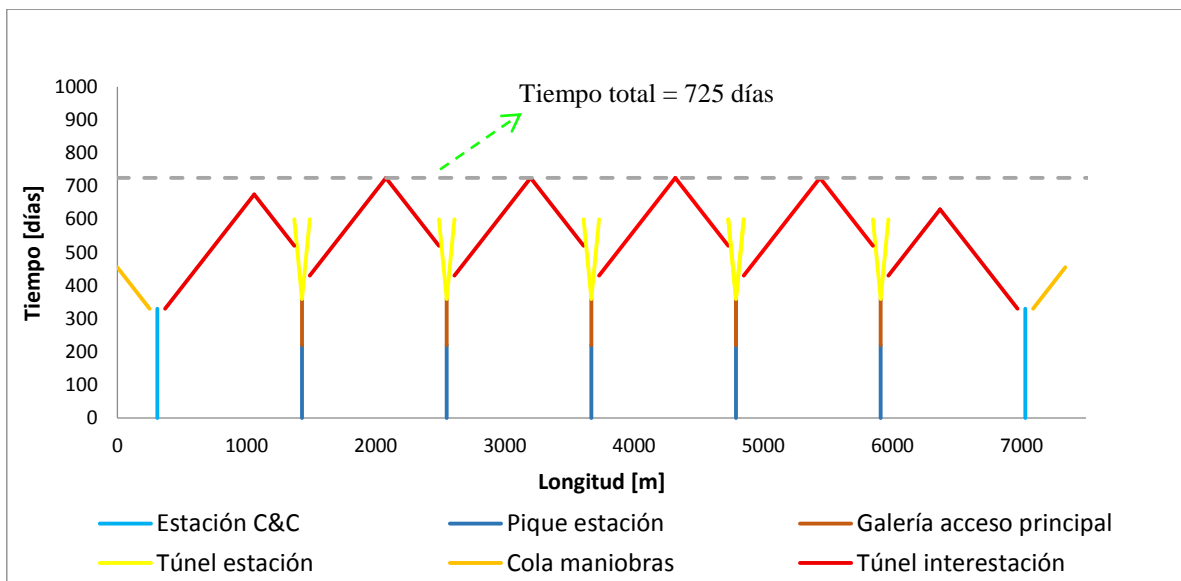


Gráfico 8.10 Ejemplo caso 2 para 7 estaciones (NATM)

Para el caso TBM, las estaciones 1 a la 4 se construyen en cut and cover para evitar interferencias con el paso de la máquina tuneladora, de lo contrario se debe aplazar el inicio de la máquina, aumentando el plazo final.

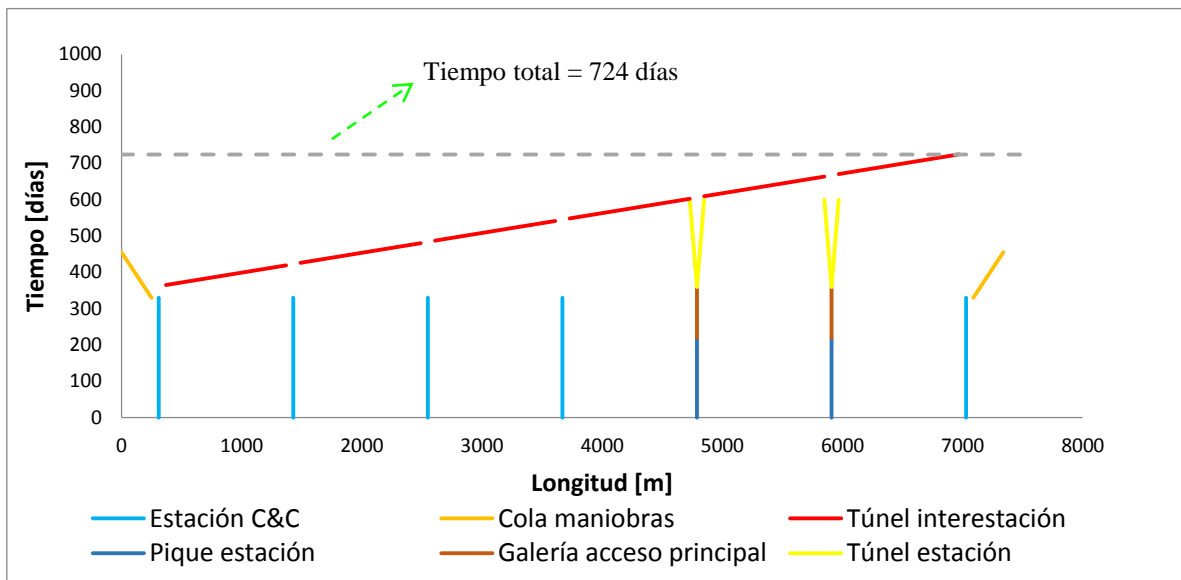


Gráfico 8.11 Ejemplo caso 2 para 7 estaciones (TBM)

Como se ha mencionado anteriormente, este caso es importante de revisar ya que estas condiciones son completamente posibles en algunas comunas de Santiago que se encuentran densamente edificadas, tales como Santiago Centro y Providencia.

Finalmente, tras la evaluación de los dos casos presentados en este capítulo, se puede concluir que el desempeño del método NATM supera ampliamente al uso de máquinas tuneladoras mientras exista la posibilidad de construir piques que permitan abrir múltiples frentes de avance, esta condición se encuentra en gran parte de la ciudad de Santiago. Por otra parte, se ha verificado que al aplicar ciertas restricciones al método NATM, principalmente en la eliminación

de los piques de construcción, el uso de máquinas tuneladoras alcanza menores tiempos de ejecución que el método tradicional para ciertos tramos, lo cual abre una puerta importante para un futuro uso de esta tecnología en proyectos donde el Metro de Santiago atraviese zonas complicadas, como el centro de la capital.

9 EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LOS MÉTODOS DE EXCAVACIÓN

Otro de los factores decisivos al momento de elegir un método constructivo, tiene que ver con los costos que implican cada uno de ellos. Obviamente la decisión final tiende al método más económico que cumpla con las especificaciones técnicas y la seguridad del proyecto.

Visto de este modo, el presente capítulo buscará desagregar el costo total de una línea de Metro, buscando determinar el costo de la construcción del túnel interestación, para luego fijar un costo unitario comparable entre ambos métodos.

En lo que sigue, se determinarán los costos asociados a cada método constructivo, considerando las distintas etapas y actividades que los conforman, para finalmente, poder compararlos y determinar cuál es el más económico.

9.1 Método NATM

Para determinar los costos asociados a la construcción del túnel interestación de una Línea del Metro de Santiago excavado mediante el método NATM, se ha analizado información directa del listado de precios y estados de pago de diferentes contratistas participantes en los contratos de túneles de las Líneas 3 y 6 en actual construcción y se han tomado valores medios para efectos de este trabajo. Por razones de confidencialidad no es posible revelar la fuente. A partir de estos antecedentes se ha podido estimar el costo asociado a los túneles interestación, considerando varios detalles que se explican a continuación.

Principales costos a considerar en la construcción de una Línea mediante el método NATM.

Los costos específicos para la construcción del túnel interestación en el caso de las Líneas 3 y 6 del Metro de Santiago se distribuyen en las siguientes etapas.

- i. Terreno e instalación de faenas
- ii. Construcción de piques y galerías de construcción
- iii. Construcción de estaciones
- iv. Construcción túnel interestación

Para los puntos (i), (ii) y (iii) se hará un análisis simplificado de los costos, sin entrar en el detalle de la composición de cada ítem, ya que estos se consideran como obras previas a la construcción del túnel de vías. Mientras que para el punto (iv) se mostrará un detalle de sus partidas y el cálculo de los costos finales a considerar en este trabajo.

9.1.1 Terreno e instalación de faenas

Uno de los problemas típicos de los piques de construcción, es el ajustado tamaño del terreno disponible para las instalaciones de faena, la realización de maniobras y el acopio del material excavado. Para este trabajo se ha escogido un terreno mínimo de 800 m², considerando un valor conservador para el m² de suelo de la ciudad de Santiago de acuerdo a un estudio realizado por la empresa Inmobiliaria Arenas & Cayo, donde el valor promedio para comunas como Providencia, Santiago, Ñuñoa y Macul ronda las 35, 19, 17 y 15 UF/m² respectivamente.

Para este trabajo se asumirá un valor de 15 UF/m² para los terrenos destinados a piques de construcción, con lo cual el costo asumido en este concepto es el siguiente.

Ítem	unidad	Valor
Superficie	m ²	1200
Costo Suelo	UF/m ²	15
Costo Terreno	UF	18.000

Tabla 9.1 Costo del terreno para construcción del pique.

En cuanto a las instalaciones de faenas, estas consideran los siguientes ítems

- Inmobiliario
- Mano de obra para la instalación
- Maquinarias y equipos

El costo para esta partida, se determina a partir del análisis de precios unitarios de uno de los contratistas de Metro de Santiago, se tomará el promedio de los costos calculados para cada pique de construcción de uno de los tramos de la Línea 6.

Ítem	unidad	Valor
Instalación de Faenas	UF	6.500

Tabla 9.2 Costo instalaciones de faena en cada pique.

Por lo tanto el costo total asociado a la compra del terreno e instalación de faena para cada pique es de:

Ítem	unidad	Valor
Terreno + Instalación de Faenas	UF	24.500

Tabla 9.3 Costo terreno e instalación de faena para cada pique

9.1.2 Construcción pique y galería de conexión

Como ya se ha mencionado en otros capítulos, las excavaciones del túnel interestación mediante el método NATM, necesitan de la construcción previa de piques y galerías de conexión que servirán de acceso al túnel y permitan iniciar los trabajos en los múltiples frentes. El costo de esta etapa depende del tamaño y profundidad del pique, así como de la longitud de la galería. Para esta ocasión se ha tomado el costo promedio de 5 piques construidos en la Línea 6 del Metro de Santiago.

Ítem	unidad	Valor
Pique	UF	12,500
Galería	UF	30,000
Total	UF	42,500

Tabla 9.4 Costo construcción de piques y galerías.

Por lo tanto el costo total para construir un pique de construcción, considerando la adquisición del terreno, la instalación de faenas y la construcción del pique y galería, alcanza el siguiente valor:

Ítem	unidad	Valor
Pique construcción	UF	67,000
Total	USD	2,5 millones

Tabla 9.5 Costo total Pique de construcción.

9.1.3 Construcción estaciones

Al igual que para el caso de los piques de construcción, las estaciones constituyen obras independientes al túnel de vías, y su costo depende principalmente del tamaño y método constructivo elegido. Para este trabajo se consideran distintos tipos de estaciones, estaciones típicas y pequeñas para gran parte de la Línea, estaciones de gran tamaño para el caso de las combinaciones y estaciones Cut and Cover para el caso de los terminales de la Línea.

Tipo Estación	Método Constructivo	Características
Típica	NATM	Pique circular, galería y túnel estación
Combinación	NATM	Pique rectangular, galerías y túnel estación
Terminal	Cut and Cover	Pique rectangular

Tabla 9.6 Tipos de estaciones

Según los antecedentes analizados de los presupuestos de obras de ciertos contratistas de las Líneas 3 y 6, el costo aproximado en la construcción de estas estaciones considerando la excavación y fortificación, adquisición de terreno e instalaciones de faena, es el siguiente:

Tipo Estación	Método Constructivo	Costo aproximado [USD]
Típica	NATM	8,0 millones
Combinación	NATM	15 – 20 millones
Terminal	Cut and Cover	5,5 millones

Tabla 9.7 Costo aproximado estaciones

9.1.4 Construcción túnel interestación

La construcción del túnel interestación supone un conjunto de actividades cíclicas de excavación y fortificación, donde los principales costos provienen de la excavación y del insumo de materiales como acero y hormigón, el arriendo de maquinaria y por supuesto del personal encargado de realizar estos trabajos, todos ellos están implícitos en los precios unitarios de las distintas partidas que componen la construcción del túnel.

9.1.4.1 Determinación precios unitarios

La Tabla 9.8 presenta un detalle de las partidas y cantidades consideradas en la construcción de un tramo de 507 m del túnel interestación de la Línea 6. En esta oportunidad no se mostrará el detalle de los precios unitarios por ser información confidencial de cada contratista, pero más adelante se entregarán los valores globales que servirán para el cálculo final.

Por supuesto, estos valores varían para los distintos contratistas, pero por lo general se distribuyen tal como muestra el Gráfico 9.1. Donde la mayor parte del presupuesto se lo lleva la colocación de hormigón para el sostenimiento y revestimiento del túnel.

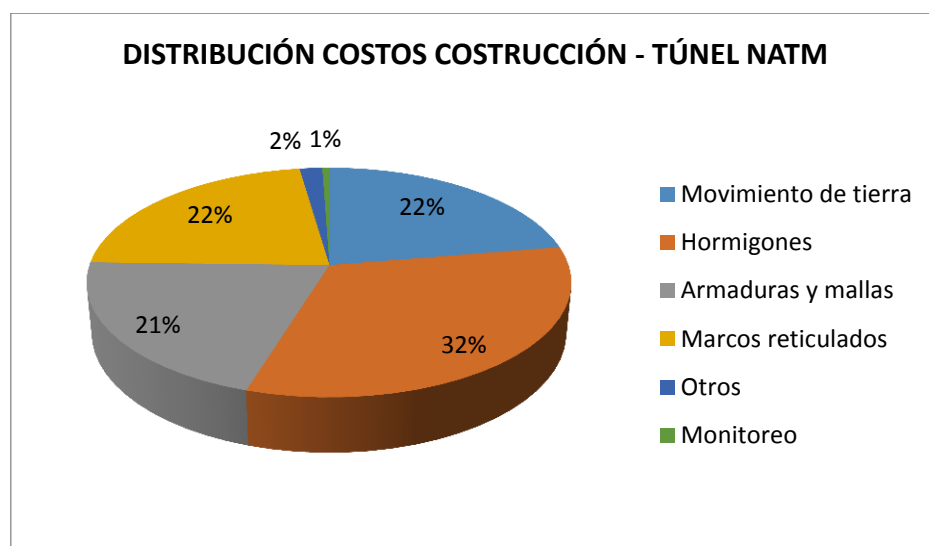


Gráfico 9.1 Distribución de costos en la construcción del túnel interestación con NATM.

DESIGNACION	UN	CANT.
Tramo 1 - Túnel en recta en gravas (L. Tramo = 507 m.)		
Movimiento de Tierras		
Excavación	m ³	29.935
Hormigones		
Sello de hormigón proyectado Grado H-35 e _{mín} =5 cm.	m ²	10.196
Hormigón ProyectadoGrado H-35 para revestimiento primario	m ³	1.558
Hormigón ProyectadoGrado H-35 para revestimiento secundario	m ³	1.395
Hormigón Proyectado Grado H-35 de sellado de frentes	m ³	59
Radier civil H-25	m ³	1.345
Armaduras y Mallas		
Acero A 63-42H	kg	10.490
Malla electrosoldada C-295 Acero AT 56-50H o equivalente	m ²	36.135
Puesta a Tierra	kg	620
Marcos Reticulados		
Marco Metálico tipo 95.28.22 (Cada 1,5 m.)	kg	151.547
Paralización		
Paralización mayor de 48 hrs. y menor de 5 días	un	3
Paralización mayor de 5 días. y menor de 21 días	un	3
Instalación de Puntos de Referencia		
Punto de Convergencia para medida topográfica	un	76
Punto de Convergencia para medida con cinta extensométrica	un	38
Dispositivos de control		
Hito nivelación superficial	un	3

Tabla 9.8 Partidas consideradas en la construcción del túnel interestación mediante método NATM.

A modo de ejemplo se muestra el análisis de precios unitarios para la excavación, una de las partidas más particulares en la construcción del túnel, que incluyen los costos de materiales, maquinarias, mano de obra y otros.

Nombre	Unidad	Cantidad	P. Unitario UF	Costo Unitario UF
MATERIALES				
Energía y consumos varios	un	0.03	0.949	0.028
Repuestos y consumibles	m ³	1.00	0.015	0.015
Subtotal				0.043
MANO DE OBRA				
Capataz	HH	0.040	0.881	0.035
Maestro Minero	HH	0.100	0.334	0.033
Ayudante Minero	HH	0.020	0.184	0.004
Operador Maquinaria	HH	0.020	0.277	0.006
Jornal Metro	HH	0.020	0.129	0.003
Mecánico	HH	0.020	0.334	0.007
Eléctrico	HH	0.020	0.334	0.007
Subtotal				0.094
MAQUINARIA Y EQUIPOS				
Excavadora	HM	0.025	1.937	0.048
Cargador Frontal	HM	0.025	1.722	0.043
Camión desescombro	HM	0.020	1.076	0.022
Maquinaria auxiliar	HM	0.020	0.542	0.011
Subtotal				0.124
SUBCONTRATOS				
Instalaciones Túnel	un	0.030	0.705	0.021
Varios	un	0.019	0.542	0.010
Transporte a botadero	m ³	1.600	0.148	0.237
Subtotal				0.268
Total Neto				0.529
Gastos Generales			24.28%	0.129
Utilidades			2.04%	0.013
Costo Unitario Neto UF/m ³				0.671

Tabla 9.9 Análisis de Precios Unitarios para partida de Excavación Subterránea.

Notar que para esta partida, prácticamente la mitad del costo se lo lleva el transporte al botadero.

9.1.4.2 Cálculo de costos para la construcción de túnel interestación

Una vez identificadas las partidas y sus precios unitarios, se ha analizado el listado de precios propuesto por distintos contratistas de la Línea 3 y 6 del Metro de Santiago. De la información disponible se han seleccionado varios tramos pequeños de longitudes entre 200 y 600 m, que se ajustan a las secciones con contrabóveda elegidas para este estudio, con los cuales se ha logrado determinar un costo promedio por unidad de largo, tal como se muestra en la Tabla 9.10 y la Tabla 9.11.

Para todos los cálculos siguientes se ha redondeado el valor del dólar y la UF al día 25 de febrero de 2016, considerando los siguientes:

- Valor dólar: \$700
- Valor UF: \$25.700

Detalle Línea 3

DESIGNACIÓN	UNID	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3	TRAMO 4	TRAMO 5
Largo Tramo	m	428	522	452	646	183
Movimiento de Tierras	UF	34.179	38.362	34.576	46.444	14.794
Hormigones		67.847	76.440	69.487	92.425	28.865
Enfierradura		4.566	5.127	4.456	5.567	2.133
Malla electrosoldada		15.169	18.133	16.004	22.035	6.210
Marcos Reticulados		14.080	16.719	14.270	20.118	5.902
Sellos		292	337	299	411	114
Costo Túnel Interestación	UF	136.134	155.118	139.092	187.000	58.017
Costo Túnel Interestación por metro lineal	UF/ml	318	297	308	289	317
	USD/ml	11.678	10.910	11.298	10.628	11.640
Costo promedio aproximado Túnel Inter	USD/ml	11.231				

Tabla 9.10 Costos distintos tramos Línea 3.

Detalle Línea 6

DESIGNACIÓN	UNID	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3	TRAMO 4
Largo tramo	m	593	348	273	309
Movimiento de Tierras	UF	31.037	20.371	14.601	18.433
Hormigones		68.737	43.042	32.206	38.800
Armaduras y Mallas		28.739	18.061	13.261	16.074
Marcos Reticulados		38.782	23.513	18.173	21.704
Dispositivos de control		42	100	68	27
Costo Túnel Interestación	UF	167.929	105.435	78.581	95.347
Costo Túnel Interestación por metro lineal	UF/ml	283	303	288	309
	USD/ml	10.404	11.113	10.587	11.345
Costo promedio aproximado Túnel Interestación	USD/ml	10.862			

Tabla 9.11 Costos distintos tramos Línea 6.

Analizados y comparados los datos, se advierte claramente una similitud para ambas líneas, con un **costo promedio aproximado de 11.000 USD/ml**. Costo propuesto por cada contratista sin considerar eventualidades y condiciones de obra que puedan aumentar esta cifra.

Finalmente para obtener un valor realista del costo, se ha consultado a profesionales involucrados en el análisis de costos de estos proyectos y coinciden en que el **valor final se aproxima a 15.000 USD/ml**. Este incremento se debe, entre otras cosas, al aumento en la cantidad de hormigón producto de las sobre excavaciones del terreno.

De esta manera, se tiene la siguiente estimación para el costo unitario del túnel interestación:

Ítem	unidad	Valor
Construcción Túnel interestación - NATM	USD/ml	15.000

Tabla 9.12 Costo lineal de construcción del túnel interestación mediante método NATM

9.2 Uso de Tuneladoras del tipo EPB

Para la estimación de los costos involucrados en la excavación del túnel interestación, mediante el uso de una maquina tuneladora del tipo EPB, se ha realizado un largo proceso de documentación, buscando información de los fabricantes de tuneladoras, contratistas especializados en obras subterráneas, antecedentes de proyectos realizados y por realizar. Pese a esto, la información disponible es muy escasa y poco detallada, sólo se cuenta con valores globales de la construcción de variadas líneas de Metro, que integran el total de las obras como estaciones, vías, talleres y material rodante. Por lo cual, calcular el costo en función de la longitud total del túnel resulta complejo, ya que cada obra se caracteriza por diferentes factores como la localización, nivel de instalaciones, geología, rendimientos esperados, instrumentación y control, número y complejidad de estaciones, etc.

En vista de la falta de información presente en documentos oficiales, se ha recurrido a memorias y tesis de universidades extranjeras, donde se han detallado valores de costos para los principales ítems involucrados en un proyecto de excavación mediante tuneladoras del tipo EPB.

Además se cuenta con un estudio de pre inversión a nivel de perfil del *Proyecto Construcción de la Línea 2 y Ramal Av. Faucett-Gambeta del Metro de Lima y Callao*, que cuenta con valiosa información para el desarrollo de esta evaluación económica y se puede obtener de la página web de ProInversión (Agencia de Promoción de la Inversión Privada – Perú)

9.2.1 Principales costos a considerar en la construcción de un túnel mediante máquinas tuneladoras

Los costos específicos de la construcción de un túnel dependerán de muchas variables, entre ellas la longitud, condiciones del terreno y logística, cada una de ellas debe ser estudiada al detalle para cada proyecto en particular.

Una buena estimación del costo de construcción de un túnel mediante tuneladora debe incluir como mínimo las siguientes categorías:

a) Dependientes del tiempo:

- Instalaciones de faena.
- Personal.
- Costos energéticos, Agua y luz.

b) Independientes del tiempo (materiales: función longitud y diámetro principalmente):

- Sostenimientos.
- Inyecciones de mortero.
- Tratamientos del terreno.
- Cables alta tensión y fibra óptica.
- Costo del botadero de escombros.
- Mantenimiento maquinaria (revisiones periódicas de motores, cambio piezas, circuitos hidráulicos, limpieza).
- Consumos maquinaria, herramientas de corte.

c) Fijos:

- Transporte y montaje maquinaria.
- Instalación de faena, instalación y retirada de oficinas, talleres, acopios, planta dovelas.

d) Maquinaria:

- Escudo EPB.
- Maquinaria auxiliar, Back up.

A continuación se indicará el costo de algunos de los ítems enumerados anteriormente, lo que servirá como referencia para tener una idea de la magnitud de los costos involucrados en la implementación de un proyecto con TBM. Los valores indicados a continuación se han recopilado de una tesis doctoral de origen sueco (Isaksson, 2002) y de una tesis española (Sáenz, 2007), ambas relacionadas con la estimación de los costos asociados al trabajo con máquinas tuneladoras.

9.2.2 Costos dependientes del tiempo

9.2.2.1 Personal

Se considera un trabajo continuo 7 días a la semana, con dos turnos diarios de 10 horas cada uno para todo el personal necesario, desde la dirección hasta los empleados a pie de obra pasando por los operadores de la tuneladora. Los costos asociados al personal quedan definidos por el siguiente valor:

Costo esperado: 400.000 USD/mes

9.2.2.2 Maquinaria general

El costo de la maquinaria general de la obra, como generadores, grúas, cargadores, camiones, etc. Se estiman en un costo aproximado de:

Costo esperado: 20.000 USD/mes

9.2.2.3 Maquinaria tuneladora

El costo del funcionamiento de la máquina tuneladora incluye principalmente mantenimiento, reparaciones y limpieza, se estima en:

Costo esperado: 30.000 USD/mes

9.2.3 Costos independientes del tiempo

9.2.3.1 Sostenimiento

Como se ha visto en capítulos anteriores, las dovelas de hormigón prefabricado corresponden al elemento principal del sostenimiento de las excavaciones realizadas con tuneladora y un buen suministro de ellas es clave para el éxito de la obra. En vista de estos antecedentes, nace la necesidad de implementar una fábrica propia dovelas, cercana a la obra. Los costos asociados a esta partida se agrupan de la siguiente forma:

- Costo del revestimiento (materiales, fabricación y transporte de dovelas)
 - 7.000 USD/ml de túnel

- Costo de la planta de dovelas
 - 4.000.000 USD

9.2.3.2 Tratamientos al terreno

Los costos de los tratamientos destinados a mejorar las condiciones de estabilidad y excavabilidad del terreno, presenta los siguientes valores por metro cúbico de excavación. Estos tratamientos tienen un costo elevado, por lo cual deben ser bien administrados.

Costo esperado: 300 USD/m³ de excavación

9.2.3.3 Instalaciones auxiliares

Conductos de ventilación y cables de alta tensión necesarios para la alimentación de la tuneladora, así como la fibra óptica empleada como medio de transmisión de las comunicaciones desde el frente, corresponden a los costos principales de esta partida y se valoran por cada metro lineal excavado con el siguiente valor:

Costo esperado: 300 USD/ml

9.2.3.4 Eliminación del material excavado

Esta partida está destinada a los costos correspondientes al transporte del material excavado desde el frente de trabajo al vertedero. El costo final se compone por el costo de la cinta transportadora, evidentemente en función de la longitud, el costo del uso de dicha cinta y finalmente el costo del transporte desde el lugar de acopio al vertedero incluido el costo asociado a su uso. El resultado se muestra a continuación:

Costo cinta transportadora: 170 USD/ml

Costo uso de cinta: 2,5 USD/m³ de excavación

Costo transporte a vertedero: 7 USD/m³ de excavación

9.2.3.5 Mantenimiento

El mantenimiento de la tuneladora, se concentra principalmente en la rueda de corte, con recambios de picas y discos cortadores, ascendiendo a un valor en función del volumen excavado, aproximado de:

Costo esperado: 20 USD/m³ de excavación

9.2.3.6 Inyección de mortero en el gap

Esta última partida de los Costos incluidos en la categoría de independientes del tiempo, se considera que el material a emplear para la inyección es un mortero convencional. Por lo tanto el costo aproximado queda definido por:

Costo esperado: 90 USD/m³ excavación

9.2.4 Costos fijos

9.2.4.1 Montaje maquinaria

Los costos de montaje de la tuneladora varían ampliamente dependiendo del país, los costos laborales, las normas laborales, tipo de máquina, el tamaño de la máquina, la ubicación de la zona de montaje (en la montaña, en la ciudad), el tipo de inicio (pique, portal, etc).

El costo de montaje para una pequeña tuneladora puede ser tan poco como USD 200.000 mientras que el costo de montaje para una máquina muy grande, en un pique, podría ser tan alta como USD 2.500.000. Este costo considera el personal especial de la empresa que construye la máquina, su transporte, alojamiento, herramientas, etc.

9.2.5 Costos de maquinaria

9.2.5.1 Tuneladora

El costo de una maquina tuneladora dependerá de varios factores, dentro de los más importantes está el tamaño (diámetro construido), tipo de tuneladora y características especiales solicitadas por el comprador. Así una TBM simple para roca tendrá un valor inferior que un escudo EPB de un diámetro importante.

Según información entregada por fabricantes, el costo de una máquina tuneladora del tipo EPB con un diámetro aproximado de 11 m, tiene con costo estimado en:

Costo esperado: 25.000.000 USD

9.2.5.2 Maquinaria auxiliar

De la partida correspondiente a la maquinaria auxiliar se presenta a continuación un listado de los elementos que lo componen. Su evaluación económica se basa, en datos de la maquinaria empleada para la ampliación del metro de Madrid.

- Back up	2.900.000 USD
- Locomotoras	2.500.000 USD
- Vagonetas	950.000 USD
- Pórtico	500.000 USD
- Silo Mortero	100.000 USD
- Ventilador	90.000 USD
- Bomba Inyectora	20.000 USD

El costo total aproximado de la maquinaria auxiliar dependerá del tipo de tuneladora con la que se trabaja, pero se estima en el siguiente valor

Costo esperado: 7.000.000 USD

9.2.6 Cálculo de costos para proyecto mediante el uso de tuneladora tipo EPB

Tal como se mencionó anteriormente, para calcular el costo por unidad de longitud de la construcción del túnel interestación mediante el uso de máquinas tuneladoras del tipo EPB, se considerarán datos extraídos del Estudio de Pre inversión a nivel de perfil del *Proyecto Construcción de la Línea 2 y Ramal Av. Faucett-Gambeta del Metro de Lima y Callao*. Este proyecto se encuentra actualmente en su primera etapa de construcción, que considera aproximadamente 10 km de Línea 2 construidos por el método NATM, mientras los dos escudos EPB y Slurry son montados para dar inicio a las siguientes etapas.

Los antecedentes principales de este proyecto son los siguientes:

- Longitud: 35 km.
- N° estaciones: 35
- Tipología estaciones: principalmente Cut and Cover.
- Geología: El suelo que predomina corresponde al típico suelo aluvial del cono de deyección del río Rímac, grava pobremente gradada con arena y cantos rodados (GP)
- Método constructivo de túneles: Escudos EPB y Slurry, pequeño tramo NATM.
- Presupuesto total: USD 5.400 millones.

Por la cercanía y las características geológicas, este proyecto de la ciudad de Lima servirá como base de datos para la determinación del costo esperado al aplicar el mismo método de construcción en Chile, ya que el costo de construcción y traslado de una tuneladora, ya sea desde EEUU, Europa o Asia, debiera ser muy similar. Por otro lado, al tratarse de licitaciones internacionales, los contratistas que participan en ellas son prácticamente los mismos en toda la región.

La ventaja que otorga este estudio frente a otros realizados en distintos proyectos de Metro, es que el costo total se entrega en forma disgregada, así es posible conocer qué porcentaje del total corresponde a la construcción del túnel interestación, dato importante para este trabajo. La Tabla 9.13 muestra cómo se compone el presupuesto total del proyecto.

ITEM	UNIDAD	VALOR
A. Infraestructura	Miles USD	2.936.103
B. Imprevistos	Miles USD	293.610
C. Gastos Accesorios a la Realización de la Infraestructura	Miles USD	234.888
D. Materia Rodante	Miles USD	871.500
E. Expropiaciones	Miles USD	217.500
Base Imponible Total (A+B+C+D+E)	Miles USD	4.553.602
IGV (Impuesto)	Miles USD	819.648
INVERSION TOTAL	Miles USD	5.373.250

Tabla 9.13 Desglose costo total, Proyecto Metro de Lima.

El ítem infraestructura incluye la construcción de todos los elementos que forman la nueva línea, como estaciones, pozos y túneles. La Tabla 9.14 muestra el detalle de las distintas partidas que integran la infraestructura para el proyecto del Metro de Lima, de aquí se desprende el monto disponible para la construcción del túnel interestación, información clave para poder determinar el costo unitario del túnel.

ITEM	Unidad	Valor
Túnel entre estaciones	Miles USD	588.270
Estaciones	Miles USD	1.124.000
Pozos y otros especiales	Miles USD	296.000
Equip. Ferroviarios y No Ferroviarios	Miles USD	702.320
Otros conceptos	Miles USD	216.272
Manejo ambiental	Miles USD	9.241
Infraestructura	Miles USD	2.936.103

Tabla 9.14 Costo partidas de infraestructura, Metro de Lima.

Tal como se aprecia en la Tabla 9.14, un monto cercano a los 600 millones de dólares es el destinado para la construcción del túnel completo, 35 kilómetros que se excavarán con tuneladoras y método NATM.

Para determinar el costo de cada metro del túnel construido con tuneladora, se desarrolla el siguiente análisis.

Costo total túnel

$$C_{túnel} = 588.270.000 \text{ USD}$$

$$C_{túnel} = C_{NATM} + C_{TBM}$$

El túnel será construido mediante 2 métodos constructivos, NATM y tuneladora, así la longitud total será la suma de lo construido con cada método, tal como se indica en la Tabla 9.15.

$$L = L_{NATM} + L_{EPB}$$

Método	Longitud [m]
NATM	9.000
Tuneladoras	26.000
TOTAL	35.000

Tabla 9.15 Longitud de los túneles construidos con cada método constructivo.

Con la intención de asignar un valor al costo de la construcción del túnel interestación mediante el método NATM en el proyecto del Metro de Lima, se supondrá el mismo costo para la construcción del Metro de Santiago, determinado en el punto 9.1.4.2. Este supuesto considera que este tipo de obras son realizadas por constructoras internacionales que no debieran variar mucho sus costos dentro de la región.

De esta forma, se tiene que:

$$C_{NATM}^{Perú} = 15.000 \text{ USD}/m$$

Multiplicando por la longitud del túnel construida con este método, se tiene el costo de dichas obras.

$$C_{NATM} = L_{NATM} \times C_{NATM}^{Perú} = 135.000.000 \text{ USD}$$

Por lo tanto, el costo del tramo construido mediante tuneladoras queda determinado por la siguiente expresión.

$$C_{EPB} = C_{túnel} - C_{NATM} = 453.270.000 \text{ USD}$$

Finalmente el costo unitario de este método constructivo es el siguiente.

$$c_{EPB} = \frac{C_{EPB}}{L_{EPB}} \approx 17.430 \text{ USD}/m$$

Redondeando las cifras, la construcción del túnel interestación mediante máquinas tuneladoras, tendría un costo aproximado de:

Ítem	unidad	Valor
Construcción túnel interestación - Tuneladora	USD/ml	18.000

Tabla 9.16 Costo lineal de construcción del túnel interestación mediante tuneladoras.

9.3 Comparación de costos del túnel interestación para ambos métodos

Luego de analizar los costos para cada método constructivo, con datos reales y detallados para el método NATM y en forma estimativa para el caso del uso de tuneladoras, se ha llegado a la estimación de los siguientes costos aproximados por unidad de longitud de túnel interestación.

$$C_{NATM} \approx 15.000 \text{ USD}/m$$

$$C_{EPB} \approx 18.000 \text{ USD}/m$$

El resultado muestra que la construcción de los túneles interestación mediante el uso de máquinas tuneladoras, tiene un costo que supera en un 20% al método NATM. Esta diferencia puede justificarse por la gran inversión que requiere la implementación de este método, partiendo por la compra de la tuneladora, la maquinaria auxiliar, la fábrica de dovelas y las instalaciones de faena, hasta llegar a la propia operación del escudo, que requiere de personal especializado de mucha experiencia, además de los insumos y herramientas que se cambian constantemente.

Si bien el uso de tuneladoras resultó ser un método mucho más costoso que el método NATM, hay un conjunto de factores no evaluados que quedan fuera de este análisis, tan importante como la seguridad de la obra y los trabajadores, ya que el uso de estas máquinas disminuye prácticamente a cero los riesgos de accidentes e inestabilidades del terreno.

9.4 Ejemplo comparativo para una línea típica del Metro de Santiago

Para poder comparar el costo total de la utilización de cada método constructivo, ya sea NATM o el uso de tuneladoras, se debe determinar el costo total de una línea típica del Metro de Santiago, considerando todos los elementos que la componen, como piques, galerías, túneles y estaciones.

La Tabla 9.17 muestra un resumen de los costos determinados en el capítulo anterior para cada elemento de una línea del Metro de Santiago.

Elemento	Método constructivo	Símbolo	Unidad	Valor
Túnel Interestación	NATM	c_L^{NATM}	USD/m	15.000
Túnel Interestación	EPB	c_L^{TBM}	USD/m	18.000
Estación subterránea	NATM	c_{est}^{NATM}	USD	8.000.000
Estación rectangular	C&C	$c_{est}^{C\&C}$	USD	5.500.000
Pique de construcción	NATM	c_{pique}	USD	2.500.000

Tabla 9.17 Resumen costos para elementos de una línea del Metro de Santiago

Para este análisis se considerarán tramos con distintos números de estaciones, siguiendo las mismas consideraciones del capítulo 8 para la evaluación de los plazos de ejecución. Estas consideraciones son las siguientes:

- i. La distancia entre estaciones es de 1000 m.
- ii. Las estaciones de inicio y final del trazado serán del tipo *cut and cover*.
- iii. Preferentemente las estaciones intermedias serán subterráneas, construidas en NATM.
- iv. En cada extremo se construye un tramo de 250 m de túnel para las maniobras de los trenes, este tramo es construido mediante método NATM.

De esta forma se tiene un trazado con las características ilustradas en la Figura 9.1, para un número N de estaciones.

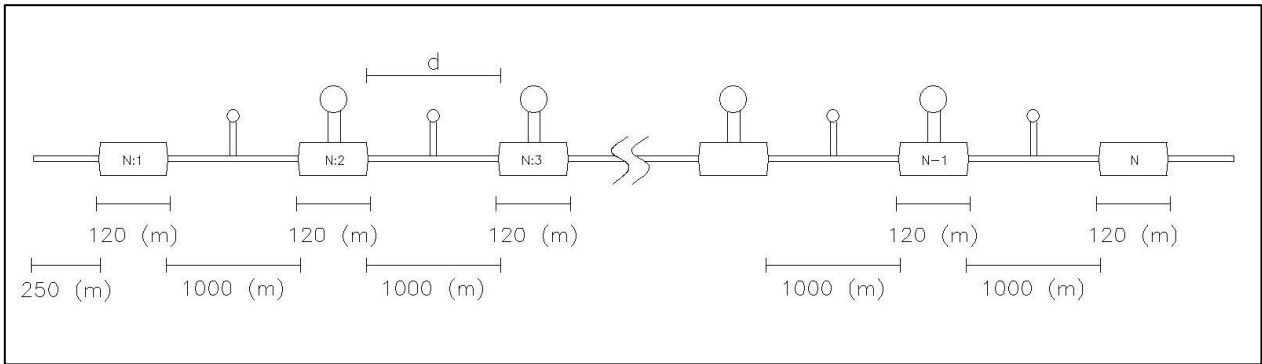


Figura 9.1 Línea típica Metro de Santiago

9.4.1 Construcción mediante NATM

En caso de construcción mediante el método NATM se debe considerar el costo de la construcción de los piques intermedios que permiten un inicio anticipado de las excavaciones en el túnel interestación.

El costo total en función del número estaciones queda definido por la siguiente expresión.

$$C_{NATM} = (2 \cdot 250 + d \cdot (n - 1)) \cdot c_L^{NATM} + 2 \cdot c_{est}^{C\&C} + (n - 2) \cdot c_{est}^{NATM} + (n - 1) \cdot c_{pique}$$

9.4.2 Construcción mediante el uso de una máquina tuneladora

A diferencia del método NATM, para este caso no es necesario la construcción de piques intermedios, por lo cual este costo no debe ser considerado. Por consiguiente el costo total en función del número de estaciones queda definido por:

$$C_{TBM} = 2 \cdot 250 \cdot c_L^{NATM} + (n - 1) \cdot d \cdot c_L^{TBM} + 2 \cdot c_{est}^{C\&C} + (n - 2) \cdot c_{est}^{NATM}$$

Para este análisis se considerará que el costo del túnel interestación varía del valor determinado en el punto 9.2.6 (18.000 USD/m), y esta variación es lineal en función de la longitud excavada y depende principalmente de la amortización del costo de la máquina en la longitud del túnel a excavar. Se utilizará la siguiente relación:

$$c_L^{TBM} = 21000 - 0,27 \cdot L \quad (\text{USD/m})$$

9.4.3 Comparación de costos NATM vs TBM

Al graficar las expresiones del costo para ambos métodos constructivos en función del número de estaciones se obtiene el Gráfico 9.2, del cual es importante rescatar que a partir de un cierto número de estaciones (12 para este ejemplo), el costo total de la excavación mediante el uso de una máquina tuneladora es inferior al costo de la excavación mediante el método NATM. Esto se debe a dos razones, por un lado la suma acumulada del costo de la construcción de los piques intermedios, que aumenta por cada tramo que se agregue al trazado y por otro lado a la disminución del costo unitario de la excavación del túnel con tuneladora para longitudes importantes.

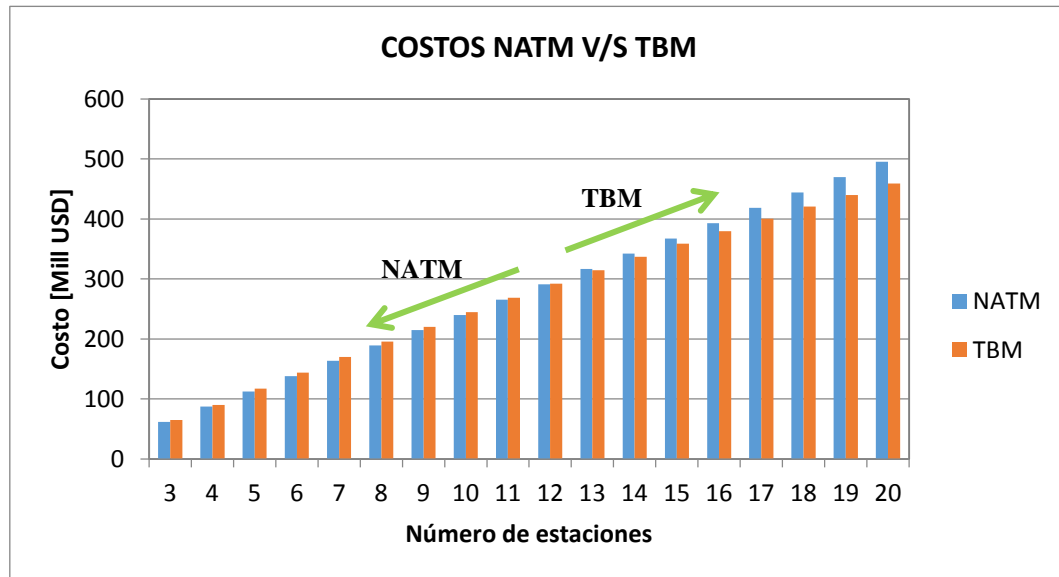


Gráfico 9.2 Comparación costos NATM vs TBM

10 CONCLUSIONES

Existe una variada gama de máquinas tuneladoras en el mercado con distintos tipos y tamaños, cada una diseñada para enfrentar las diferentes condiciones que les proponga el terreno a excavar, por un lado se encuentran los Topos o TBM que enfrentan la excavación en rocas duras, y por otro los Escudos encargados de abrir túneles en rocas blandas y suelos. El éxito de un proyecto de túneles excavados con este tipo de máquinas, depende, en gran parte, de una correcta elección del tipo de tuneladora a utilizar. Si la elección es correcta, es muy probable que no se tengan mayores inconvenientes y se alcancen los rendimientos esperados, pero si la elección es errónea, bajos rendimientos, desgaste excesivo en la herramientas de corte y averías importantes, pueden provocar que los plazos y costos del proyecto se incrementen excesivamente. Por esta razón, es muy importante analizar cuidadosamente esta elección, asesorándose por profesionales expertos que estudien cada uno de los criterios de selección, principalmente las características del terreno a excavar y la logística necesaria para poner en marcha esta maquinaria.

Una de las máquinas tuneladoras más versátiles del mercado es el Escudo de Equilibrio de Presión de Tierras o EPB, diseñada inicialmente para excavar suelos cohesivos, ha ido ganando espacio dentro de los suelos con poca o nula cohesión, gracias a la incorporación de nuevas técnicas de acondicionamiento del suelo que adaptan sus propiedades para lograr estabilizar el frente de trabajo y realizar un óptimo transporte del escombro. Así, este tipo de tuneladora se perfila como la más adecuada para excavar los suelos de Santiago, que se componen principalmente de gravas arenosas con finos arcillosos y suelos finos constituidos por limos y arcillas. El sistema de presión de tierras en el frente de trabajo que posee esta tuneladora garantiza un mínimo nivel de asentamientos en superficie, lo cual es clave en un proyecto como el Metro de Santiago, que discurre en un entorno urbano.

La implementación de este nuevo método constructivo para la construcción del Metro de Santiago supone un cambio importante en la forma de construir, debiendo sustituir al probado y mejorado método NATM, que ha evolucionado en su implementación desde su primera experiencia en el año 1995, logrando un gran desarrollo y desempeño que se refleja en la actual construcción de 2 líneas en simultáneo construidas completamente con este método. El uso de máquinas tuneladoras en un proyecto de este tipo, significaría gran avance para toda la industria, desde la ingeniería y construcción, hasta los proveedores de insumos y servicios.

En cuanto al tiempo de ejecución de un proyecto típico del Metro de Santiago, se ha visto en este trabajo que una de las grandes ventajas que tiene el método NATM, es la posibilidad de implementar múltiples frentes de trabajo, gracias a la disponibilidad de terrenos que permiten construir piques que dan acceso al túnel interestación. De esta manera, sumando el aporte de cada frente en NATM, se logra un rendimiento total que supera ampliamente el desempeño de una o dos máquinas tuneladoras, haciendo poco atractiva la elección de este nuevo método.

En la búsqueda de las condiciones del proyecto que hagan competitivo el uso de tuneladoras para la construcción del túnel interestación, se han considerado distintos casos factibles para un proyecto de este tipo. Se han evaluado diferentes configuraciones de trazados, con diferente número de estaciones y distancia entre ellas, además del rendimiento de la tuneladora dentro de un rango prudente. Los resultados de este análisis muestran que el uso de tuneladoras logra ventajas significativas a medida que se establecen algunas restricciones sobre el método NATM.

El primer cambio a las condiciones típicas de la construcción del Metro de Santiago, es el aumento de la distancia entre las estaciones, obteniendo como resultado viable la construcción de un tramo con 4 estaciones separadas 2150 m entre sí, caso probable para una línea expresa con pocas estaciones.

Un segundo caso favorable se logra cuando no existe la posibilidad de ejecutar piques de construcción, lo que obliga a iniciar la excavación del túnel interestación mucho más tarde y desde el interior de las estaciones mientras se encuentran en una etapa intermedia de su construcción. Haciendo factible la construcción de un tramo de 6 estaciones con una sola máquina con un rendimiento de 18 m/día, tal como se indica en el Gráfico 8.6.

Las restricciones impuestas al método NATM para las cuales el uso de tuneladoras toma la ventaja en términos del tiempo de ejecución, obedecen a condiciones reales experimentadas en ciudades altamente edificadas. Urbes como Madrid, Londres o Nueva York no disponen en el centro de la ciudad de lugares libres para construir piques, además el tráfico también limita el libre tránsito de camiones para un retiro eficiente del material excavado. Por estas razones logísticas y otras más técnicas, es que el uso de tuneladoras abunda al momento de construir nuevas líneas del tren subterráneo. Santiago no está muy lejos de alcanzar condiciones similares, a lo menos, en las comunas centrales la ciudad, así que pensar en el uso de una de estas máquinas, podría ser parte de un horizonte cercano.

Con la intención de establecer el costo de la construcción del túnel interestación mediante el uso de tuneladoras, se realizó una búsqueda de información relativa a obras ya ejecutadas, que finalizó con exiguos resultados, ya que la escasa información disponible involucra el costo total de la obra, incluyendo la construcción de las estaciones, vías y material rodante, ítems que pueden significar costos muy diferentes para cada proyecto, por esta razón, no fue posible asignar un porcentaje del costo total de la obra a la construcción del túnel interestación. Sin embargo, se logró estudiar un informe público de pre inversión del proyecto de construcción de una nueva línea de Metro en la ciudad de Lima, que cuenta con la información de costos disgregada y asigna un monto del presupuesto a la construcción del túnel. Así se logró establecer un costo unitario para la construcción de un túnel con las características necesarias para una Línea de Metro, con un valor aproximado de 18.000 USD/m. Por otro lado y siguiendo con el análisis de costos, se analizó información directa de la construcción de las Líneas 3 y 6 del Metro de Santiago, información que permitió determinar un costo para la construcción del túnel interestación mediante el método NATM, valor que se aproxima a los 15.000 USD/m, menor que el costo asociado al uso de las máquinas tuneladoras. Ambos costos determinados como precios pagados por el mandante, sin IVA.

Dentro de las razones por las cuales el uso de tuneladoras supera aproximadamente en un 20% el costo del método NATM, se pueden mencionar las siguientes:

- La gran inversión inicial que se requiere para la compra de la tuneladora y toda la maquinaria de soporte que necesita, además de las instalaciones de faena y la fábrica de dovelas.
- La operación, ya que para asegurar altos rendimientos, se requiere de personal altamente especializado, de herramientas de corte en buen estado y de un buen acondicionamiento del suelo excavado.
- Del mismo modo, el revestimiento rígido formado por el anillo de dovelas resulta considerablemente más caro que el revestimiento flexible utilizado por el método NATM.

Una vez determinado el costo del túnel interestación para ambos métodos constructivos se realizó una comparación de tiempo y costo, considerando la construcción de una línea típica del Metro de Santiago, obteniendo los resultados del Gráfico 10.1, donde se parecía que existe una cierta longitud y número de estaciones a partir del cual el uso de una tuneladora representa un menor costo para la excavación y sostenimiento del proyecto. Así mismo existe otra longitud en que ambos métodos se igualan en términos de tiempo de ejecución y a partir de la cual el uso de tuneladora sobrepasa al tiempo del método NATM, con una diferencia que crece a medida que aumenta la longitud del trazado.

Lamentablemente para las pretensiones de este trabajo, no existe un caso en que el uso de la máquina tuneladora supere en términos de tiempo y costo al método NATM bajo las condiciones de la línea típica del Metro de Santiago, por lo cual para un eventual proyecto se deberá ponderar la importancia de ambos aspectos para poder tomar una decisión.

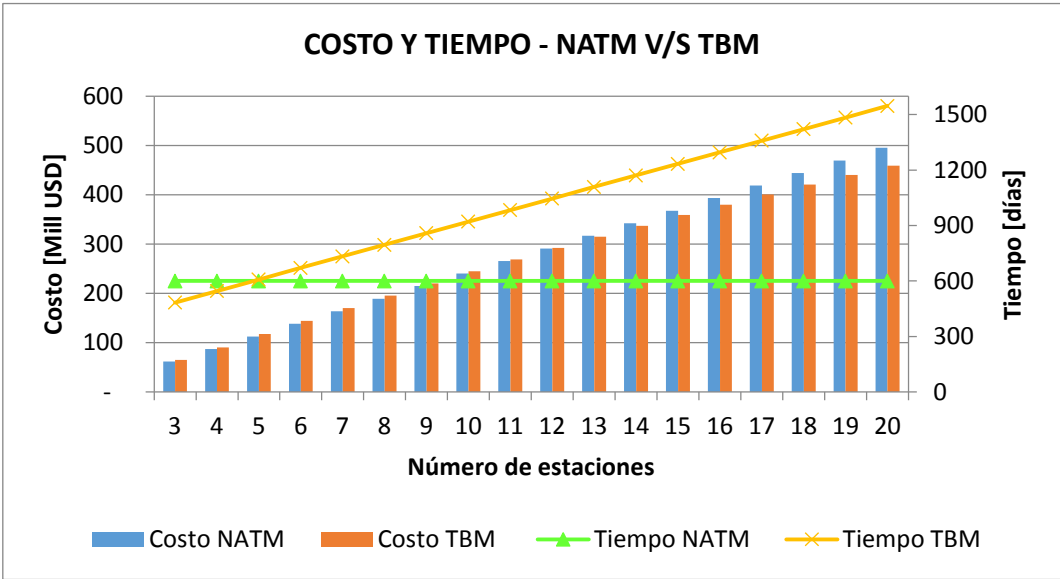


Gráfico 10.1 Comparación de tiempo y costo para una línea típica del Metro de Santiago

Luego de analizar dos de los aspectos más importantes para un proyecto, como lo son el costo y tiempo, se aprecian ciertas ventajas del método NATM sobre el uso de tuneladoras bajo las condiciones locales, que obligan a evaluar otras variables para implementar este nuevo método en los próximos proyectos del Metro de Santiago. Una de las posibilidades más atractivas fuera de las condiciones típicas y que ha tomado relevancia, es la idea de construir una línea paralela, debajo del trazado existente de la Línea 1, que cuente sólo con las estaciones principales, como Pajaritos, Est. Central, Los Héroes, U de Chile, Baquedano, P. de Valdivia y Tobalaba. La profundidad, la cercanía a la línea existente, la distancia entre estaciones y el paso por zonas altamente edificadas, se acercan a las condiciones propicias para que la tuneladora aventaje al método tradicional, por lo menos en términos del tiempo de ejecución.

Por último, cabe preguntarse los motivos que llevaron a implementar el uso de tuneladoras en tantos proyectos de países cercanos y que ha motivado a este trabajo. Factores incluso más importantes que el tiempo y el dinero, tales como la seguridad y el desarrollo tecnológico pueden tal vez responder a esta pregunta.

11 BIBLIOGRAFÍA

- Amberg, F. 2015. Selection of TBMs – Case Histories. Workshop Internacional: TBM – Excavación mecanizada de túneles. Santiago, Chile. Comité de Túneles y Espacios Subterráneos (CTES-CHILE). 115 diap.
- Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain (AFTES). 2000. New Recommendations on Choosing Mechanized Tunneling Techniques. Francia. 32 pp.
- Audureau, J. 2015. Tunnel & Site Logistics. Workshop Internacional: TBM – Excavación mecanizada de túneles. Santiago, Chile. Comité de Túneles y Espacios Subterráneos (CTES-CHILE). 40 diap.
- Babendererde S., Hoek E., et al. 2005. EPB-TBM Face Support Control in the Metro do Porto Project, Portugal. Proceedings of the RETC 2005. Seattle.
- Babendererde, L. 2015. Advantages or Disadvantages of Mechanized Tunnelling. Workshop Internacional: TBM – Excavación mecanizada de túneles. Santiago, Chile. Comité de Túneles y Espacios Subterráneos (CTES-CHILE). 50 diap.
- FCC Construcción. 2007. Informe Técnico 116: Tuneladora Tizona – Circunvalación Sur M-30 Madrid. España. 101 pp.
- Fernández R. 2011. Innovaciones tecnológicas en la construcción con tuneladoras. Revista de Obras Públicas, N°3525, 2011. España. pp 45-66.
- Fowler, M., et al (ed). 2012. North American Tunneling 2012: Proceedings of the North American Tunneling Conference 2012. Indianapolis, Indiana, USA: Society of Mining, Metallurgy & Exploration. 869 pp.
- Giraldo, E. 2010. Las máquinas tuneladoras tipo “TBM” como alternativa al sistema de perforación y voladura para la excavación de túneles caso: Desarrollo de túneles en Yuncan. Master Thesis. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú. 256 pp.
- Godos, C. 2013. Concesión de la Línea 2 y Ramal Av. Faucett – Av. Gambetta de la Red Básica del Metro de Lima y Callao. [diapositivas]. Perú, Agencia de Promoción de la Inversión Privada. 35 diap.
- Gomes, A. 2015. Situation of Mechanized Tunneling in Chile. Workshop Internacional: TBM – Excavación mecanizada de túneles. Santiago, Chile. Comité de Túneles y Espacios Subterráneos (CTES-CHILE). 33 diap.
- González del Tánago J. 2013. Ingeniería de detalle de la obra civil de la Línea 6 del Metro de Santiago (Chile). 2º Conferencia Internacional Túneles y Construcciones Subterráneas. Lima, Perú. 41 diap.

- Grasso, P. 2015. Risk & Safety Management in Tunnelling. Workshop Internacional: TBM – Excavación mecanizada de túneles. Santiago, Chile. Comité de Túneles y Espacios Subterráneos (CTES-CHILE). 133 diap.
- Guglielmetti, V (ed). 2008. Mechanized Tunnelling in Urban Areas: Desing Mehtodology and Construction Control. Londres, UK: Taylor & Francis Group. 528 pp.
- Herrenknecht. 2015. Example 2: Soft ground tunnelling for subway. Workshop Internacional: TBM – Excavación mecanizada de túneles. Santiago, Chile. Comité de Túneles y Espacios Subterráneos (CTES-CHILE). 60 diap.
- Höfer-Öllinger, G. 2015. Ground Investigations for TBM Projects. Workshop Internacional: TBM – Excavación mecanizada de túneles. Santiago, Chile. Comité de Túneles y Espacios Subterráneos (CTES-CHILE). 53 diap.
- Lawrence, R., et al (ed). 2010. North American Tunneling 2010: Proceedings of the North American Tunneling Conference 2010. Portland, Oregon, USA: Society of Mining, Metallurgy & Exploration. 994 pp.
- Leyton, F., Sepúlveda, S., et al. 2011. Seismic zonation of the Santiago Basin, Chile. 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Santiago, Chile.
- López Jimeno, C (ed). 1997. Manual de Túneles y Obras Subterráneas. Madrid, España: Entorno Gráfico. 1082 pp.
- Melis M. 2005. Las tuneladoras de 3 carriles de la M-30. Revista de Obras Públicas, N°3454, 2005. España. pp 71-106.
- Metzeger C., Colzani G., et al. 2009. Selection, design and procurement of North America's Largest Mixshield TBM for Portland, Oregon's East Side CSO Tunnel. Proceedings of the RETC 2009. Las Vegas.
- MINTRA Comunidad de Madrid. 2007. La Ejecución de Túneles con Tuneladora en el Plan de Ampliación de la Red del Metro de Madrid 2003-2007. Madrid. 21 pp.
- Ozdemir, L (ed). 2004. North American Tunneling 2004: Proceedings of the North American Tunneling Conference 2004. Atlanta, Georgia, USA: A.A. Balkema Publishers. 581 pp.
- Peila, D. 2015. Ground improvements in mechanized tunnelling. Workshop Internacional: TBM – Excavación mecanizada de túneles. Santiago, Chile. Comité de Túneles y Espacios Subterráneos (CTES-CHILE). 64 diap.
- Peila, D. 2015. Soil Conditioning & Slurry Operation. Workshop Internacional: TBM – Excavación mecanizada de túneles. Santiago, Chile. Comité de Túneles y Espacios Subterráneos (CTES-CHILE). 90 diap.
- Perri, G. 2008. Construcción mecanizada de túneles urbanos mediante TBM. Presentado en III Seminario Andino de Túneles, Bogotá, Colombia: Asociación Colombiana de Túneles y Obras Subterráneas (ACTOS). 82 diap.

- Requena, M. 2011. Análisis del rendimiento y parámetros de una tuneladora. Master Thesis. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, España. 106 pp.
- Robbins. 2015. Management & Examples of Difficult Hard Ground Projects. Workshop Internacional: TBM – Excavación mecanizada de túneles. Santiago, Chile. Comité de Túneles y Espacios Subterráneos (CTES-CHILE). 63 diap.
- Rocha H. 2013. Métodos constructivos de túneis metroviários: a experiência do Metro de São Paulo. Seminário Metrô em Curitiba – Contribuições da Engenharia. Brasil. Comité Brasileiro de Tunes. 91 diap.
- Sáenz, I. 2007. Estimación de coste y plazo de ejecución en proyectos de túneles mecanizados. Minor Thesis. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, España. 90 pp.
- SECTRA. 2013, Plan Maestro de Transporte 2025 Santiago. Santiago. 236 pp.
- Tobergte, D. R., & Curtis, S. 2009. Operación y mantenimiento de escudos: PRESENTE Y FUTURO. Journal of Chemical Information and Modeling. Barcelona, España. 73 pp.
- Universidad de Chile. 2003. Incidencia Sísmica en Obras Civiles y Habitacionales de la Cuenca y Zona Cordillerana de Santiago. Proyecto FONDEF D03I1066, 2003. Santiago, Chile.
- Vicario D. 2004. Obras de construcción de la Línea 9 del Metro de Barcelona. Tramo 4B. Sagrega – Gorg. Revista de Obras Públicas, N°3447, 2004. España. pp 25-31.

M