

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**“Estudio de prefactibilidad para la construcción del túnel de metro de lima-callao
línea 2, mediante máquinas tuneladoras”**

Tesis para optar el Título de **Ingeniera Civil**, que presenta la bachillera:

Cristy Reátegui Quezada

ASESOR: Iván Enrique Bragagnini Rodriguez

Lima, febrero 2020

RESUMEN

En los últimos años, nuestro país ha desarrollado importantes proyectos de infraestructura, los cuales le han permitido abrirse paso a la modernidad. En la ciudad de Lima se está desarrollando uno de estos proyectos, que es la Línea 2 del Metro de Lima, un metro subterráneo de gran capacidad que conectará a los distritos de Ate con el Callao y reducirá significativamente el tiempo de viaje entre ambos puntos: de dos horas y media a 45 minutos.

Este análisis tiene como objetivo conocer qué tan factible es la construcción de los túneles de Metro mediante el uso de máquinas tuneladoras.

Para conocer los distintos tipos de tuneladoras existentes, se hizo un estudio con el fin de establecer los criterios de selección de la máquina más adecuada para la excavación de los túneles en los suelos de Lima. Este análisis principalmente se inicia con un estudio geológico, donde se define la tipología de la máquina; mientras que las características del proyecto definen especificaciones particulares, como el tamaño de la máquina y el uso de una maquinaria auxiliar. Con ello, se ha definido que las máquinas tuneladoras con mayores ventajas para el tipo de suelo limeño son una TBM (Tunnel Boring Machine) y una EPB (Escudo de Balance de Presión de Tierras) como maquinaria auxiliar. Estas máquinas se usarán en distintos tipos de etapas, de acuerdo al estudio geológico que exige características particulares.

Estas etapas que presenta el nuevo sistema de transporte son: 1-A, 1-B y 2. La etapa 1-A, tiene 5 Km y consta de 5 estaciones y la excavación de los túneles se hará por el método convencional, es decir con maquinaria pesada como retroexcavadoras y pantalladoras.

Para la etapa 1-B, se usarán 2 tipos de tuneladoras: EPB y TBM, La tuneladora EPB (Earth Pressure Balance) se usa normalmente en la excavación de terrenos difíciles; la tuneladora TBM (Tunnel Boring Machine) excava túneles a sección completa y a la vez colabora en la colocación de una entibación para la sustentación del túnel si esta es necesaria, ya sea en forma provisional o definitiva.

Asimismo, se analizará la estimación de un rendimiento promedio de avance que se aproxima a los 18m/día, en comparación al rendimiento de avance de un frente en NATM que alcanza un promedio estimado en 2m/día. El Nuevo Método Austriaco de construcción de túneles con la sigla en inglés NATM, es un método que permite trabajar en varios frentes, mientras que una tuneladora lo hace en un solo frente.

En este proyecto de investigación se han establecido las diferencias entre el actual método NATM y el uso de una máquina tuneladora.

Finalmente, se ha elaborado un análisis comparativo de ambos métodos constructivos, concluyendo que bajo las condiciones típicas de suelos y formas del Metro de Lima 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 la tuneladora es menor, pero con un aumento considerable en el plazo.

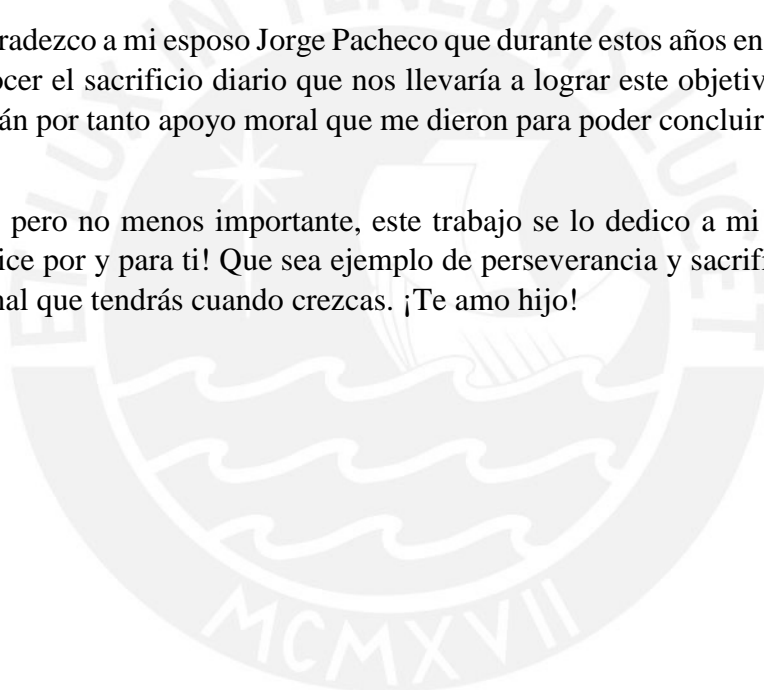
DEDICATORIA

En primer lugar, quisiera agradecer a Dios por permitir que pueda terminar mi carrera a pesar de todos los inconvenientes que se presentaron durante el camino. Gracias a Él se pudo lograr todo esto.

En segundo lugar, agradezco de corazón a mis padres por tanto apoyo durante tantos años, no solo en mi etapa universitaria sino también durante toda mi vida. Sin ellos nada de esto se hubiese podido dar. A mis hermanos: Evelyn, Aldo y Qinston que me cuidaron y me enseñaron a su manera lo que significa la responsabilidad y el sacrificio.

Asimismo, agradezco a mi esposo Jorge Pacheco que durante estos años en la universidad, pudimos conocer el sacrificio diario que nos llevaría a lograr este objetivo. A la familia Pacheco Román por tanto apoyo moral que me dieron para poder concluir este trabajo de investigación.

Y por último, pero no menos importante, este trabajo se lo dedico a mi hijito Joaquín, todo esto lo hice por y para ti! Que sea ejemplo de perseverancia y sacrificio para ti y la vida profesional que tendrás cuando crezcas. ¡Te amo hijo!



ÍNDICE

	Pág.
Índice de Tablas -----	iv
Índice de figuras -----	v
Preámbulo -----	1
CAPÍTULO 1: SITUACIÓN A INVESTIGAR	
1.1 Justificación -----	2
1.2 Objetivos -----	2
1.3 Metro de Lima- Antecedentes -----	3
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE	
2.1 Generalidades -----	4
2.2 Métodos Constructivos para Túneles en suelos -----	5
2.2.1 Cut and Cover. -----	6
2.2.2 Excavación subterránea. -----	7
2.3 Maquinas Tuneladoras -----	12
2.3.1 Máquinas topes (TBM) -----	12
2.3.2 Tuneladora doble escudo. -----	13
2.3.3 Escudo. -----	14
2.3.4 Escudos mixtos. -----	17
CAPÍTULO 3: CONSTRUCCIÓN DE UNA LÍNEA DE METRO	
3.1 Descripción General. -----	19
3.2 Construcción de una línea de Metro con el método NATM. -----	20
3.3 Construcción de una línea de Metro mediante el uso de un escudo EPB y una tuneladora TBM. -----	24
3.4 Comparación ambos métodos. -----	27

CAPÍTULO 4: LÍNEA 2 DEL TREN ELÉCTRICO-LIMA

4.1 Experiencia de Tuneladoras en el mundo -----	29
4.1.1 Experiencia en Europa. -----	29
4.1.2 Experiencia en Latinoamérica. -----	31
4.1.3 Experiencia en Perú. -----	32
4.2 Selección de Tuneladora para los suelos de Lima -----	34
4.2.1 Información requerida para las especificaciones de la tuneladora. -----	34
4.2.2 Geología de Lima. -----	56
4.2.3 Máquina tuneladora adecuada para los suelos de Lima. -----	58
4.3 Escudo de Balance de Presión de Tierras – EPB -----	60
4.3.1 Principios de su diseño y funcionamiento. -----	60
4.3.2 Partes del EPB. -----	61
4.3.3 Funcionamiento. -----	63
4.3.4 Rendimiento. -----	65
4.4 Evaluación Económica del proyecto -----	69
4.4.1 Análisis económico del método NATM -----	69
4.4.2 Uso de tuneladoras del tipo EPB. -----	76
4.4.3 Comparación de costos del túnel interestación para ambos métodos. -----	83
4.4.4 Inversión de las etapas y tramos de construcción de la Línea 2 de Lima. -----	85

CAPÍTULO 5 COMENTARIOS Y CONCLUSIONES -----	90
--	-----------

CAPÍTULO 6 BIBLIOGRAFÍA -----	92
--------------------------------------	-----------

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
• Tabla 1: Comparación entre el método NATM y el uso de tuneladora [19] -----	
-----	27
• Tabla 2: Tuneladoras EPB que trabajaron en la ampliación del Metro de Madrid [6] -----	
-----	30
• Tabla 3: Líneas de Metro proyectadas y en construcción en Latinoamérica [6] -----	
-----	31
• Tabla 4: Tramos de estudio [19] -----	35
• Tabla 5: Ubicación de estaciones Tramo 1 [22] -----	36
• Tabla 6: Ubicación de estaciones Tramo 2 [23] -----	36
• Tabla 7: Ubicación de estaciones Tramo 3 [24] -----	37
• Tabla 8: Estaciones proyectadas - Tramo I y II [30] -----	43
• Tabla 9: Ubicación estaciones Línea 2 [36] -----	51
• Tabla 10: Ubicación estaciones Línea 4 [36] -----	52
• Tabla 11: Actividades principales en el ciclo de un escudo EPB y avances máximos [42] -----	65
• Tabla 12: Rendimientos alcanzados en las ampliaciones del Metro de Madrid 95-99 [42] -----	66
• Tabla 13: Desglose de tiempos en la construcción de la Línea 7 del Metro de Madrid [42] -----	66
• Tabla 14: Evolución de los tiempos perdidos en cinco obras consecutivas hechas con el mismo escudo EPB. [43] -----	68
• Tabla 15: Costos de terreno para construcción del pique [18]. -----	70
• Tabla 16: Costo instalaciones de faena en cada pique [18]. -----	70
• Tabla 17: Costo terreno e instalación de faena para cada pique [18]. -----	71
• Tabla 18: Costo construcción de piques y galerías [18]. -----	71
• Tabla 19: Costo total de Pique de construcción [18]. -----	72
• Tabla 20: Tipos de estaciones [18]. -----	72
• Tabla 21: Costo aproximado de estaciones [18]. -----	72
• Tabla 22: Partidas consideradas en la construcción del túnel interestación mediante método NATM [45]. -----	73
• Tabla 23: Costos tramos Línea 3 [45]. -----	74
• Tabla 24: Costos tramos Línea 6 [45]. -----	75

- **Tabla 25:** Costo unitario de construcción del túnel interestación mediante método NATM. Fuente propia. -----75
- **Tabla 26:** Desglose costo total, Proyecto Metro de Lima [46]. -----80
- **Tabla 27:** Costo de partidas de infraestructura, Metro de Lima [46]. -----81
- **Tabla 28:** Longitud de los túneles que se construirán con cada método constructivo [46]. ----- 81
- **Tabla 29:** Costo lineal de construcción del túnel interestación mediante tuneladoras [46]. ----- 82

ÍNDICE DE FIGURAS

- **Figura 1:** Emboquille convencional [2] ----- 4
- **Figura 2:** Montaje de TBM [3] ----- 5
- **Figura 3:** Tunnel Boring Machine [4] ----- 5
- **Figura 4:** Técnica Cut and Cover [5] ----- 6
- **Figura 5:** Secuencia Constructiva Método Belga [5]----- 8
- **Figura 6:** Comparativas entre métodos tradicionales y el NATM [5]----- 9
- **Figura 7:** Secuencias de distintos métodos de excavación [8]-----10
- **Figura 8:** Máquinas tuneladoras [9]-----11
- **Figura 9:** Tuneladoras Topo [10] -----13
- **Figura 10:** TBM escudo doble [11] -----14
- **Figura 11:** Escudo abierto con rozadora [12] -----15
- **Figura 12:** Esquema Escudo con Equilibrio de Presión de Tierras o EPB. [14] -----16
- **Figura 13:** Diagrama de equilibrio de presiones en un EPB. [15]-----16
- **Figura 14:** Esquema Escudo de presión de lodos o Slurry Shield. [16]-----17
- **Figura 15:** Esquema Escudo Mixto o Mixshield del tipo Slurry. [17]----- 18
- **Figura 16:** Esquema construcción típica de una Línea de Metro [18]----- 19
- **Figura 17:** Esquema de estación típica de una Línea de Metro [18]----- 21
- **Figura 18:** Esquema pique de construcción típico [18] ----- 22
- **Figura 19:** Pique de construcción y tramo de túnel interestación.[18]----- 23
- **Figura 20:** Excavación de túnel por medios mecánicos.[18]----- 23
- **Figura 21:** Escudo EPB rompe muro de estación en el Metro de Barcelona [18] -----24
- **Figura 22:** Esquema Cut and Cover modalidad Top Down [18]----- 25

• Figura 23: Esquema de avance de una máquina tuneladora [18]	26
• Figura 24: Caso 1 NATM Vs Tuneladoras [20]	28
• Figura 25: Caso 2 NATM Vs Tuneladoras [20]	28
• Figura 26: Proporción de diferentes métodos constructivos para túneles de Metro [18]	29
• Figura 27: Porcentajes de utilización de distintos métodos constructivos en la construcción del metro de Sao Paulo, Brasil (Rocha, 2013)	32
• Figura 28: Avance de la Línea 2 del Metro de Lima [21]	33
• Figura 29: Avance de la Línea 2 del Metro de Lima [21]	33
• Figura 30: Tramo 1, estudio topográfico [22]	35
• Figura 31: Tramo 2, estudio topográfico [23]	36
• Figura 32: Tramo 3, estudio topográfico [24]	37
• Figura 33: Terreno N° 1 [25]	38
• Figura 34: Terreno N° 2 [26]	39
• Figura 35: Terreno N° 3 [27]	40
• Figura 36: Apoyo de la Policía Nacional [28]	42
• Figura 37: Apoyo de la Policía Nacional [29]	42
• Figura 38: Líneas 2 y 4 del Metro de Lima [31]	46
• Figura 39: Espacio de aparcamiento de trenes después de estaciones terminales –Estación Gambeta [32]	48
• Figura 40: Espacio de aparcamiento de trenes después de estaciones terminales –Estación Carmen de la Legua- Línea 4 [33]	49
• Figura 41: Espacio de aparcamiento de trenes después de estaciones terminales –Estación Puerto Callao [34]	49
• Figura 42: Espacio de aparcamiento de trenes después de estaciones terminales- Estación Municipalidad de Ate [35]	50
• Figura 43: Patio –Taller Santa Anita [37]	53
• Figura 44: Patio –Taller Bocanegra [38]	53
• Figura 45: Geología de Lima [39]	57
• Figura 46: Granulometría de los terrenos y aplicación a los escudos EPB. [40]	61
• Figura 47: Partes principales de un escudo EPB [41]	62
• Figura 48: Horas útiles en la construcción de un túnel con EPB en las ampliaciones del Metro de Madrid. [43]	67
• Figura 49: Distribución de costos en la construcción del túnel interestación con NATM [45]	74
• Figura 50: Comparación costos NATM vs TBM [18]	84
• Figura 51: Presupuesto Línea 2 de Lima [44]	88
• Figura 52: Costos del Proyecto [44]	89
• Figura 53: Costos de Operación y Mantenimiento [44]	89

PREÁMBULO

Las ciudades de Lima y Callao presentan elevados niveles de congestión de las vías para el transporte público, lo que implica altos niveles de contaminación, inseguridad vial, entre otros. Este contexto requiere de la implementación de un sistema de transporte masivo que contribuya a mejorar sustancialmente la movilidad urbana.

El 24 de diciembre del 2010 se emitió el Decreto Supremo N°059-2010-MTC, donde se aprobó la Red Básica del Metro de Lima, conformada por cinco (05) líneas:

Línea 1: Avenida Separadora Industrial, Avenida Pachacutec, Avenida Tomás Marsano, Avenida Aviación, Avenida Grau, Jirón Locumba, Avenida 9 de Octubre, Avenida Próceres de la Independencia, Avenida Fernando Wiese.

Línea 2: Avenida Guardia Chalaca, Avenida Venezuela, Avenida Arica, Avenida 9 de Diciembre, Avenida Paseo de la República, Avenida 28 de Julio, Avenida Nicolás Ayllón, Avenida Víctor Raúl Haya de la Torre (Carretera Central).

Línea 3: Avenida Alfredo Benavides, Avenida Larco, Avenida Arequipa, Avenida Garcilaso de la Vega, Avenida Tacna, Avenida Pizarro, Avenida Túpac Amaru, Avenida Rosa de América, Avenida Universitaria.

Línea 4: Avenida Elmer Faucett, Avenida La Marina, Avenida Sánchez Carrión, Avenida Salaverry, Avenida Canevaro, Avenida José Pardo de Zela, Avenida Canadá, Avenida Circunvalación, Avenida Javier Prado.

Línea 5: Avenida Huaylas, Avenida Paseo de la República, Avenida República de Panamá, Avenida Miguel Grau.

Posteriormente, el 10 de agosto del 2013, mediante Decreto Supremo N°009-2013-MTC, se modificó el Decreto Supremo N°059-2010-MTC, incorporando a la Red Básica del Metro de Lima, la Línea 6:

Línea 6: Av. Túpac Amaru, Avenida Los Alisos, Avenida Universitaria, Avenida Bertolotto, Avenida Pérez Aranibar (Ex Avenida del Ejército), Avenida Angamos y Avenida Primavera”.

En abril de 2014 el Estado peruano y el Consorcio Nuevo Metro de Lima suscribieron el contrato de concesión por 35 años del proyecto de la Línea 2 del Metro de Lima y Callao que unirá el distrito de Ate con el Callao. El proyecto será tipo metro subterráneo y unirá la zona este y oeste de la capital peruana.

La Línea 2 del Metro de Lima y Callao incluye también la construcción del Ramal Avenida Faucett – Avenida Gambetta que pasará por 8 estaciones en 13 minutos y será parte de la futura Línea 4.

El proyecto, al estar pensado como una Asociación Público Privada integral, incluye los servicios especializados de diseño, construcción, equipamiento, provisión de material rodante, operación y mantenimiento a cargo del concesionario.

CAPÍTULO 1: SITUACIÓN A INVESTIGAR

1.1 JUSTIFICACIÓN

Entender las ventajas y beneficios que nos brinda la construcción de un túnel subterráneo para el transporte masivo.

Además, al desarrollar este proyecto se tendrá un criterio adecuado para la elección de los tipos de tuneladoras que se usarán en su construcción.

En el Perú, no se posee información suficiente para construir túneles subterráneos, por lo que este estudio permitirá conocer y aprender el sistema constructivo del túnel subterráneo, asimismo realizar una comparación con las diferentes redes básicas en países de Latinoamérica.

1.2 OBJETIVO GENERAL

El proyecto tiene como objetivo general, estudiar el proceso constructivo del Metro de Lima-Callao y desarrollar un estudio que permita ser utilizado como referencia para la aplicación del método de excavación con tuneladoras, de manera que sean aplicados en futuros proyectos y enriquezcan la ingeniería nacional transfiriendo la tecnología utilizada.

➤ OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar las características de la construcción de la línea 2 Tren Eléctrico-Lima.
- Definir los métodos y técnicas para la ejecución del Proyecto.
- Describir detalladamente el proceso constructivo del túnel subterráneo.
- Describir los tipos de tuneladoras existentes.
- Justificar la elección de la tuneladora más adecuada para la excavación de túneles en los suelos de Lima.
- Estudiar el método de excavación de túneles NATM, y compararlo con el método de excavación con tuneladora.

1.3 METRO DE LIMA – ANTECEDENTES

Los primeros estudios para desarrollar el proyecto del metro de Lima empiezan en el año 1965. El alcalde Luis Bedoya y la consultora Trafikkonsult Ab realizaron los estudios el 22 de enero de 1966 para la construcción de las primeras rutas del Metro de Lima que consistía de una red de tres líneas subterráneas de 67,5 km que ascendía un costo de US\$ 243 millones, estos estudios fueron entregadas el 20 de junio del mismo año [46].

Sin embargo, en los años 60, no se tomó ninguna iniciativa para su construcción de las tantas propuestas que fueron recibidas de diversas consultoras de firmas internacionales.

Entre 1972 y 1973, el consorcio "Metrolima" elaboró el estudio de factibilidad técnico-económica y el anteproyecto del "Sistema de Transporte Rápido Masivo de Pasajeros en el Área Metropolitana de Lima-Callao"(4 líneas), aprobado por el Gobierno Revolucionario de las Fuerzas Armadas del Perú en 1974. Lamentablemente, la crisis política generada por la repentina enfermedad del Presidente del Perú de esa época General de División EP Velasco Alvarado sumado al complejo suelo limeño ubicado en una zona altamente sísmica, así como la crisis económica internacional, en ese momento, imposibilitaron conseguir el financiamiento ascendente aproximadamente a US\$ 317 000 000 de la época [46].

En 1986 el primer gobierno de Alan García creó la "Autoridad Autónoma del Proyecto Especial Sistema Eléctrico de Transporte Masivo de Lima y Callao", esta entidad convocó a un concurso público para la implementación de este sistema y el concurso lo ganó el denominado "Consortio Tralima" de capitales italianos. Este consorcio inició con prontitud las obras de construcción de la infraestructura para un metro en viaducto elevado [46].

En el año 2005 la Secretaría Técnica del Consejo de Transporte de Lima y Callao (institución adscrita al Ministerio de Transporte y Comunicaciones - MTC) solicitó a la Agencia de Cooperación Técnica del Japón - JICA la formulación de un Plan Maestro de Transporte Urbano, el cual consideró una red de 7 líneas para el Metro de Lima. Sin embargo, el plan fue desestimado. El gobierno dictó el Decreto Supremo 059-2010-MTC mediante el cual se aprobó la «Red Básica del Metro de Lima». Para enero de 2011, las obras de la Línea 1 ya se encontraban prácticamente terminadas, restando únicamente la electrificación de la nueva vía[46].

Actualmente, el proyecto “Línea 2 Metro Lima-Callao” que será una línea subterránea, la primera en el Perú, cuenta con 5 líneas y está pronosticado terminar para el 2020. Siendo el alcance de esta investigación, poder comparar el sistema constructivo de los diversos túneles subterráneos construidos en América Latina con la “Línea 2 Metro Lima-Callao”.

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

2.1 Generalidades

Un túnel es una excavación subterránea lineal normalmente horizontal, pero que en algunos casos, tiene un ángulo superior a 30° con respecto a la superficie terrestre, en cuyo caso se denomina pozo (inclinado o vertical). La preparación para la apertura de un túnel es conocido como “*emboquille*”, la figura 1 muestra un emboquille convencional [1].

Un túnel que da acceso desde la superficie a una construcción subterránea se conoce con el nombre de ventana. Los túneles destinados al paso de tuberías, cables, desagües, abastecimiento de aguas, calefacción y ventilación se denominan galerías, al igual que los túneles de carácter provisional, que se llaman galerías de avance [1].



Figura 1: Emboquille convencional [2]

La excavación de túneles ha ido evolucionando con el tiempo dando paso a nuevos sistemas y métodos desarrollados regionalmente en función de las características geomecánicas de los materiales existentes.

En cuanto a túneles ejecutados por fases, encontramos el Nuevo Método Austriaco (NATM), el Método Alemán, y el Método Belga, en los que la sección completa se divide en secciones más pequeñas, que se excavan y estabilizan [1].

Las máquinas integrales para la excavación de túneles se conocen habitualmente por las siglas T.B.M. (Tunnel Boring Machine) 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 [1]. En la figura 2 podemos ver el montaje de la máquina TBM. Estas máquinas se dividen en dos grandes grupos: *topos* y *escudos*. Ambos difieren de forma importante según el tipo de roca o suelo que sea necesario excavar, así como de las necesidades de sostenimiento o revestimiento que requiera cada tipo de terreno.



Figura 2: Montaje de TBM [3]

Las máquinas “*topos*” se diseñan principalmente para poder excavar rocas duras y medias, sin grandes necesidades de soporte inicial, mientras que los *escudos* se utilizan en su mayor parte en la excavación de rocas blandas y en suelos, frecuentemente inestables. La figura 3 muestra la sección de una máquina TBM.



Figura 3: Tunnel Boring Machine [4]

2.2 Métodos Constructivos para túneles en suelos

Las excavaciones subterráneas en suelos no tienen ninguna relación con los túneles en roca, ya que las tecnologías para resolver los problemas de ejecución de unos u otros son muy diferentes. Asimismo, no se puede comparar la forma de construcción de túneles en suelos cuando se ejecutan en zonas urbanas o a campo abierto, ya que en zonas urbanas se produce asentamiento o hundimiento vertical del suelo que pueden dañar las estructuras que colindan a la obra.[6].

Los estudios geotécnicos y geológicos que se tenga del terreno, las restricciones de deformaciones en superficie y los plazos a cumplir, determinan finalmente el método constructivo de excavación más adecuada para desarrollar un proyecto.

Los métodos constructivos de túneles en suelos se pueden definir en 2 grupos:

- Cut and cover o cielo abierto.
- Excavación subterránea

Estos dos sistemas se describen a continuación:

2.2.1 Cut and Cover:

El método “*cut and cover*” o *falso túnel*, también conocido como la técnica de cavar y cubrir y corte y cubierta, es un método de construcción para túneles superficiales, donde se excava desde la superficie la totalidad o parte del hueco que ocupa el túnel, se construye dentro del hueco a cielo abierto y se cubre una vez terminado para formar el túnel. Requiere un sistema de sostenimiento fuerte para soportar las cargas del material que cubre el túnel [5].

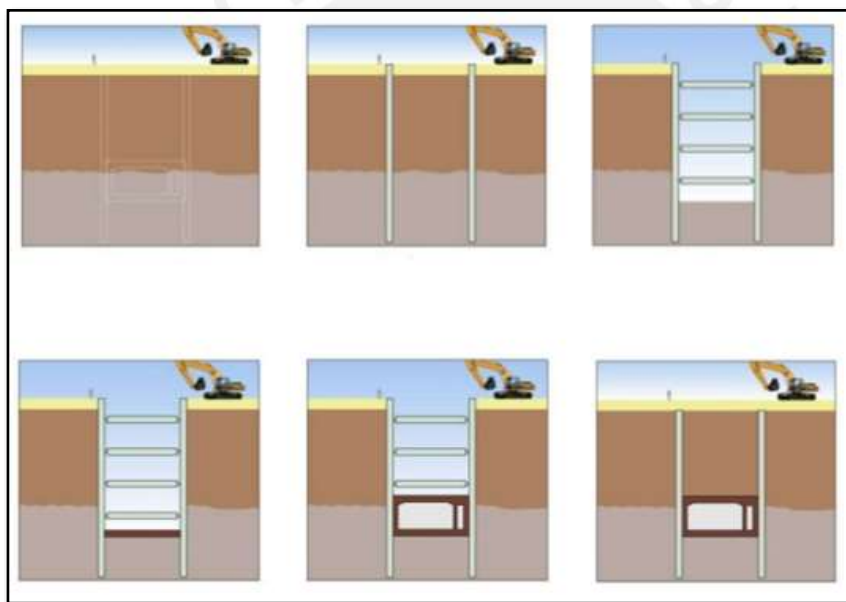


Figura 4: Técnica Cut and Cover [5]

Este tipo de construcción de túneles resulta apropiado cuando existe un escaso recubrimiento de terreno sobre el túnel y al mismo tiempo existe riesgo de que la construcción de una trinchera convencional pueda provocar desprendimientos. En otras ocasiones, la construcción de falsos túneles se justifica simplemente en la necesidad minimizar el impacto ambiental de la línea, especialmente cuando el trazado pasa cerca de zonas urbanas [5].

2.2.2 Excavación subterránea:

Este método constructivo se caracteriza por no afectar a la superficie y por estar condicionada a los cambios inducidos presentes en las estructuras cercanas al trazado del proyecto.

El accesos al frente es uno de los inconvenientes que se necesita resolver antes del inicio del proyecto, ya que el túnel se ubica a una profundidad determinada y regularmente se inicia desde la superficie del terreno; es por ello que se requiere de rampas de ataque o acceso desde los pozos verticales, incrementando el costo y tiempo que estos trabajos implican.

Existen muchos métodos de excavación subterránea en suelos, estos se dividen entre los que realizan la excavación a sección completa, también llamados *métodos de gran frente abierto*; y los *métodos de sección partida*, que se diferencian básicamente entre ellos por el orden de ejecución y el modo de aplicación del sostenimiento en algún caso. A continuación podemos observar esquemáticamente cuál es el proceso seguido en cada uno de los métodos, que a continuación describiremos [6].

➤ Método de la galería en clave o método belga

Basado en los principios de la construcción del túnel del Charleroi en el canal que enlaza Bruselas y Charleroi en 1828. Consiste en la excavación del avance de forma similar al método inglés, pero excavando la destroza en secciones verticales, a modo de zanjas, lo cual mejora el rendimiento de las máquinas a la hora de excavar la contrabóveda [5].

Fases constructivas:

- Excavación y entibación de la galería de avance
- Excavación y hormigonado de la bóveda
- Excavación de la destroza o pasillo central
- Excavación de las bermas laterales y construcción de los hastiales
- Construcción de la contrabóveda

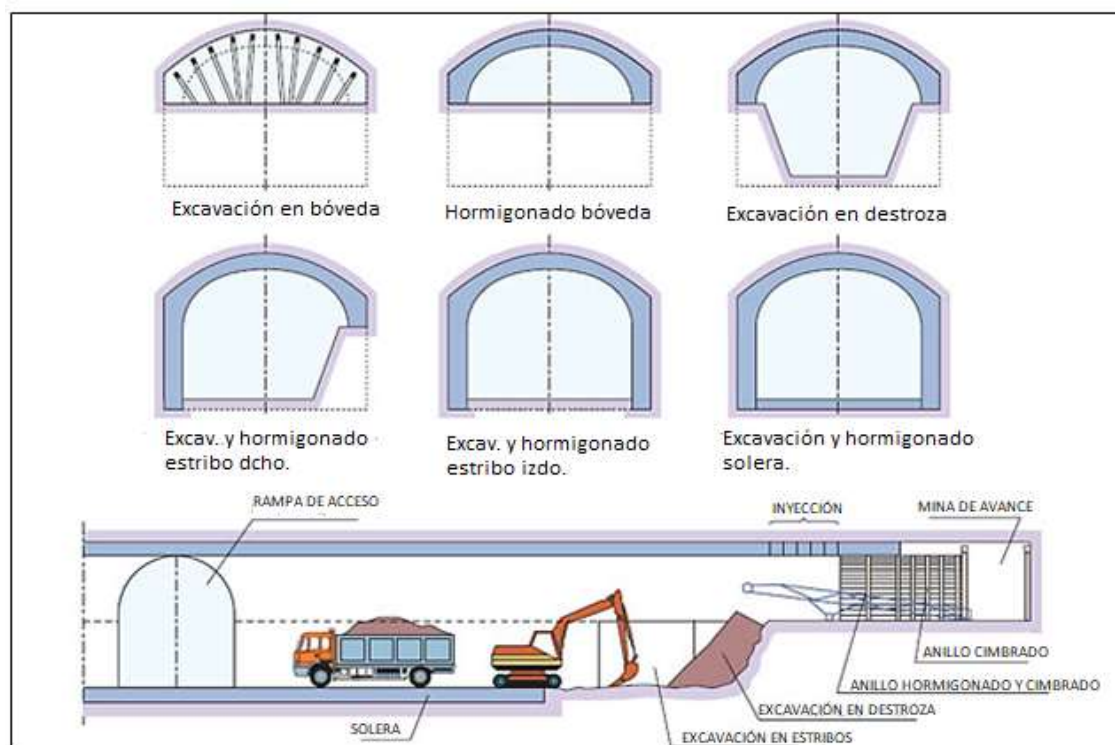


Figura 5: Secuencia Constructiva Método Belga [5]

➤ Nuevo método austriaco (NATM)

El NATM ha sido uno de los métodos más utilizados. Consiste en excavar grandes secciones de túnel (en algunos casos, la sección completa) permitiendo que el terreno se auto-sustente, es decir, que el terreno forme un anillo de descarga en el perímetro de la excavación, permitiendo su deformación hasta un punto de equilibrio. Inmediatamente después, se coloca un revestimiento con el objeto de proteger la superficie excavada y controlar dicha deformación [9].

Dentro del sistema NATM deberán tenerse en cuenta los siguientes principios básicos [9]:

- Los estados adversos de tensión y deformación en el terreno, se deberán corregir mediante un método de sostenimiento apropiado para cada tipo de terreno.
- En casos desfavorables, la ejecución de una contrabóveda aportará el arco resistente deseado, obteniéndose así, unas propiedades estáticas similares a las de un tubo.
- El tipo de sostenimiento se irá optimizando de acuerdo con las deformaciones máximas admisibles que presente el terreno.
- Deberá llevarse un seguimiento exhaustivo de las mediciones generales de control (convergencias), realizando constantes ensayos de optimización del sostenimiento.

Como consecuencia de todo ello, la correcta utilización del NATM supone [9]:

- 1º. Ejecución de procedimientos de excavación cuidadosos.
- 2º. Elección de la mejor sección de excavación posible, permitiendo además su adaptación a las condiciones específicas mecánicas de la roca y la distribución de tensiones.
- 3º. El sistema de excavación deberá de adaptarse a las propiedades del terreno encontrado. La estabilidad del frente sin sostenimiento, la elección correcta de la voladura y la longitud del avance, juegan un importante papel para elegir el método operacional más factible y económico.

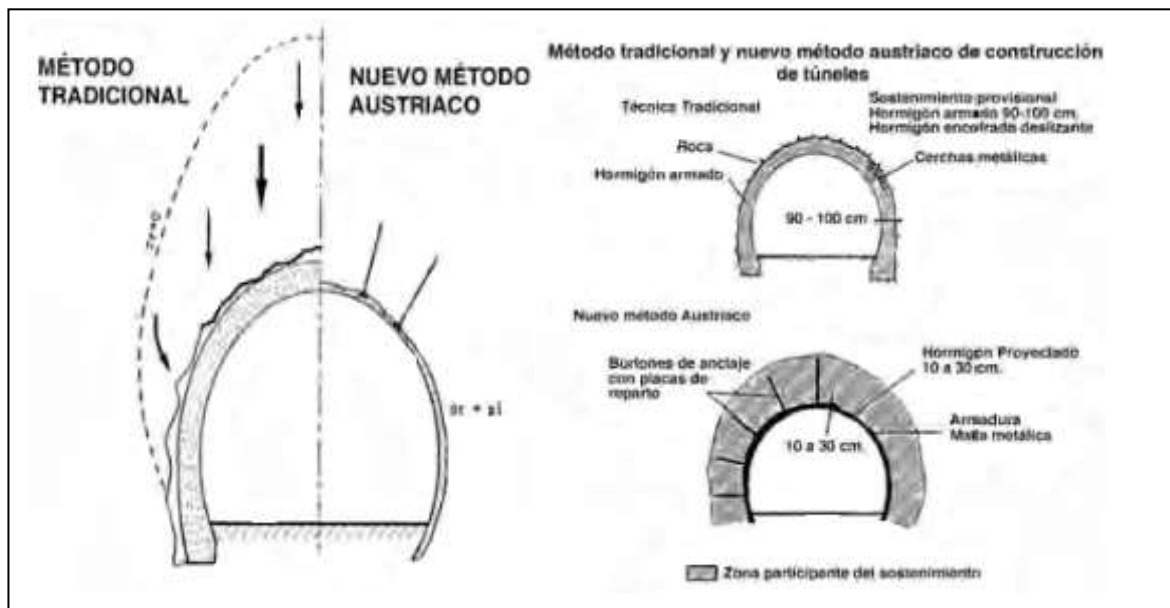


Figura 6: Comparativas entre métodos tradicionales y el NATM [5]

➤ Método de ataque a plena sección o método inglés

Recibe su nombre por haber sido aplicado en túneles en un tipo de terreno que usualmente se localiza en Inglaterra, como son las arcillas y areniscas. Se aplicó en la construcción del primer túnel bajo el Támesis, el cual se llevó a cabo gracias a un escudo de frente abierto [6].

Consiste en excavar primero el avance mediante una galería central y después ensancharla lateralmente; a continuación se excava la parte inferior en capas horizontales.

➤ Método de las tres galerías o método alemán

Desarrollado por Wiebeking en 1814, sigue el sistema de núcleo central. Empleado en la construcción de las amplias bodegas de cerveza de Baviera. Se utiliza para túneles de grandes luces, para construir estaciones, o cuando el terreno es inestable y no se puede descalzar parte de la bóveda para ejecutar los hastiales [7].

El sistema Alemán, como se puede apreciar en la figura 7, consiste en excavar en primer lugar los hastiales mediante dos galerías paralelas.

A continuación se excava una galería central superior en la zona de la clave, y posteriormente se hormigona la galería inferior de los hastiales. Desde los hastiales se excava la bóveda con el sistema de “costillas”, esto es, mediante pequeños túneles que unen los hastiales con la galería de clave de forma alternante en forma de costilla. Se hormigona cada una de las semi-costillas desde la galería de clave, y posteriormente se hormigona ésta por tramos. De esta forma, quedan construidos la bóveda y los hastiales, para comenzar a excavar el núcleo central, que es el túnel propiamente dicho. Concluida la excavación de la caverna, se hormigona la contrabóveda [7].



Figura 7: Secuencias de distintos métodos de excavación [8]

➤ **Excavación con máquinas tuneladoras**

Se conocen como *tuneladoras* a aquellas máquinas que se utilizan para la excavación de túneles *tuneladoras* y estas son capaces de excavar un túnel a sección completa, y al mismo tiempo ayuda en la colocación de un sostenimiento provisional o revestimiento definitivo. [6].

Las tuneladoras tipo escudo se utilizan para la construcción de túneles en terrenos blandos e inestables. Los escudos son máquinas que tiene una cabeza giratoria del mismo diámetro de la sección que se va a excavar, equipadas con herramientas de corte como discos de corte y una cámara de presión en el frente [6].

Existen varios tipos de escudos, se caracterizan sobre todo en la estabilidad o inestabilidad del mismo. Están los *escudos abiertos*, que se utilizan en frentes estables y los *escudos cerrados* para aquellos frentes que presentan inestabilidad [6].



Figura 8: Máquinas tuneladoras [9]

Estas máquinas están sujetas a ciertas condiciones como *la geometría de la sección, longitud mínima del túnel, entre otros*. El rendimiento de la maquinaria suele ser muy elevado, a pesar que exista variabilidad con respecto al tipo de dovela que se colocará y al tipo de escudo que se utilizará [6].

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

2.3 Máquinas tuneladoras:

El incremento de obras subterráneas en los últimos tiempos, ha permitido el desarrollo de nuevos equipos de excavación, más versátiles y seguros.

La excavación de túneles con máquinas integrales a sección completa (Tunnel Boring Machine) se divide fundamentalmente en dos grupos, en función del tipo de material a excavar, y de las necesidades de sostenimiento [10].

En primer lugar, estarían los *Topos*, diseñados fundamentalmente para rocas duras y medias, estas máquinas no colocan sostenimiento en el túnel, ya que no es necesario y por otro lado, los *Escudos*, empleados en rocas blandas y suelos, frecuentemente inestables y a veces por debajo del nivel freático. Un desarrollo posterior sería el Doble Escudo, capaz de trabajar con las dos tipologías de terreno descritas, en función de la calidad del macizo rocoso [10].

A continuación se detallará cada uno de los tipos de tuneladoras mencionados, indicando sus fortalezas y debilidades.

2.3.1 Máquinas topo (TBM)

En líneas generales los *topos* se diseñan principalmente para poder excavar rocas duras y medias, sin grandes necesidades de soporte inicial. Estas máquinas constan de una cabeza giratoria, dotada de cortadores, que se acciona mediante motores eléctricos y que avanza en cada ciclo mediante empuje de unos gatos que reaccionan sobre las zapatas de los grippers, los cuales a su vez están anclados contra la pared del túnel. Recipientes 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 [10].

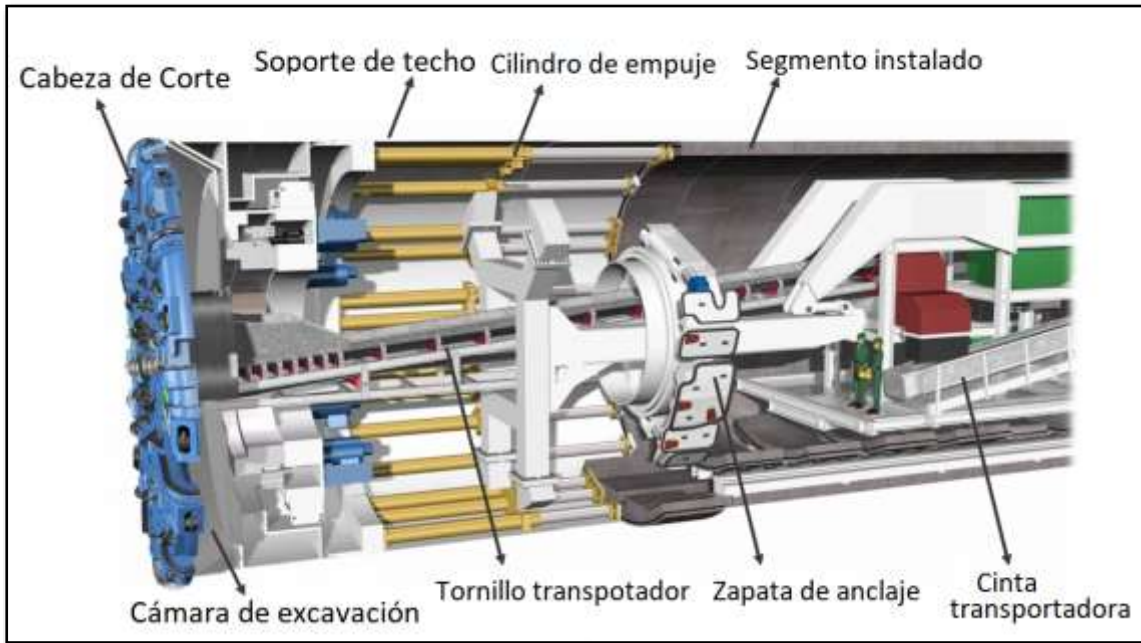


Figura 9: Tuneladoras Topo [10]

2.3.2 Tuneladora doble escudo

En función de la calidad del macizo rocoso, esta máquina es capaz de trabajar como topo o como escudo, siendo la mejor solución para macizos con tramos de tipología variable suelo-roca. En este tipo de tuneladoras el escudo está dividido en dos partes, la delantera en la que se encuentra la cabeza de corte, y la zona trasera en la que se realiza el montaje del anillo de dovelas [11].

El movimiento de estas dos partes del escudo es independiente, situándose los “grippers” en un hueco abierto entre ambas, por lo que la cabeza puede excavar mientras que en la cola del escudo se van montando los anillos de dovelas. De esta manera los rendimientos alcanzados con este sistema son mucho mayores que con un escudo simple [11].

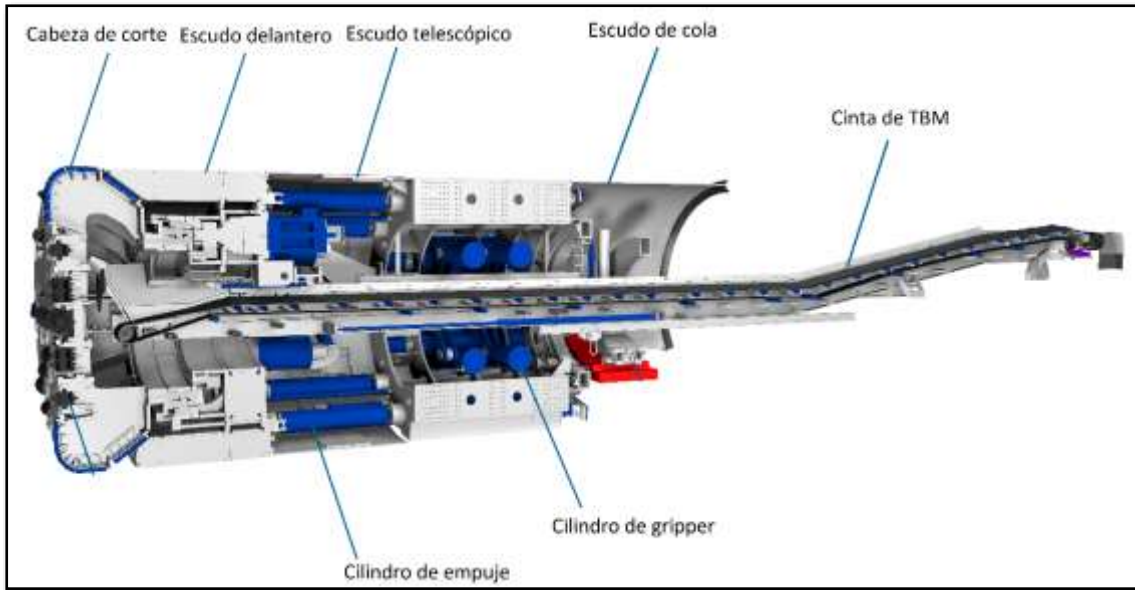


Figura 10: TBM escudo doble [11]

2.3.3 Escudo

El Escudo debe su nombre a que incorpora un sistema integral de protección, una carcasa metálica exterior, que le permite trabajar en terrenos inestables. Este elemento sostiene provisionalmente el terreno del frente de avance hasta el punto en el que se coloca el sostenimiento definitivo. El elemento de sostenimiento utilizado son anillos prefabricados de hormigón armado, formados por piezas llamadas dovelas [12].

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 de lodos, presiones de tierra, entre otros. A continuación se detallarán los más usados.

a) Escudo abierto

Los primeros escudos, nacen al añadir una simple coraza metálica para sostener el terreno en el frente de excavación, ésta se usaba con todo tipo de equipos de excavación puntual, tales como excavadoras o rozadoras, éstos eran los denominados escudos abiertos, usados cuando el frente es estable y se trabaja sobre el nivel freático o terrenos impermeables. Los escudos con excavadora aún son utilizados principalmente en túneles con diámetros menores a 4 m², como obras de colectores, oleoductos, etc, en suelos no cohesivos como arenas o gravas. Los escudos con rozadora, en cambio, tienen mayor rendimiento en rocas blandas y suelos compactos [12].

El sistema de avance es similar al de los Topos, pero debido a que en éstos casos el terreno circundante es inestable se hace imposible la aplicación de los grippers en la zona de hastiales, por lo que la máquina avanza mediante el empuje longitudinal de una serie de gatos perimetrales que se apoyan sobre el sostenimiento de anillos colocado previamente.

Éstos en cada ciclo, una vez realizado el avance, se retraen permitiendo la colocación de un nuevo anillo [12].

La Figura 11 muestra un escudo pequeño con una rozadora como elemento excavador.



Figura 11: Escudo abierto con rozadora [12]

b) Escudo de balance de presión de tierras (EPB)

Los EPB o Escudos de Presión de Tierras son tuneladoras donde el sostenimiento del frente se realiza mediante un equilibrio entre la presión del terreno más el agua del propio terreno y la presión que se mantiene en la cámara de extracción de la cabeza del escudo. Éste sistema es válido para todo tipo de terreno inestable.

La evacuación del escombros en los escudos EPB se realiza inyectando una serie de productos que en forma de espumas o polímeros, se mezclan con el terreno y el agua que contiene, mejorando la plasticidad de la mezcla, y haciendo que su consistencia sea adecuada para el transporte, que se realiza mediante un tornillo sinfín. Para controlar el sistema de presión de tierra hay que vigilar el volumen de escombros desalojado por el tornillo equilibrándolo con el volumen excavado. Por lo que se realizan mediciones continuas de los detectores de presión localizados en la cabeza, cámara y tornillo. [13]

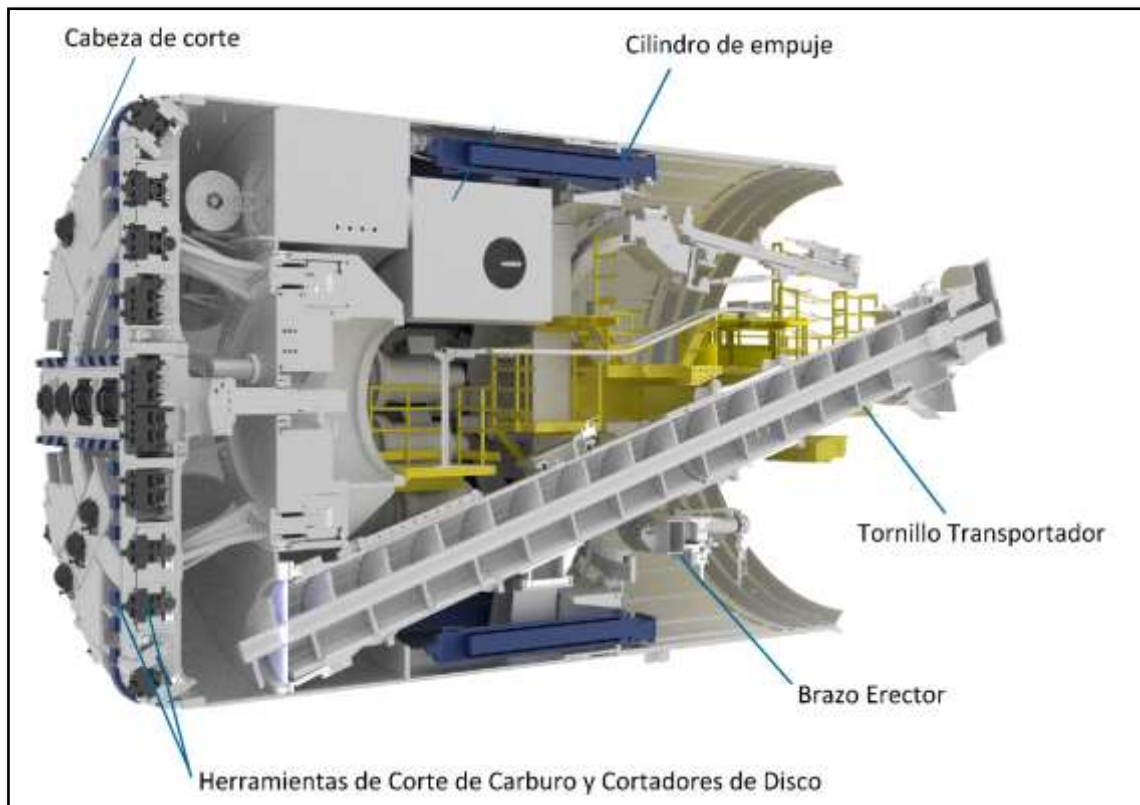


Figura 12: Esquema Escudo con Equilibrio de Presión de Tierras o EPB. [14]

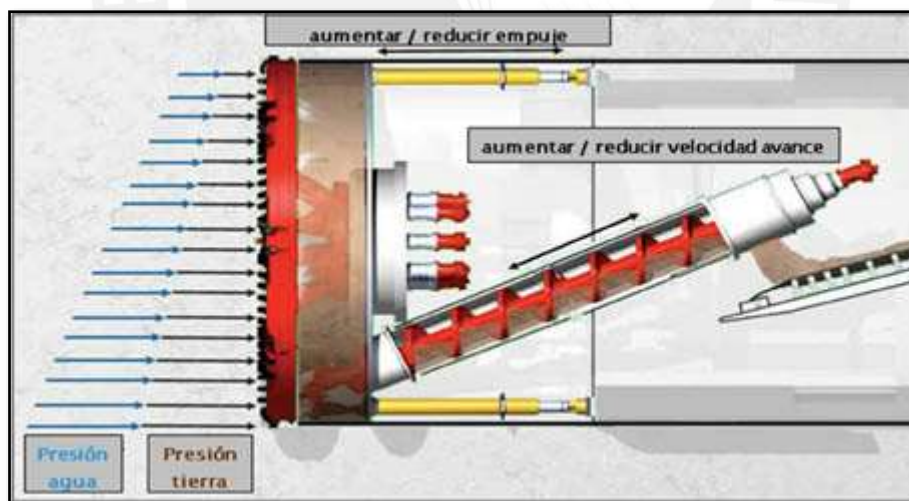


Figura 13: Diagrama de equilibrio de presiones en un EPB. [15]

c) Escudo con presión de lodos (Slurry Shield)

Los escudos de bentonita utilizan la propiedad tixotrópica de los lodos bentoníticos para conseguir la estabilización del frente del túnel. Son máquinas adecuadas para trabajar en terrenos difíciles, constituidos principalmente por arenas y gravas u otros materiales blandos y fracturados bajo presión de agua, en los que la inyección de lodos, además de contribuir a la estabilidad del terreno, ayuda al transporte mediante bombeo de los productos de excavación. La figura 14 muestra un esquema del escudo de presión de lodos [16].

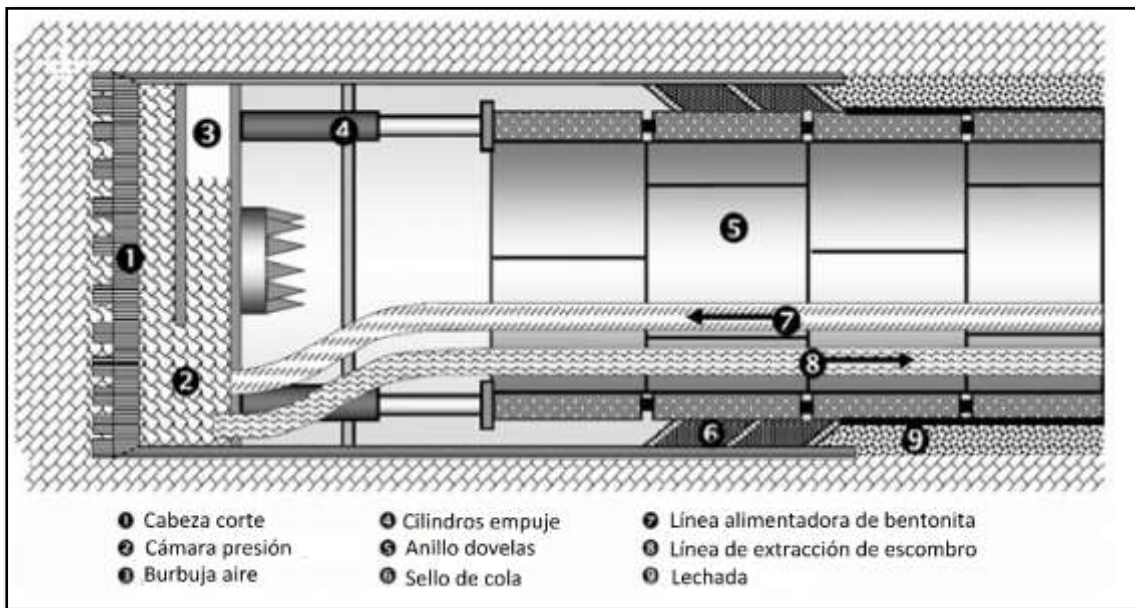


Figura 14: Esquema Escudo de presión de lodos o Slurry Shield. [16]

2.3.4 Escudos Mixtos

Máquina polivalente para excavar en diferentes tipos de geología, hoy en día es el método más utilizado para la construcción de túneles en zonas urbanas. Está dotada de las funciones básicas propias de un hidroescudo y de un escudo de presión de tierras (E.P.B.), además de poder trabajar como escudo abierto, e incluso con aire comprimido. Se suelen utilizar fluidos para sostener el frente de excavación y una suspensión de bentonita para transportar el material excavado. La suspensión de bentonita se trata en una planta separadora y se vuelve a incorporar al circuito [17].

La Figura 15 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.

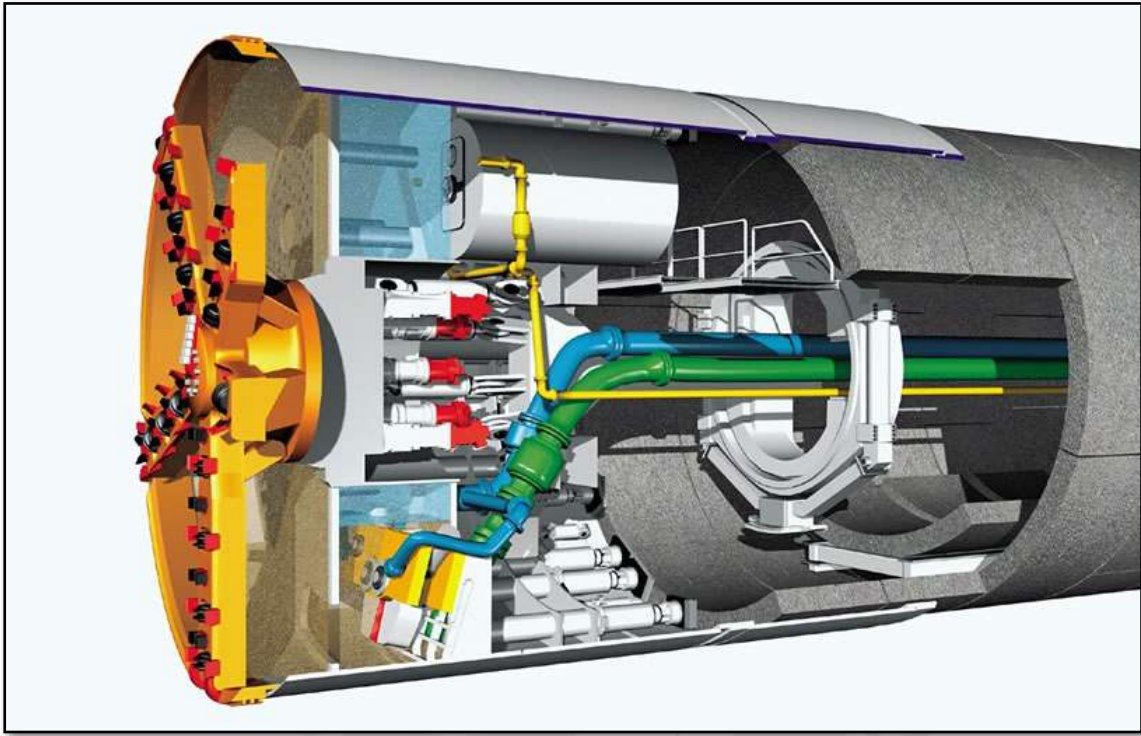
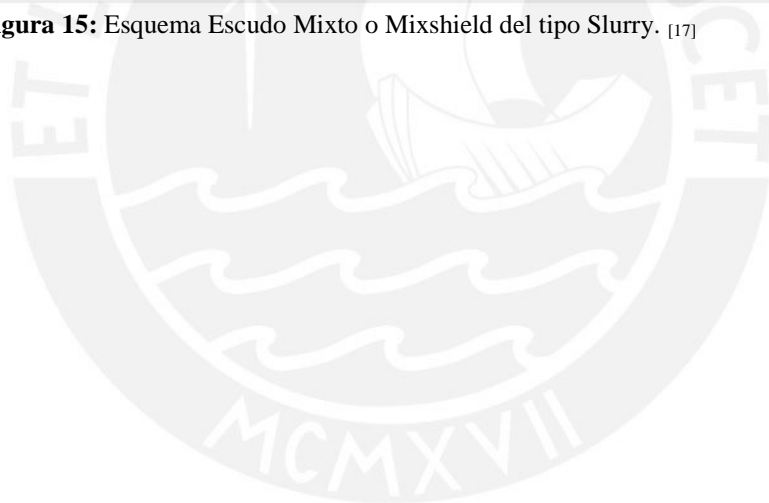


Figura 15: Esquema Escudo Mixto o Mixshield del tipo Slurry. [17]



CAPÍTULO 3: CONSTRUCCIÓN DE UNA LÍNEA DE METRO

Todas las construcciones subterráneas necesitan de una detallada y extensa investigación antes de su proyecto, para que se pueda hacer la mejor elección de su trazado y diseño. Esta necesidad es, sin duda, mayor que para otro tipo de construcciones e implicará el estudio geológico del terreno, de sondeos y de túneles de reconocimiento. No obstante, no hay que olvidar que la investigación continuará realizándose también durante la construcción.

En el caso de un trazado subterráneo, existen diferentes métodos para la construcción de los túneles y estaciones. A continuación se describirá el proceso constructivo para realizar una línea de Metro, considerando la construcción de túneles mediante método NATM y el uso de una tuneladora TBM y un escudo EPB.

3.1 Descripción General

Para la construcción de una nueva línea de Metro subterránea se definen un conjunto de parámetros que incluyen la longitud del Metro, el número de estaciones, la geometría, el trazado, la sección de los túneles y el método constructivo que se utilizará.

Como se muestra en la Figura 16, la construcción de una línea de Metro se puede abordar desde varios frentes, por un lado se encuentra la excavación del túnel de estación y por otro lado la excavación de las galerías de acceso. El proceso constructivo del túnel se puede realizar en varios tramos de acuerdo a sus características geotécnicas, planificación de la obra o método constructivo utilizado, algunos tramos pueden ser construidos siguiendo el método NATM, otros mediante el uso de máquinas tuneladoras de igual o distinta tipología o mediante métodos convencionales (uso de retroexcavadoras) [18].

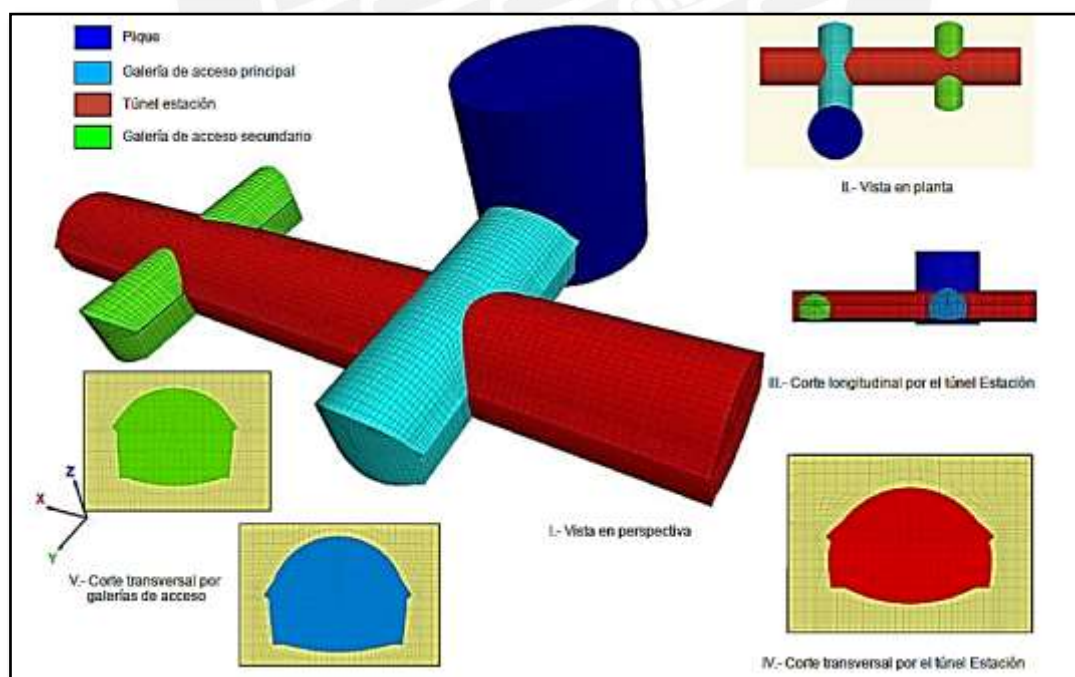


Figura 16: Esquema construcción típica de una Línea de Metro [18]

3.2 Construcción de una Línea de Metro con el método NATM

El NATM ha sido uno de los métodos más utilizados. Consiste en excavar grandes secciones de túnel (en algunos casos, la sección completa) permitiendo que el terreno se auto-sustente, es decir, que el terreno forme un anillo de descarga en el perímetro de la excavación, permitiendo su deformación hasta un punto de equilibrio. Inmediatamente después, se coloca un revestimiento con el objeto de proteger la superficie excavada y controlar dicha deformación

[18].

3.2.1 Obras previas

Las obras previas consisten en estructuras que deben iniciarse antes de la excavación de los túneles, estas obras son: piques, galerías y estaciones. Los túneles se construyen paralelamente con las estaciones, para así no interferir unos con otros. En base a ello, los piques y galerías dan lugar a los frentes de trabajo de los túneles, lugar 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:

a) Estaciones

Para no interrumpir el tránsito en las calles que coinciden con el trazo de la Línea del tren, el proceso constructivo de las estaciones se realiza de manera subterránea. Por lo cual, es necesario la construcción de un pique al costado del trazado, seguido de una galería que permita el acceso a la excavación de un túnel 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 [18].

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

La Figura 17 muestra 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.

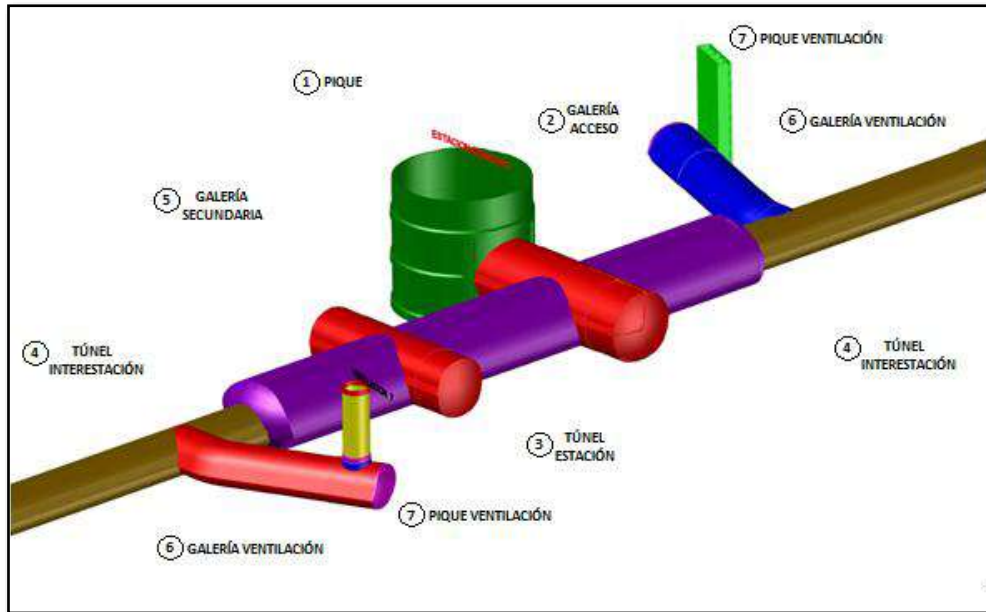


Figura 17: Esquema de estación típica de una Línea de Metro [18]

b) Piques de construcción

Los piques de construcción están situados 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 atravesar 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 [18].

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 18 muestra los elementos que integran un pique de construcción y su conexión con el túnel.

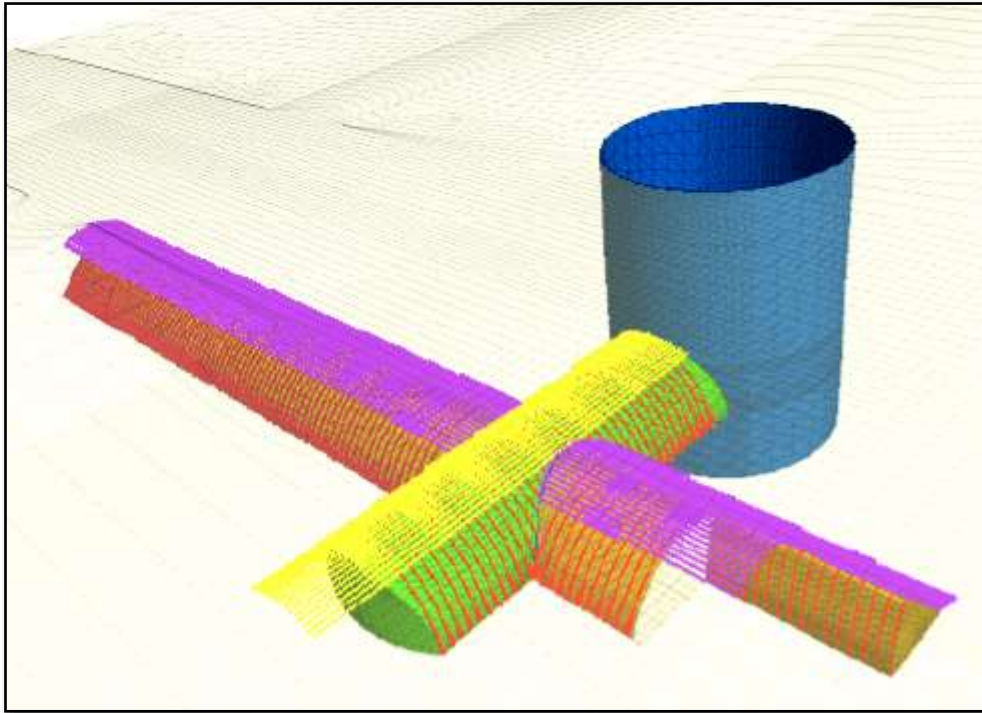


Figura 18: Esquema pique de construcción típico [18]

3.2.2 Túnel interestación

Éstos unen los túneles estaciones, y por ellos solo circulan los trenes, por lo que el área de su sección transversal es notoriamente menor a las galerías de acceso y túnel estación. Esto permite la excavación de toda la sección completa sin necesidad de dividir en bóveda, banco y contrabóveda. Por lo que su avance es más simple y rápido.

Para reducir los tiempos de excavación del túnel interestación se toma como premisa que el método NATM trabaja en varios frentes simultáneos sin necesidad de usar una maquinaria específica y además que su rendimiento es mucho menor si se usa una máquina tuneladora. Es por ello que 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 [18].

En la Figura 19, se muestra un tramo de túnel entre dos estaciones con un pique de construcción intermedio.

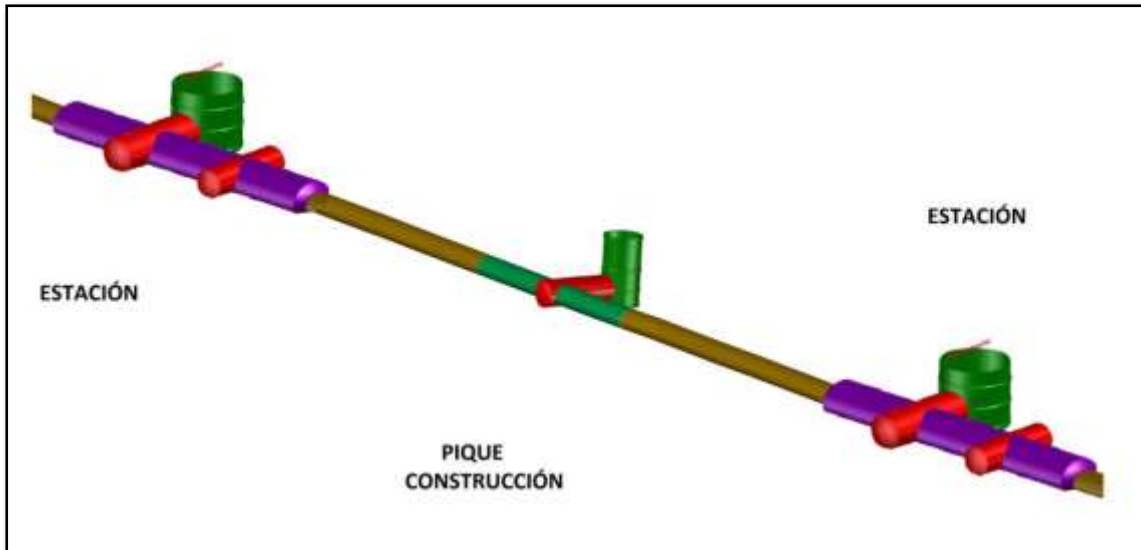


Figura 19: Pique de construcción y tramo de túnel interestación.[18]

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 20.



Figura 20: Excavación de túnel por medios mecánicos.[18]

3.3 Construcción de una línea de Metro mediante el uso de un escudo EPB y una tuneladora TBM

Se debe tener algunas consideraciones especiales para construir una línea de Metro usando un escudo tipo EPB.

El uso de la tuneladora escudo tipo EPB es un punto importante, debido a que no siempre es factible tener una de estas máquinas en obra. Además, se requiere de un estudio previo para su diseño, construcción y transporte que tarda por lo menos 12 meses.

La fabricación de estas máquinas es especialmente fabricada para una obra determinada, aunque actualmente es posible utilizar la misma maquinaria que entregue un desempeño similar al de una máquina nueva y que cumpla con los requerimientos que el nuevo proyecto impone.

3.3.1 Obras previas

El uso de máquinas tuneladoras establece: el número de frentes, la cantidad de máquinas que se disponga y que comúnmente no supera las 2 unidades por línea. A diferencia del método NATM, donde se puede contar con múltiples frentes de excavación simultáneamente [18].

Durante el tiempo que se demora en adquirir las máquinas tuneladoras, que son 12 meses por lo menos, se avanza en la construcción de estaciones, piques y portales de entrada para la tuneladora.

La Figura 21 muestra un escudo EPB rompiendo el muro de una estación en la construcción del Metro de Barcelona.



Figura 21: Escudo EPB rompe muro de estación en el Metro de Barcelona [18]

La disponibilidad de espacio superficial es un contexto donde se puede aplicar el método Cut and Cover. Toda la estación se construye desde el nivel de la calle. En el interior de la estructura se realizan todas las obras e instalaciones para convertirla en viable [18].

Con la metodología Cut and Cover con la modalidad Top-Down, que significa “cortar y cubrir” es un procedimiento de construcción para túneles superficiales donde se excava desde la superficie la totalidad o parte del hueco que ocupa el túnel, se construye el túnel dentro del espacio a cielo abierto y se cubre una vez terminado. Requiere un sistema de sostenimiento fuerte para soportar las cargas del material que cubre el túnel. En la Figura 22 se muestran las etapas del método Cut and Cover con modalidad Top-Down.

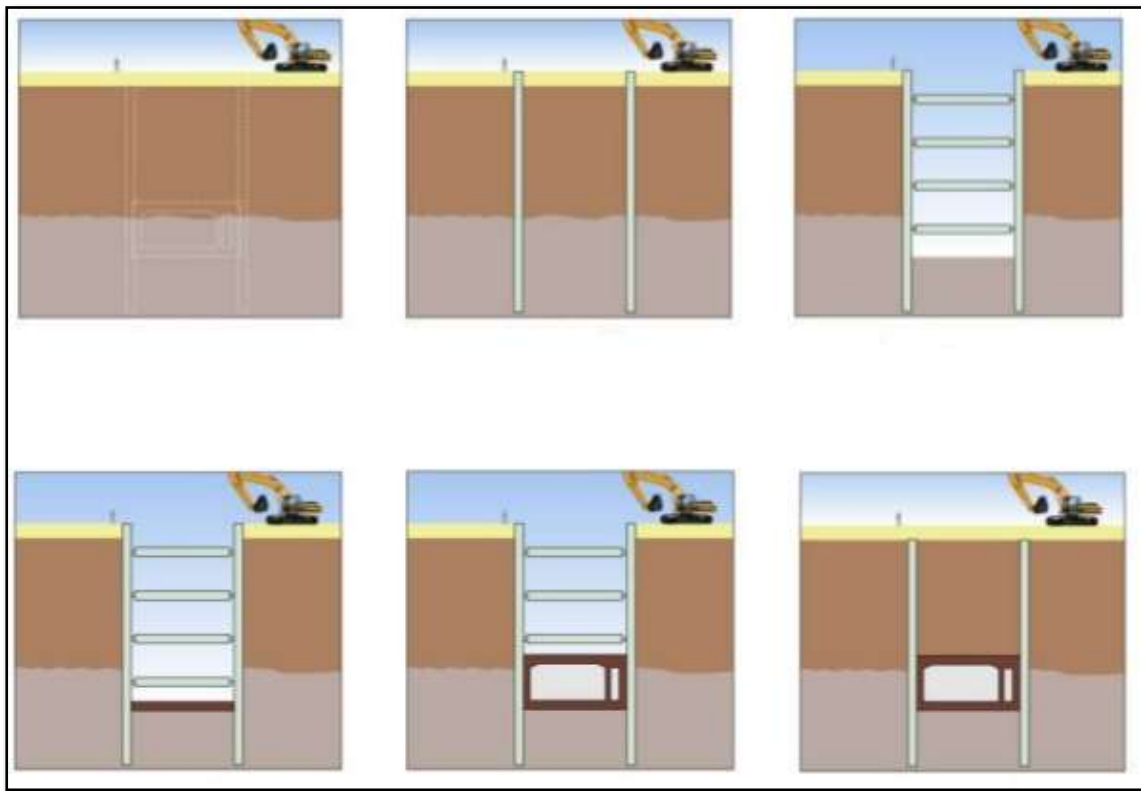


Figura 22: Esquema Cut and Cover modalidad Top Down [18]

3.3.2 Túnel interestación

La excavación del túnel inicia 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 empieza 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 [18].

En la Figura 23, se muestra el avance de un escudo EPB, que excava el túnel interestación hasta alcanzar una estación ya construida, para luego continuar al siguiente tramo.

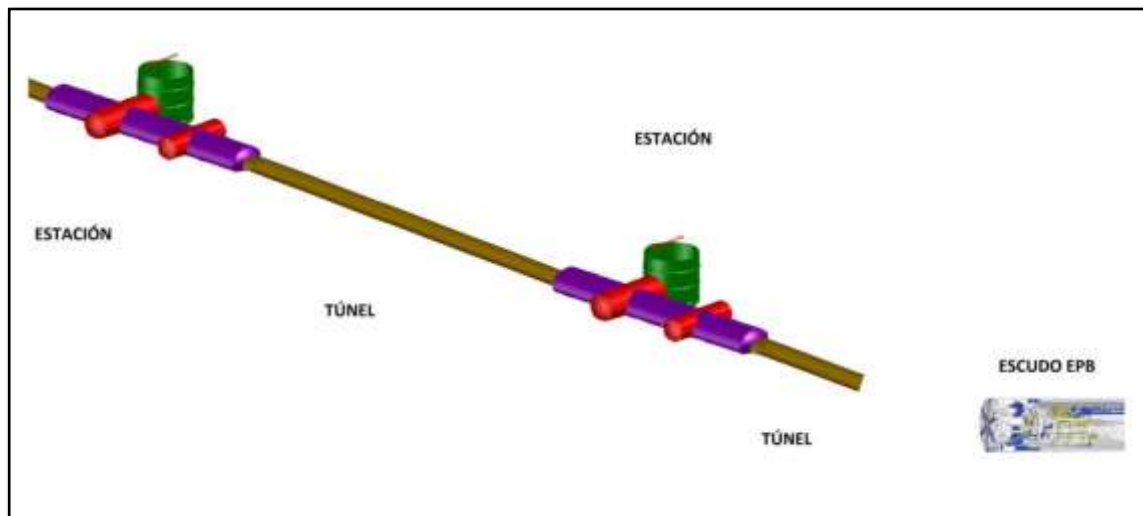


Figura 23: Esquema de avance de una máquina tuneladora [18]

3.4 Comparación ambos métodos

La construcción de una línea de Metro puede realizarse mediante el método NATM o el uso de máquinas tuneladoras, estos métodos se utilizaron simultáneamente para la primera etapa de 9km de la construcción de la Línea 2 del Metro de Lima, mientras se espera la llegada de dos escudos EPB que construirán los 26 Km restantes [19].

El objetivo principal de ambos métodos es excavar la sección del túnel minimizando los riesgos de inestabilidades y deformaciones en superficie, 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 la tuneladora, que excava la sección completa del túnel aplicando una presión del confinamiento a través del mismo suelo excavado y tratado con aditivos.

Se muestra a continuación diferencias conceptuales en la Tabla 1:

Tabla 1: Comparación de la implementación del método NATM y uso de tuneladora

Concepto	NATM	TUNELADORA
Sistema de sostenimiento	<u>Frente del túnel:</u> Hormigón, anclajes, bulones.	<u>Frente del túnel:</u> Bentonita o material excavado.
	<u>Revestimiento:</u> Hormigón in situ.	<u>Revestimiento:</u> Dovelas prefabricadas.
Sección Transversal	Ovalada, aprox 70m ²	Circular, aprox 80m ²
Eliminación de escombros	Mediante camiones y capachos	Mediante cintas transportadoras
Tipos de secciones	Caverna	Cut and Cover y Caverna
Número de Contratistas	Varios, uno para cada tramo	Pocos, la tuneladora es rentable en tramos largos.

Fuente: Resumen ejecutivo, C.P.S de ingeniería SAC [19].

A continuación se muestran algunos casos del uso del método NATM y del uso de Tuneladoras:



Figura 24: Caso 1 NATM Vs Tuneladoras [20]



Figura 25: Caso 1 NATM Vs Tuneladoras [20]

CAPÍTULO 4: LÍNEA 2 DEL TREN ELÉCTRICO-LIMA

4.1 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 26. 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” [18]:

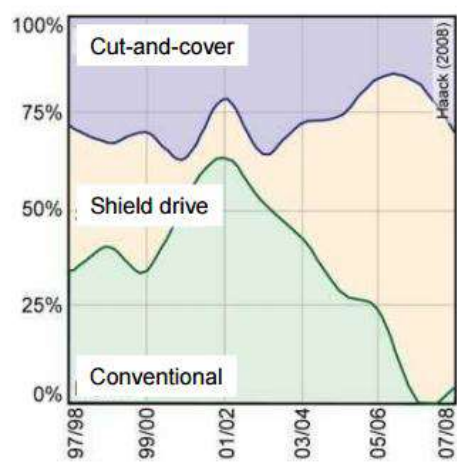


Figura 26: Proporción de diferentes métodos constructivos para túneles de Metro [18]

4.1.1 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” [18].

“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.” [18].

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 [6].

En la Tabla 2 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.

Tabla 2: Tuneladoras EPB que trabajaron en la ampliación del Metro de Madrid.

Tuneladora	Tipo	Diámetro [m]	Rendimiento promedio [m/mes]	Long exc [m]	Rendimiento o 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	

Fuente: Túneles y obras subterráneas ,2010 [6].

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.

4.1.2 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 [6]. A continuación en la Tabla 3 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” [18]:

Tabla 3: Líneas de Metro proyectadas y en construcción en Latinoamérica

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

Fuente: Túneles y obras subterráneas ,2010 [6].

Sin ir más lejos, el año 2013 en el *Seminario Metro en Curitiba – Contribuciones de la Ingeniería*, se presentaron los gráficos de la Figura 27, 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 [6].

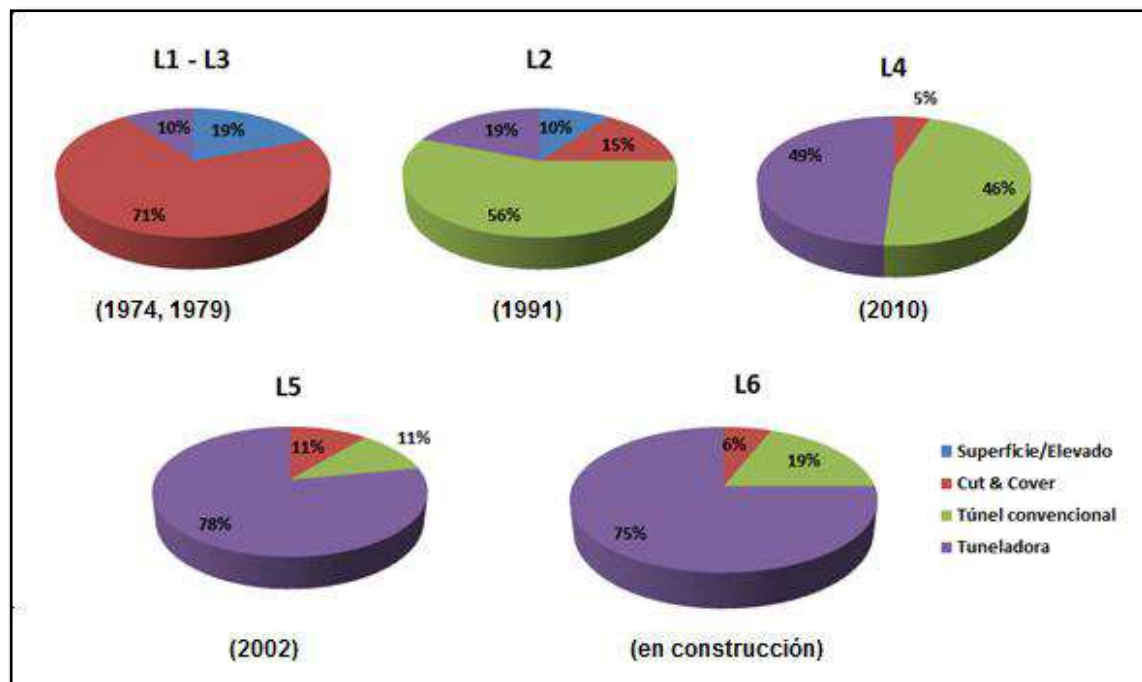


Figura 27: Porcentajes de utilización de distintos métodos constructivos en la construcción del metro de Sao Paulo, Brasil (Rocha, 2013).

4.1.3 Experiencia en Perú

“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” [18].

Aproximadamente en un plazo 5 años y con una inversión de US\$5.400 millones, el proyecto incluye [18]:

- 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” [18].

“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 ensamblarán bajo tierra y se prepararán 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” [18].

“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” [18].

En la figura 28 y 29 se muestran avance de los trabajos de la Línea 2 del Metro de Lima.



Figura 28-29: Avance de la Línea 2 del Metro de Lima [21]

4.2 Selección de Tuneladora para los suelos de Lima

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.

4.2.1 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 [21]:

- Topografía y 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

a) Estudios topográficos

El desarrollo de los trabajos de Topografía constituye una de las partes más importantes de un Estudio de Ingeniería, por cuanto sobre la base de ella, se desarrollarán las demás actividades de las otras especialidades, por lo tanto, su ejecución se torna crítica por cuanto un atraso en esta actividad puede significar un incumplimiento de la programación del Estudio.

Los Estudios Básicos de Ingeniería para este trazo preliminar han sido contratados por la AATE (Autoridad Autónoma del Sistema Eléctrico de Transporte Masivo de Lima y Callao) y han sido desarrollados por la Empresa Asesores Técnicos Asociados S.A. entre mayo y setiembre del 2011.

El Decreto Supremo N° 059-2010-MTC señala que la Red Básica del Metro de Lima aprobada, permite definir cuencas de intervención, en el ámbito de ejes viales para el desarrollo de estudios base y de ingeniería para la definición de los trazos finales, localización de estaciones y áreas de reservas para líneas que lo componen.

En este sentido, la AATE evaluó una alternativa de trazo a la planteada en la Red Básica, la cual es como sigue: Avenida Víctor Raúl haya de la Torre (Carretera Central), Avenida Nicolás Ayllón, Calle Junín, Avenida Grau, Avenida 9 de Diciembre, Avenida Arica, Avenida Arica, Avenida Venezuela, Avenida Germán Amézaga, Avenida Oscar R.

Benavides (Colonial) y Avenida Guardia Chalaca. Asimismo se considera priorizar la implementación del tramo de acceso al Aeropuerto Jorge Chávez (Línea 4 de la Red Básica), que va por la Avenida Elmer Faucett entre la Avenida Oscar R. Benavides (Colonial) y Avenida Néstor Gambeta.

Asimismo, AATE ha contratado los servicios de CPS de Ingeniería S.A.C., para la Elaboración de los Estudios de Topografía y Geodesia de la alternativa de trazo de la Línea Este-Oeste, los mismos que han sido agrupados en tres (03) tramos de estudio, siendo los siguientes en la tabla 4 [19]:

Tabla 4: Tramos de estudio

N°	Inicio	Fin	Ejes viales materia del Estudio	Longitud (Km)
1	Av. Nicolás Ayllón	Plaza Bolognesi	Calle Junín, Av. Grau, Av. 9 de Diciembre	4.50
2	Av. Venezuela	Av. Guardia Chalaca	Av. Germán Amézaga, Av. Oscar R. Benavides (Colonial)	6.00
3	Av. Venezuela	Av. Néstor Gambeta	Av. Elmer Faucett	8.20
				18.70

Fuente: Resumen ejecutivo, C.P.S de ingeniería SAC [19].

- El Tramo N° 01; se inicia en la Av. Nicolás Ayllon y finaliza en la Plaza Bolognesi, según la trayectoria indicada en la figura 30:



Figura 30: Tramo 1, estudio topográfico [22]

La trayectoria propuesta de 4.5 km, involucra los distritos de El Agustino, La Victoria y Lima Cercado en la Provincia de Lima. En dicho propuesta del eje se han establecido 04 Estaciones ubicadas según la tabla 5:

Tabla 5: Ubicación de estaciones Tramo 1

N°	Estación	Ubicación
1	Grau	Av. Aviación
2	Almenara	Jr. Cangallo
3	Abancay	Av. Abancay
4	Central	Paseo de la República

Fuente: Tramo 1, estudios topográficos, Resumen ejecutivo [22].

- El **Tramo N° 02**; se inicia en la Av. Venezuela y finaliza en la Av. Guardia Chalaca, según la trayectoria indicada en la figura 31:



Figura 31: Tramo 2, estudio topográfico [23]

La trayectoria propuesta de 6.0 km, involucra los distritos de Lima Cercado, Bellavista, Callao. En dicho propuesta del eje se han establecido 06 Estaciones ubicadas según la tabla 6:

Tabla 6: Ubicación de estaciones Tramo 2

N°	Estación	Ubicación
1	San Marcos	Av. Ramón Herrero
2	Oscar Benavides	Ca. Jorge Chávez
3	San José	Av. Elmer Faucett
4	Insurgentes	Av. Los Insurgentes
5	Juan Pablo II	Av. Santa Rosa
6	Callao	Av. Palacios

Fuente: Tramo 2, estudios topográficos, Resumen ejecutivo [23].

- El Tramo N° 03; se inicia en la Av. Venezuela y finaliza en la Av. Néstor Gambeta, según la trayectoria indicada en la figura 32:

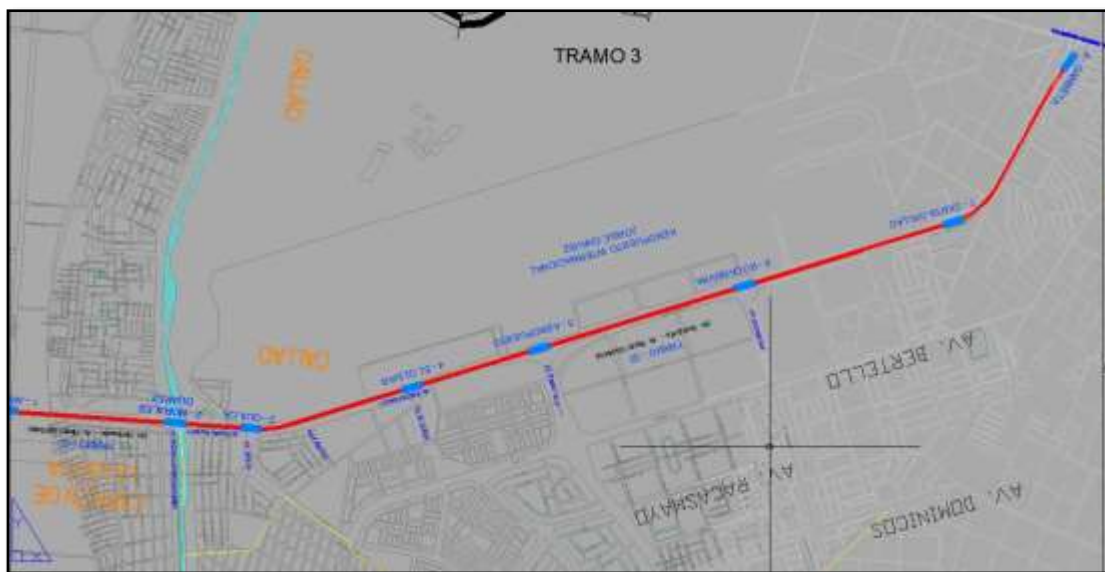


Figura 32: Tramo 3, estudio topográfico [24]

La trayectoria propuesta de 8.0 km, involucra los distritos de Callao, Bellavista, Carmen de la Legua. En dicho propuesta del eje se han establecido 08 Estaciones ubicadas según la tabla 7:

Tabla 7: Ubicación de estaciones Tramo 3 [36]

N°	Estación	Ubicación
1	Argentina	Av. Argentina
2	Vicente Morales	Av. Vicente Morales Suárez
3	Quilca	Av. Argentina
4	El Olivar	Av. El Olivar
5	Aeropuerto	Av. Tomas Valle
6	Bocanegra	Av. Bocanegra
7	Canta Callao	Av. Canta Callao
8	Gambeta	Av. Gambeta

Fuente: Tramo 2, estudios topográficos, Resumen ejecutivo [24].

El Estudio también comprende el levantamiento topográfico de 03 patios ubicados en:

➤ **Terreno N° 1 (Callao)**

Ubicación: AV. ELMER FAUCETT S/N - CALLAO (AEROPUERTO INTERNACIONAL JORGE CHAVEZ). Ver figura 33.

Área: 25.6 Has.

Características: DESOCUPADO, CERCADO, SIN EDIFICACION

Predios colindantes: LIMA AIRPORT PARTNERS S.R.L. (LAP) FUERZA AEREA DEL PERU – GRUPO AEREO N° 2

Titular: MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES
MINISTERIO DE DEFENSA (FUERZA AEREA DEL PERU)



Figura 33: Terreno N° 1 [25]

➤ **Terreno N° 2 (Barbones)**

Ubicación: JR. ALFONSO UGARTE – ENTRE JR. JUNIN Y JR. LLAMELLIN (EL AGUSTINO). Ver figura 34.

Área: 12.7 Has.

Características: OCUPADO, CERCADO, CON EDIFICACION

Predios colindantes: CUARTEL BARBONES

Titular: MINISTERIO DE DEFENSA



Figura 34: Terreno N° 2 [26]

➤ **Terreno N° 3 (Huachipa)**

Ubicación: AUTOPISTA RAMIRO PRIALE KM. 7.5 – HUACHIPA. Ver figura 35.

Área: 17.7 Has.

Características: DESOCUPADO, CERCADO, SIN EDIFICACION

Predios colindantes: SCANIA, HYUNDAI CAMIONES

Datos empresa de contacto:

Nombre

Compass Group Sociedad Administradora de Fondos de Inversion S.A.

Domicilio Legal

Amador Merino Reyna 267, Piso 11; San Isidro; Lima; LIMA 27



Figura 35: Terreno N° 3 [27]

La recopilación de información para realizar los trabajos topográficos fueron proporcionado por AATE (Autoridad Autónoma del Sistema Eléctrico de Transporte Masivo de Lima y Callao) e IGN(Instituto Geográfico Nacional) y consistía en lo siguiente ^[19]:

- Plano digital de Trazo alternativo de la Línea 2.
- Plano Vitarte 1:5000
- Plano Los Angeles 1:5000
- 14 Hojas del IGN para BMs

Asimismo, a través de AATE se brindó la siguiente información en formato pdf para su empleo en la ubicación de las interferencias:

- Fibra Optica (en formato dwg)
- Calidda (en formato pdf)
- Sedapal (en formato dwg)
- Claro (en formato pdf)
- Edelnor (en formato pdf)
- Edelsur (en formato dwg)
- Telefónica (en formato pdf)

Durante el desarrollo del Estudio y en coordinación con AATE se establecieron coordinaciones con los diversos instituciones Públicas y Privadas para el correspondiente ingreso a sus instalaciones. Asimismo, en el caso de los Municipios se realizaron coordinaciones para informar sobre las actividades a desarrollar en su jurisdicción y su correspondiente apoyo con sus servicios de seguridad ciudadana ^[21].

Luego de establecer y ubicar los puntos de control horizontal y vertical, en paralelo, se realizó la nivelación de los hitos y BMs, para posteriormente realizar el establecimiento de la poligonal de apoyo en los tres tramos.

Con el establecimiento de la poligonal se realizó el levantamiento del relleno topográfico. Para ello, se constituyó 07 brigadas, tres de ellas dedicadas al relleno de la topografía en la vía principal del proyecto y las otras tres a cada lado de los interiores dedicados al levantamiento dentro de los 200m. a cada lado del eje solicitado en los Términos de Referencia. La 7ma brigada fue empleada para el levantamiento de los Patios ^[21].

Para el Tramo 1, el trabajo se realizó iniciando desde el hito GPS 1 ubicado al costado derecho de la avenida Nicolás Ayllón cercano a su intersección con la avenida 28 de Julio, en la parte delantera de una gruta de la Virgen, según se indica en la descripción de los hitos geodésicos para concluir en la hito GPS 6 ubicado en la Plaza Bolognesi.

Para el Tramo 2, el trabajo se inició en el GPS 12 ubicado, en la intersección de las avenidas Guardia Chalaca con la avenida Sáenz Peña terminando en el Hito GPS 7.

Y en el Tramo 3 el trabajo se inicia con el Hito GPS 14 ubicado en la intersección de las avenidas Elmer Faucett con Venezuela y terminando en el Ovalo 200 mMillas en intersección de las avenidas Elmer Faucett con Nestor Gambeta.

Durante el trabajo de topografía se requirió el apoyo de la Policía Nacional con 06 Oficiales de la Policía Nacional y adicionalmente a un Oficial contratado para la brigada de los Patios, con lo cual se evitó los posibles robos de los equipos (ver figura 36). Asimismo, facilitan la ejecución de las actividades por el constante tráfico peatonal y vehicular existente (ver figura 37).

Finalmente, se ha realizado el levantamiento de las tres alternativas de patios señalados líneas más arriba y el levantamiento en la zona de cruce con el río Rímac, el levantamiento comprende la estructura existente del Puente y el cauce del río desde 200 m aguas arriba del puente hasta 200m aguas abajo no se pudo avanzar más distancia debido al impedimento de personas de mal vivir que hostilizaban el trabajo.



Figura 36: Apoyo de la Policía Nacional [28]



Figura 37: Apoyo de la Policía Nacional [29]

b) Estudios de suelos, geológicos, geotécnico, hidrogeológico y geodinámico

Para la preparación de los estudios de las condiciones geológicas, hidrogeológicas, geotécnicas y geodinámica (riesgo sísmico y tsunami) de la Línea 2 del METRO y el ramal de la Línea 4 se han analizado detalladamente la Formación de la Grava de Lima y del basamento rocoso a lo largo de los acantilados de la costa y en el centro de la ciudad a lo largo del cauce del Río Rímac. Esta fase de diseño ha sido también soportada por una completa búsqueda de bibliografía técnica disponible [21].

A continuación se presentan, con un enfoque dirigido a la descripción actual del contexto, las condiciones geológicas, hidrogeológicas, geotécnicas y geodinámica (riesgo sísmico y tsunami) de los ejes de las líneas 2 y 4.

-Contexto Geológico:

El recorrido de la Línea 2 (Este-Oeste) del Sistema Eléctrico de Transporte Masivo de Lima y Callao se extiende desde el Ovalo Garibaldi en el Callao (elevación alrededor de 10 m.s.n.m.), hasta la Municipalidad de Ate (elevación alrededor de 360 m.s.n.m) en el extremo Este de la línea. El recorrido de la Línea 4 se extiende desde la avenida Néstor Gambeta en el Callao, hasta la Línea 2 (Avenida Oscar Benavides).

Los dos recorridos, geológicamente pasan por depósitos aluviales del cuaternario reciente y depósitos del cuaternario pleistoceno que forman el Cono Deyectivo del río Rímac (Línea 2 y 4) del Rio Chillón (Línea 4) [21].

-Investigaciones geotécnicas ejecutadas:

Ha sido realizada una campaña de investigaciones para el “Estudios Básicos de Ingeniería para la línea del Sistema Eléctrico de transporte masivo de Lima – Callao” en la que se realizaron investigaciones a lo largo de la línea Este-Oeste. Las estaciones objeto de las investigaciones, listadas en la tabla 8 que se muestra a continuación y se han agrupados en dos macro grupos de investigaciones. El primero investigó el tramo entre Ovalo Garibaldi hasta Av. 28 de julio pasando por Plaza Bolognesi, el segundo el tramo comprendido entre Av. 28 de julio y la Municipalidad de ATE [21].

Tabla 8: Estaciones proyectadas - Tramo I y II

TRAMO	Nº	Estación	Ubicación
TRAMO I	1	Puerto del Callao	Ovalo Garibaldi
	2	Buenos Aires	Av. Buenos Aires
	3	Ovalo La Perla	Av. Santa Rosa
	4	Haya de la Torre	Av. Haya de la Torre
	5	Venezuela	Av. Faucett
	6	Ciudad Universitaria	Av. Universitaria
	7	La Alborada	Av. La Alborada
	8	Tingo María	Av. Tingo María
	9	Parque Murillo	Av. Bolivia
	10	Plaza Bolognesi	Plaza Bolognesi
	11	Estadio Nacional	Vía Expresa
	12	Plaza Manco Capac	Av. Manco Capac
	13	Cangallo	Jr. Cangallo
	14	28 de Julio	Av. 28 de Julio
	15	Nicolás Ayllón	Ovalo Garibaldi
	16	Circunvalación	Av. Buenos Aires

TRAMO	N°	Estación	Ubicación
TRAMO II	17	San Juan de Dios (Nicolás)	Av. Santa Rosa
	18	Puente Huascar	Av. Haya de la Torre
	19	Ovalo Santa Anita	Av. Faucett
	20	Colectora Industrial	Av. Universitaria
	21	Emilio Valdizan	Av. La Alborada
	22	Mercado Santa Anita	Av. Tingo María
	23	Vista Alegre	Av. Bolivia
	24	Prol. Javier Prado	Plaza Bolognesi
	25	Municipalidad de Ate	Vía Expresa

Fuente: Estaciones proyectadas- Tramo I y II, resumen ejecutivo [30].

Los trabajos incluyeron la realización de calicatas y perforaciones rotativa para investigar el subsuelo, la recuperación de muestras de suelos y agua, la realización de ensayos de campo (Ensayos de permeabilidad Tipo Lefranc, Ensayo Cono Dinámico Tipo Peck, Ensayo de Penetración Estándar SPT, Carga directa y Densidades de campo), la realización de ensayos de laboratorio y la realización de investigaciones geofísicas; sísmica a refracción e sísmica tipo MASW.

-Contexto Hidrogeológico

Desde el punto de vista del nivel freático, solo se ha encontrado en las partes bajas de los tramos iniciales de las Líneas 2 y 4.

Particularmente, en la parte inicial del tramo de la Línea 2, en topografía baja ha sido encontrado el nivel freático en profundidades de 2,0m, 12,10m y 8,3m, respectivamente, y principalmente en las calicatas y sólo en una perforación diamantina (P-02A) en el área de Callao. Al igual se ha encontrado en la parte baja de la Línea 4, particularmente por debajo de la cota 30,0 msnm, en la cuál ha sido encontrado el nivel freático a una profundidad de 4,2m en una calicata. En todas las otras zonas del proyecto, no ha sido encontrado ni medido el nivel freático.

Con respecto a la hidrogeología de las otras partes del proyecto, en los depósitos aluviales del Valle del Río Rímac, de acuerdo a los datos de Sedapal, durante la década de los ochentas, la profundidad de las aguas subterráneas en los distritos del Cercado de Lima y La Victoria ya se había situado por debajo de los 50 m de profundidad, en los noventas estaba por debajo de los 70 m de profundidad, mientras que en la década pasada del presente siglo, la napa ya había alcanzado los 100 m de profundidad, estando ambos distritos entre los distritos con mayor napa deprimida por la elevada sobreexplotación de aguas subterráneas para fines de uso de agua potable para la población y la industria [21].

-Contexto Geodinámico

En los estudios previos básicos se determinaron los niveles de la actividad sísmica que ocurre dentro del área de influencia sísmica, las aceleraciones que pueden presentarse y el riesgo que éstas presentan a lo largo de la línea 2 y la línea 4. Inicialmente, se ha revisado un análisis completo de catálogos sísmicos existentes, además de revisar también algunos informes sobre sismotectónica, sismológicos y geológicos pertinentes.

En las obras civiles en la Ciudad de Lima, dos son los temas principales de análisis de evaluación de riesgos físicos por geodinámica interna. El primero referido a los riesgos por Potencialidad de Licuefacción y el segundo a los riesgos por Potencialidad de Amplificación Sísmica, ambos en caso de producirse sismos de escalas destructivas. En cuanto al Potencial de Licuefacción se circunscribe a áreas constituidas por suelos eólicos, lacustrinos y pantanosos en donde se depositaron suelos de arenas mal gradadas, limo-arenas, limos, arcillas expansivas, con presencia de la napa freática cercana hacia la superficie, condiciones bajo las cuales durante los sismos se pueden producir asentamientos y hundimientos de obras civiles. Las áreas con tales características corresponden al sector Distrito de La Molina en el sector de Rinconada de Lago, y en el Litoral de los Distritos de Lurín, Chorrillos, el Callao y Ventanilla [21].

b) Trazado del Proyecto

En el presente estudio se presentan los diseños básicos del trazado en planimetría para la alternativa seleccionada como óptima para el desarrollo de la Línea 2 y Línea 4 (ramal aeropuerto) y ramales de acceso a los patios de maniobra.

Los parámetros utilizados en el desarrollo de estos diseños fueron los indicados en los documentos Bases del proyecto, el reglamento Nacional del sistema Eléctrico de Transporte de Pasajeros y apoyados también en normativa Europea [21].

La Línea 2 de la Red Básica del Metro de Lima, que conecta los distritos del Este de Lima (Ate, Santa Anita) con los del centro de Lima y Callao (eje Este-Oeste), sirve de complemento y se integra a la Línea 1 del Metro de Lima (Villa El Salvador - San Juan de Lurigancho) y Línea 1 del Metropolitano (Chorrillos - Independencia) que tiene recorridos Sur-Norte.

El tramo de la Línea 4 del Metro conecta la zona de los barrios adyacentes al Aeropuerto Internacional Jorge Chávez con el sistema masivo de transporte de la ciudad, por la Av. Elmer Faucett desde la Av. Néstor Gambetta hasta el distrito de Bella Vista en la Provincia de Callao. Ver figura 38.

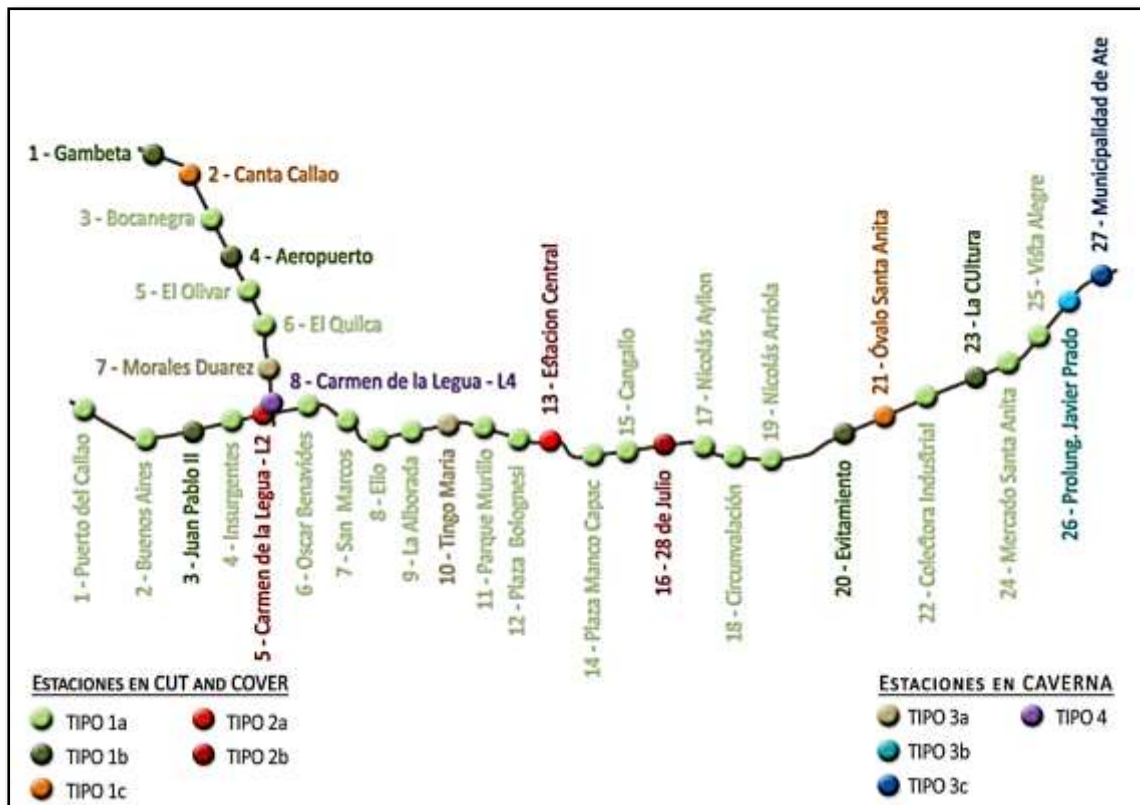


Figura 38: Líneas 2 y 4 del Metro de Lima [31]

-Parámetros principales de diseño:

Los diseños fueron basados en reglamentación Peruana principalmente con apoyo en normas Europeas. Los parámetros básicos de diseño fueron los siguientes [19]:

- Velocidad de diseño 80 Km/h
- La trocha considerada fue de 1435 mm.
- La entrevía mínima considerada fue de 3,80 metros en línea y 4,00 metros en estación.
- El perfil de la línea se consideró con una pendiente máxima de 3,5%.
- En el trazado de la línea se consideró radios superiores a los 250 m. en la vía principal y 90 m en los patios.
- El radio mínimo considerado para las curvas verticales fue de 3.000 m.
- Sobre elevación máxima en curvas de 160 mm.
- La aceleración no compensada inferior a 0,90 m/s².
- Sobre elevación gradual que no excede los 3 mm/m
- Las estaciones, las vías de maniobra y de terminal quedaron en horizontal o en pendiente no mayor a 0,5%, en cambio las vías de estacionamiento quedarán en pendiente no mayor de 0,15%, para evitar la deriva de un tren cuyos frenos no estén activos.
- Las estaciones se localizaron guardando una distancia entre ellas del orden de 50 m. entre su extremo y el inicio de la pendiente más cercana.

-Diseño de los Trazados:

El recorrido de las líneas se ha desarrollado en base a los factores descritos anteriormente. En particular, la topografía se ha estudiado en relación con estos parámetros, su impacto en las estructuras existentes (arqueología, servicios subterráneos y edificios) y las necesidades de los estudios realizados, a fin de crear una interacción entre todos estos para mejorar la comodidad y seguridad de los pasajeros, y para cumplir los requisitos necesarios para el mantenimiento de las obras [19].

Las características principales del trazado presentado en este informe, son las siguientes:

LINEA 2

Longitud de la línea	27,06 Km
Número de estaciones	27 (2 terminales, 22 de Paso, 3 de conexión)
Terceras Vías	3
Patios-Taller	1
Pozos de Ventilación	26
Pozos de emergencia	1

LINEA 4

Longitud de la línea	7,66 Km
Número de estaciones	8 (2 terminales, 5 de Paso, 1 de conexión)
Terceras Vías	0
Patios-Taller	1
Pozos de Ventilación	7
Pozos de emergencia	0

Adicionalmente cuenta con dos ramales de acceso y salida a los Patios-Taller de aproximadamente 1 km cada uno.

Para la realización de los trazados en topografía para las diferentes soluciones se tuvo en cuenta adicionalmente a la normatividad las siguientes consideraciones [19]:

- Evitar el paso por debajo de Puentes y estructuras importantes.
- Evitar el paso por debajo de edificaciones existentes y principalmente de edificaciones de gran importancia (Hospitales, escuelas, Patrimonio Histórico, entre otros).
- La ubicación de las estaciones en tramos rectilíneos.
- La tercera vía fue ubicada en tramos rectos con pendientes no superiores al 0.15%
- Se ajustó el trazado de acuerdo a las medidas requeridas para las estaciones tipológicamente ya definidas.

A continuación se describirán las dimensiones de algunas características típicas adoptadas [21]:

-*Cambiavía.*- Los cambios para todas las vías principales y patios de maniobra se realizan con una relación de 1:12 dando una longitud de desarrollo de aprox. 54m dependiendo de la separación de las vías.

-*Túnel en Estaciones Terminales.*- En las estaciones extremas se ha considerado una prolongación de las vías después de las mismas para maniobras y estacionamiento de trenes de longitud igual a 240 m. Esto aplica para la Línea 2 y Línea 4. Ver figura 39 ,40 y 41.

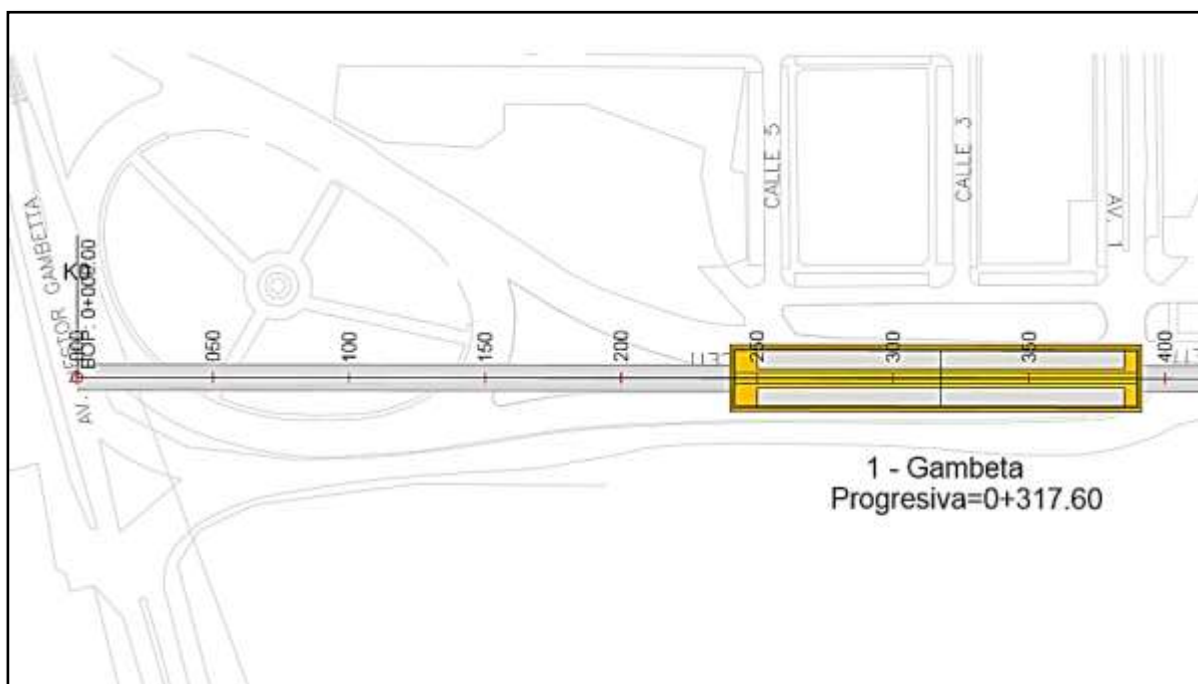


Figura 39: Espacio de aparcamiento de trenes después de estaciones terminales –Estación Gambeta [32].

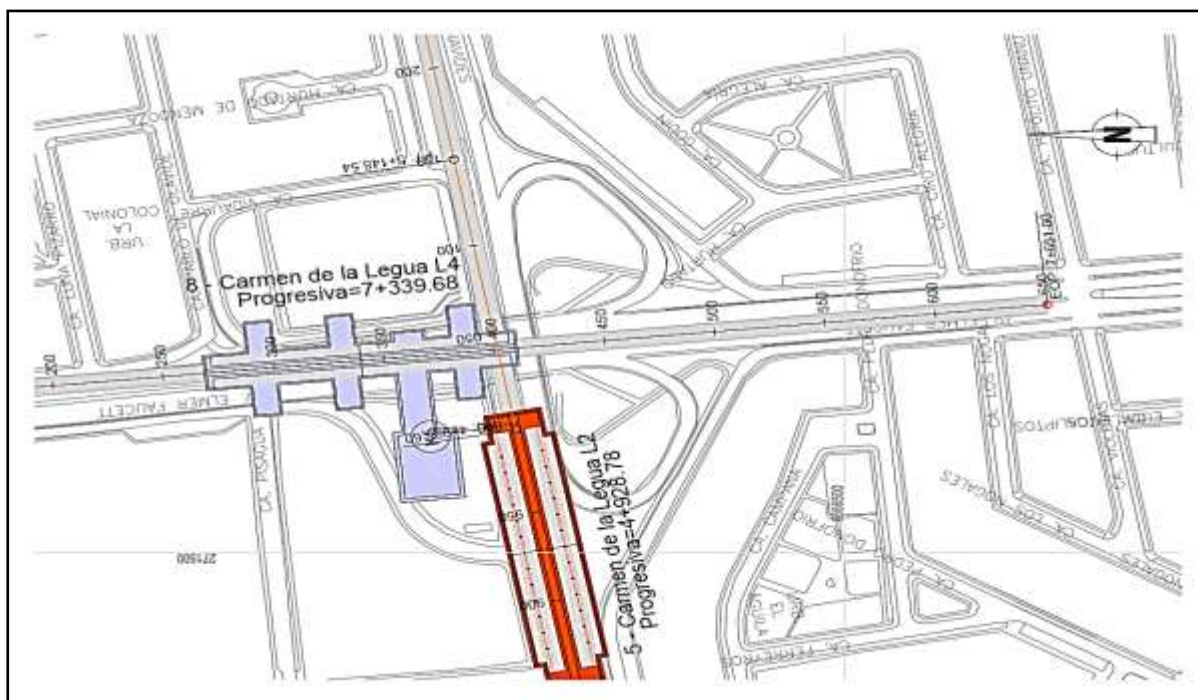


Figura 40: Espacio de aparcamiento de trenes después de estaciones terminales –Estación Carmen de la Legua- Línea 4 [33].

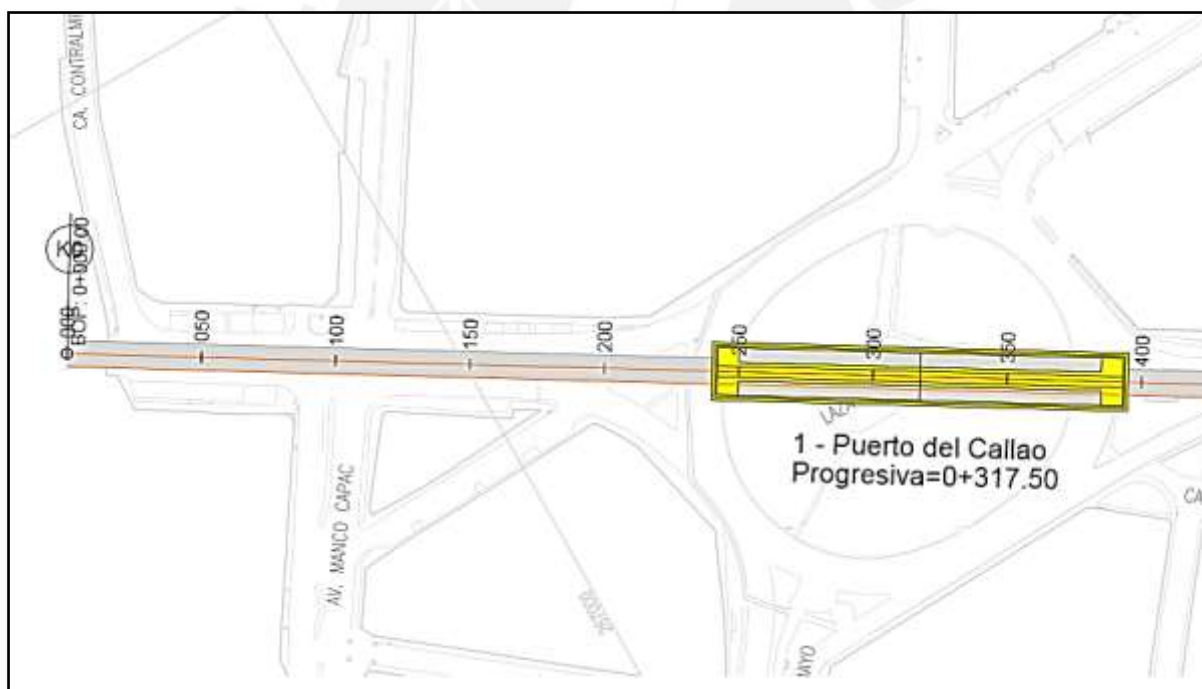


Figura 41: Espacio de aparcamiento de trenes después de estaciones terminales –Estación Puerto Callao [34].

Esta medida fue adoptada considerando el espacio necesario para un cambiavía, el tope de tren y la longitud del material rodante

En la estación final de la línea 2, es decir, Estación Municipalidad de ATE, se diseñó con una longitud de 270 m considerando un espacio adicional de 30m como holgura para posibles áreas de depósito de herramienta menor y reparaciones menores, como muestra la figura 42. Esto no significa que sea un área de mantenimiento general ya que éstas se realizarán en los patios correspondientes [21].

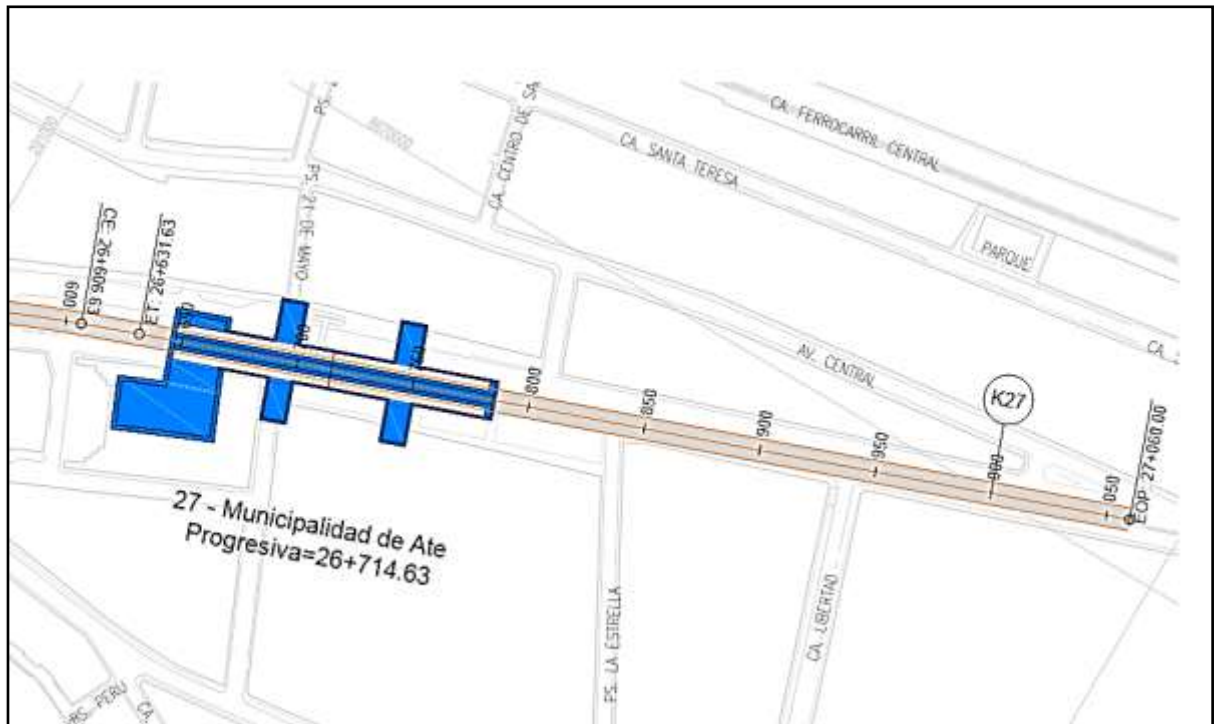


Figura 42: Espacio de aparcamiento de trenes después de estaciones terminales- Estación Municipalidad de Ate [35].

-Tercera vía.- Se ha dispuesto de tres (3) zonas de aproximadamente 430m de longitud de estacionamiento temporal o para maniobras distanciados 5.2Km, 5.1 Km, 7.9Km y 7.8 km respectivamente, considerando una zona en recta y con pendiente de 0,15%. Para el dimensionamiento de la tercera vía se consideró el aparcamiento de 2 trenes y el sistema de cambiavía en ambos sentidos.

-Ubicación de las estaciones.- Se consideraron principalmente los siguientes parámetros (en relación al trazado geométrico).

- Ubicación en tramos rectilíneos.
- En su mayoría con cercanía a posibles áreas para montaje de áreas de trabajo e implantación de accesos y salidas.
- Ubicación en parques y/o áreas públicas.
- Evitar al máximo el cierre de calles

- Evitar la cercanía a grandes estructuras
- Evitar expropiaciones

A continuación se muestran en las tablas 9 y 10 las ubicaciones de las estaciones con su progresiva y tipología correspondiente:

Tabla 9: Ubicación estaciones Línea 2

ID	ESTACION	PROGRESIVA	DISTANCIA	METODOLOGÍA DE CONSTRUCCIÓN	TIPO
1	Puerto del Callao	0+317.50	1 625.83	CUT & COVER	TIPO 1b
2	Buenos Aires	1+943.33	1 121.05	CUT & COVER	TIPO 1a
3	Juan Pablo II	3+064.38	996.90	CUT & COVER	TIPO 1b
4	Insurgentes	4+061.28	867.50	CUT & COVER	TIPO 1a
5	Carmen de la Legua L2	4+928.78	1 082.02	CUT & COVER	TIPO 2a
6	Oscar Benavides	6+010.80	939.72	CUT & COVER	TIPO 1a
7	San Marcos	6+950.52	875.62	CUT & COVER	TIPO 1b
8	Elio	7+826.14	873.18	CUT & COVER	TIPO 1a
9	La Alborada	8+699.32	850.48	CUT & COVER	TIPO 1a
10	Tingo María	9+549.80	869.83	CAVERNA	TIPO 3a
11	Parque Murillo	10+419.63	929.81	CUT & COVER	TIPO 1b
12	Plaza Bolognesi	11+349.44	705.32	CUT & COVER	TIPO 1a
13	Estación Central	12+054.76	1 194.82	CUT & COVER	TIPO 2b
14	Plaza Manco Capac	13+249.58	790.45	CUT & COVER	TIPO 1a
15	Cangallo	14+040.03	838.34	CUT & COVER	TIPO 1a
16	28 de Julio	14+878.37	951.59	CUT & COVER	TIPO 2b
17	Nicolás Ayllón	15+829.96	852.19	CUT & COVER	TIPO 1a
18	Circunvalación	16+682.15	828.72	CUT & COVER	TIPO 1b
19	Nicolás Arriola	17+510.87	1 900.83	CUT & COVER	TIPO 1a
20	Evitamiento	19+411.70	1 059.44	CUT & COVER	TIPO 1b
21	Ovalo Santa Anita	20+471.14	1 045.66	CUT & COVER	TIPO 1c
22	Colectora Industrial	21+516.80	1 237.15	CUT & COVER	TIPO 1b
23	La Cultura	22+753.95	805.89	CUT & COVER	TIPO 1b

2 4	Mercado Santa Anita	23+559.84	1014.99	CUT & COVER	TIPO 1a
2 5	Vista Alegre	24+574.83	1102.02	CUT & COVER	TIPO 1a
2 6	Prolong. Javier Prado	25+676.85	1 037.78	CAVERNA	TIPO 3b
2 7	Municipalidad de Ate	26+714.63	-	CAVERNA	TIPO 3c

Fuente: Ubicación de estaciones, resumen ejecutivo [36].

Tabla 10: Ubicación estaciones Línea 4

ID	ESTACION	PROGRESIV A	DISTANCI A	METODOLOGÍA DE CONSTRUCCIÓN	TIPO
1	Gambeta	0+317.60	1 086.99	CUT & COVER	TIPO 1b
2	Canta Callao	1+404.59	1 124.91	CUT & COVER	TIPO 1c
3	Bocanegra	2+529.50	1 034.08	CUT & COVER	TIPO 1a
4	Aeropuerto	3+563.58	856.86	CUT & COVER	TIPO 1b
5	El Olivar	4+420.44	928.93	CUT & COVER	TIPO 1a
6	Quilca	5+349.37	1 021.68	CUT & COVER	TIPO 1a
7	Morales Duarez	6+371.05	968.63	CAVERNA	TIPO 3a
8	Carmen de la Legua L4	7+339.68	-	CAVERNA	TIPO 4

Fuente: Ubicación de estaciones, resumen ejecutivo [36].

-Pacios-Taller.- Se ubicaron 2 Patios –Taller, como muestra la figura 43 y 44, ubicados cerca a las estaciones Mercado Santa Anita para la Línea 2 y estación Bocanegra para la Línea 4.

Las siguientes son las principales características respecto al diseño geométrico:

- Aunque la normativa permite radios de curvatura hasta de 70 m en el ingreso y salida se utilizó radio mínimo de 90m.
- La separación entre las vías fue de 3.80m.
- Pendiente máxima longitudinal de 3.5%.
- Los cambiavías se realizaron con una relación de 1:12.

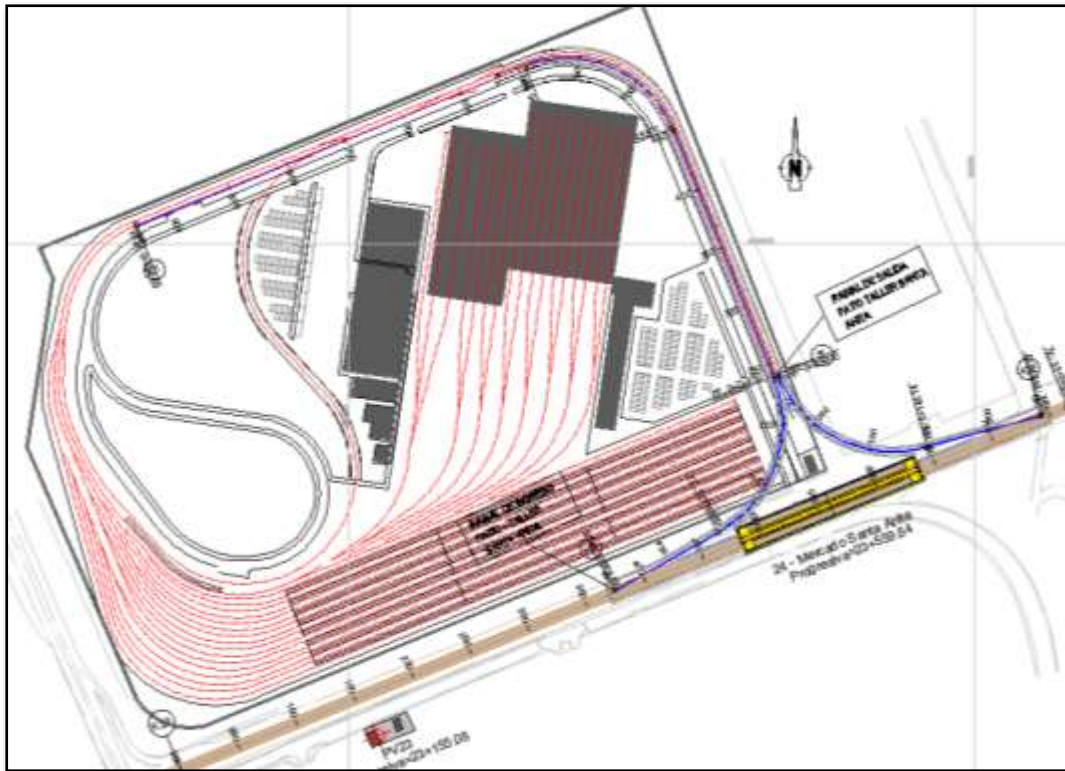


Figura 43: Patio –Taller Santa Anita [37]



Figura 44: Patio –Taller Bocanegra [38]

c) 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 [21]:

- **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.

d) Aditivos

En el caso de que la selección de la tuneladora esté entre el tipo EPB y Slurry, se 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.

e) 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.

f) Estructuras críticas de 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.

g) 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

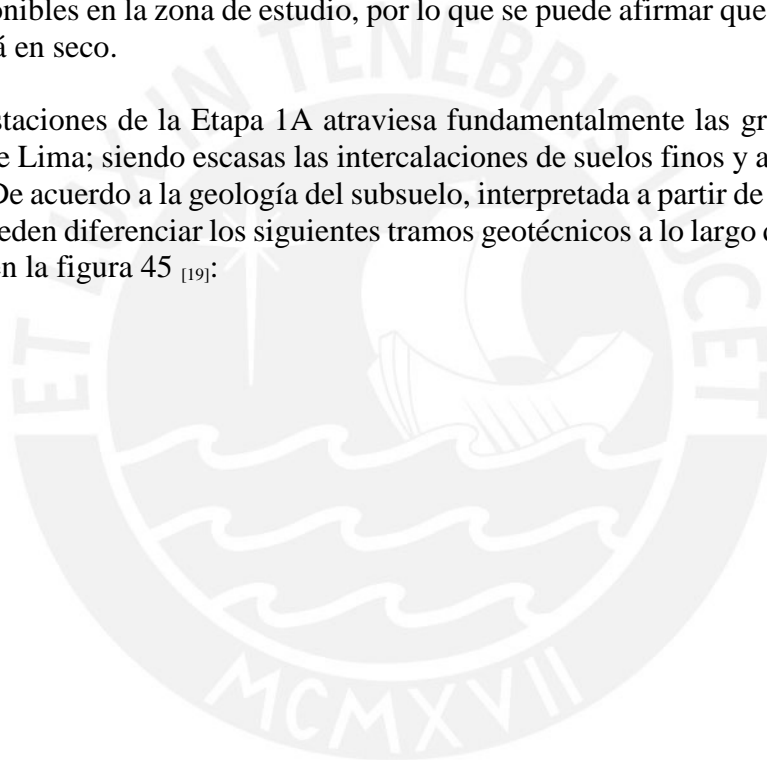
4.2.2 Geología de Lima

De acuerdo con el *Informe Geotécnico Interpretativo de la Etapa 1A*, a lo largo de este tramo de túnel de línea se han reconocido y diferenciado las siguientes unidades geotécnicas [19]:

- *Rellenos antrópicos (R)*, mezcla de suelos poco compactos y contaminados que no se verán directamente afectados por la construcción del túnel.
- *Arcillas inorgánicas* de baja a media plasticidad y limos inorgánicos de baja plasticidad (CL/ML).
- *Arenas limosas (SM)*.
- *Gravas pobremente gradadas* con arena, arcilla y limo (GP-S).

A lo largo del tramo de la etapa 1A, el nivel freático se encuentra muy por debajo de la traza del túnel, no habiendo sido reconocidos niveles de agua en las prospecciones de investigación geotécnica disponibles en la zona de estudio, por lo que se puede afirmar que la excavación del túnel se realizará en seco.

El túnel entre estaciones de la Etapa 1A atraviesa fundamentalmente las gravas arenosas del conglomerado de Lima; siendo escasas las intercalaciones de suelos finos y arenosos presentes a cota de túnel. De acuerdo a la geología del subsuelo, interpretada a partir de las prospecciones realizadas, se pueden diferenciar los siguientes tramos geotécnicos a lo largo del perfil del túnel de la Etapa 1A en la figura 45 [19]:



TRAMO N°	INICIO	FIN	LITOLOGÍA	NIVEL FREÁTICO	VELOCIDAD SÍSMICA
1	Pozo de ventilación PV-19bis (inicio Etapa 1A)	Estación 20 Evitamiento	Gravas arenosas densas (GP-Sf), con abundantes niveles de suelos finos (CL/ML) y arenosos (SM) situados en clave del túnel y escasos en el cuerpo del túnel.	No se detecta.	Vp>1000 m/s Vs≈560 m/s
2	Estación 20 Evitamiento	Pozo de ventilación PV-20	Gravas arenosas densas (GP-Sf).	No se detecta.	Vp>1000m/s Vs=760 m/s
3	Pozo de ventilación PV-20	P.K. 20+340	Gravas arenosas densas (GP-Sf), con niveles de suelos finos (CL/ML) y arenosos (SM) situados en clave del túnel.	No se detecta.	Vp>1000 m/s Vs= 560-760 m/s
4	P.K. 20+340	Estación 21 Óvalo de Santa Anita	Gravas arenosas de consistencia media (GP-Sm) a densa (GP-Sf).	No se detecta.	Vp>1000 m/s Vs=760 m/s
5	Estación 21 Óvalo de Santa Anita	P.K. 21+100	Gravas arenosas densas (GP-Sf), con pequeños niveles de suelos finos (CL/ML) y arenosos (SM) en el cuerpo y la base del túnel.	No se detecta.	Vp>1000 m/s Vs=760 m/s
6	P.K. 21+100	Estación 22 Colectora Industrial	Gravas arenosas densas (GP-Sf).	No se detecta.	Vp>1000 m/s Vs=760 m/s
7	Estación 22 Colectora Industrial	P.K. 21+800	Gravas arenosas densas (GP-Sf).	No se detecta.	Vp>1000 m/s Vs=760 m/s
8	P.K. 21+800	Pozo de ventilación PV-22	Gravas arenosas densas (GP-Sf) con un nivel arenoso (SM) en la base del túnel.	No se detecta.	Vp>1000 m/s Vs=560-760 m/s
9	Pozo de ventilación PV-22	Estación 23 Hermilio Valdizán	Gravas arenosas densas (GP-Sf).	No se detecta.	Vp>1000 m/s Vs=560-760 m/s
10	Estación 23 Hermilio Valdizán	Pozo de ventilación PV-23	Gravas arenosas densas (GP-Sf) con abundantes niveles de suelos finos (CL/ML) y arenosos (SM) en la base del túnel.	No se detecta.	Vp>1000 m/s Vs=560-760 m/s
11	Pozo de ventilación PV-23	Estación 24 Mercado de Santa Anita	Gravas arenosas densas (GP-Sf).	No se detecta.	Vp>1000 m/s Vs=760 m/s
12	Estación 24 Mercado de Santa Anita	Pozo de ventilación PV-24 (fin Etapa 1A)	Gravas arenosas densas (GP-Sf).	No se detecta.	Vp>1000 m/s Vs>560 m/s (muy variable)

Figura 45: Geología de Lima [39]

4.2.3 Máquina tuneladora adecuada para los suelos de Lima.

En lo que respecta a los túneles de línea se tendrá que hacer uso de tecnologías y métodos de construcción que garanticen, en condiciones geológicas, hidráulicas y antrópicas muy complejas, el más alto nivel de seguridad en la ejecución de las obras que se llevarán a cabo principalmente en túnel y en el control de los asentamientos inducidos en la superficie.

Por estas razones, la solución más adecuada y de alto rendimiento es la de excavación mecanizada mediante el uso de máquinas tuneladoras con escudos cerrados, en capacidad de equilibrar las presiones en el frente de excavación del túnel y, por lo tanto, garantizar las condiciones necesarias para la estabilidad del túnel en fase de avance de la excavación. El uso de este tipo de máquinas es también el estado de arte de la técnica en la excavación de túneles de metro en suelos con propiedades pobres, y se confirma mediante una siempre más alta difusión con éxito en todo el mundo.

Será responsabilidad del Concesionario la elección de la tecnología y la máquina de excavación en relación con las condiciones específicas del suelo de Lima. La elección se llevará a cabo en el ámbito de la TBM (Tunnel Boring Machine) que utilizan el sistema de balanceamiento del frente mediante contrapresión de lodo (SS) o de tierra (EPB) para asegurar el avance en todas las condiciones del terreno y en presencia de agua, sin comprometer la estabilidad del frente de excavación [19].

- *TBM tipo EPD-Shield*: tuneladora escudada del tipo “a soporte del frente mediante presión balanceada del terreno”, es decir con cámara de excavación mantenida en presión mediante el mismo material de excavación.
- *TBM tipo Escudo de presión a lodo Slurry Shield (SS)*: tuneladora escudada de tipo a soporte del frente con soporte fluido del frente de excavación a contrapresión de lodo.

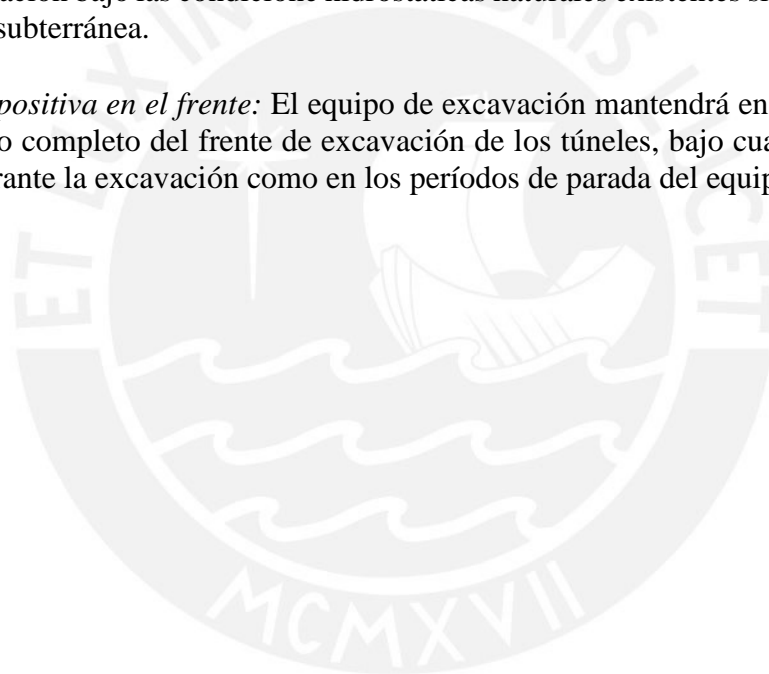
Cabe precisar que las máquinas tuneladoras TBM deber ser nuevas de fábrica.

La definición de la Logística y del patio de obras de la excavación mecanizada, se deberá poner especial atención a puntos tales como [21]:

- Los puntos de origen y llegada de las tuneladoras.
- Métodos de cruce de las estaciones.
- Las áreas de interés para la prefabricación y almacenamiento de las dovelas.
- Las áreas de movimiento del material de excavación y la alimentación de la excavación.

Para la construcción de la Línea 2 del Metro de Lima se realizaron estudios para determinar el tipo de máquina tuneladora adecuada y se concluyeron algunos requisitos mencionados a continuación ^[19]:

- a) *Generales:* El concesionario deberá proveer 4 máquinas tuneladoras excavadoras (TBM) con capacidad para excavar a través de todas las condiciones del suelo y las obstrucciones presentes, instalando en forma continuada y simultánea un sistema de revestimiento construido en una etapa. El equipo de excavación deberá ser compatible con los requerimientos necesarios y deberá diseñarse para asegurar el ritmo de obra previsto en el Programa de Construcción.
- b) *Tipo de máquina:* El equipo de excavación podrá ser del tipo a presión balanceada de tierra (EPB) o a escudo protector con lechada (Slurry Shield), de frente cerrado, debiendo proveer un sostenimiento permanente del frente de los túneles.
- c) *Agua subterránea:* El equipo de excavación se diseñará para resistir y permitir el trabajo de excavación bajo las condiciones hidrostáticas naturales existentes sin deprimir la capa de agua subterránea.
- d) *Presión positiva en el frente:* El equipo de excavación mantendrá en todo momento el equilibrio completo del frente de excavación de los túneles, bajo cualquier condición, tanto durante la excavación como en los períodos de parada del equipo.



4.3 Escudo de Balance de Presión de Tierras – EPB

Tal como se vio en el punto 4.2.3 de este trabajo, el tipo de máquina que aparentemente se adecuaría mejor a las condiciones existentes para la construcción de una nueva línea del Metro de Lima, 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.

4.3.1 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

[19]:

- i. Estabilizar el frente con un material a presión, que es el propio escombro excavado, una vez convertido con productos de adición en una mezcla de consistencia viscoplástica.
- 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 46. 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 escombro 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

[19].

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.

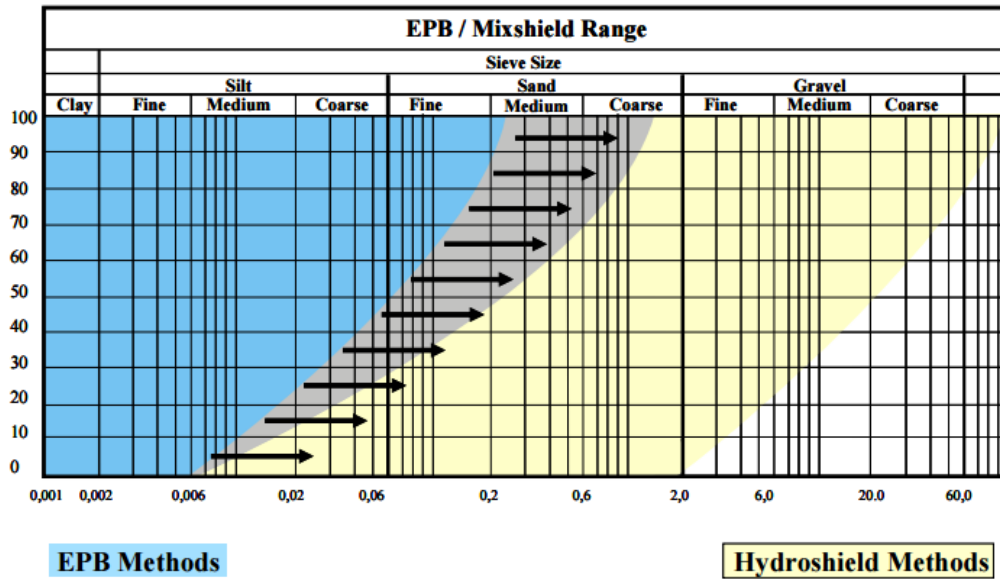


Figura 46: Granulometría de los terrenos y aplicación a los escudos EPB. [40]

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.

4.3.2 Partes del EPB

En la Figura 47 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 [13].

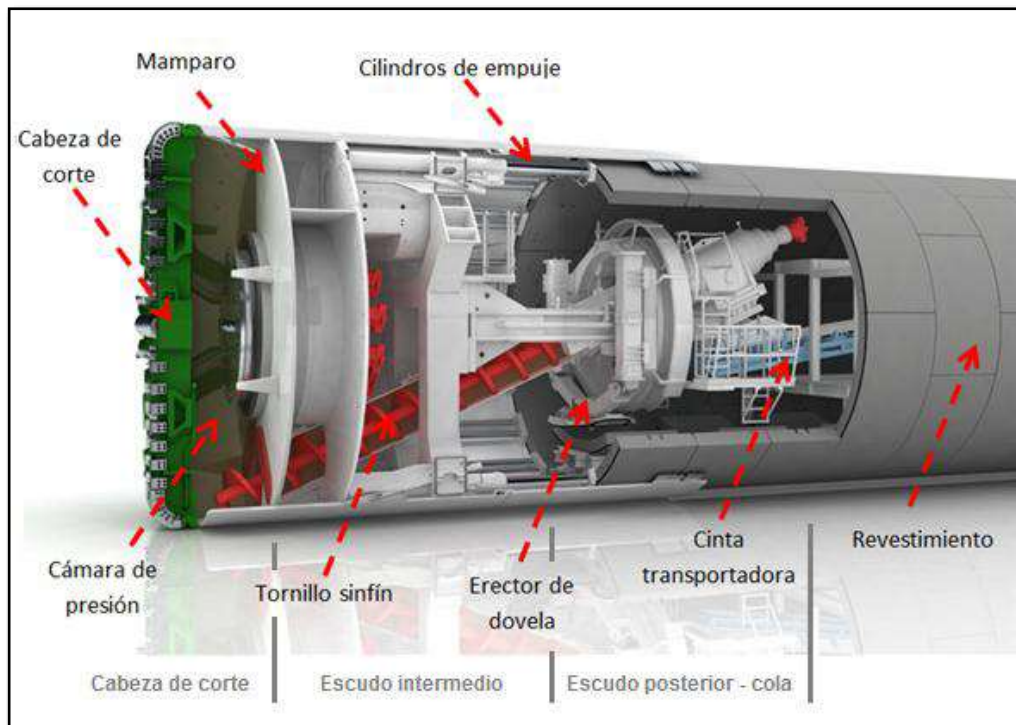


Figura 47: Partes principales de un escudo EPB [41]

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 [13].

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 [13].

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.

4.3.3 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 de 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 [13].

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 [13].

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 [13].

- 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.

4.3.4 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 4.3.3, 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 11.

El ciclo total de un escudo EPB, sin considerar interferencias como mantenencias, 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 m [18].

Tabla 11: Actividades principales en el ciclo de un escudo EPB y avances máximos [42]

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

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 12 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 [18].

Tabla 12: Rendimientos alcanzados en las ampliaciones del Metro de Madrid 95-99 [42]

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		Nesco	ACS	Ferrovial	Dragados	FCC	Nesco	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

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 13 [18].

Tabla 13: Desglose de tiempos en la construcción de la Línea 7 del Metro de Madrid [42]

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%

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 la figura 48.

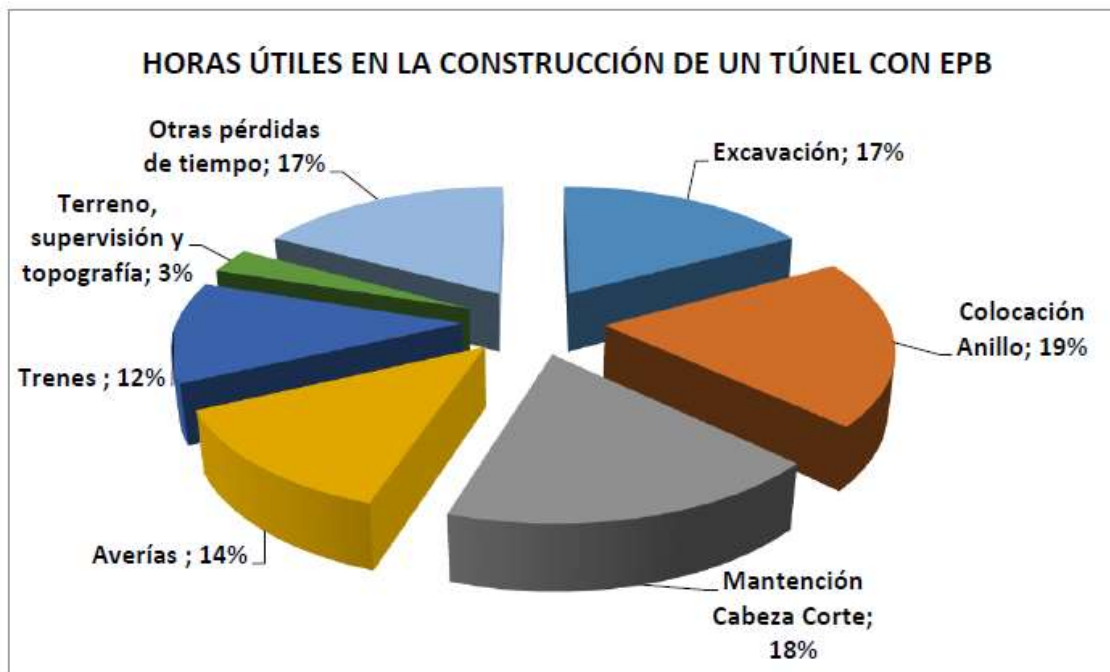


Figura 48: Horas útiles en la construcción de un túnel con EPB en las ampliaciones del Metro de Madrid. [43]

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 [18].

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 14 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% [18].

Tabla 14: Evolución de los tiempos perdidos en cinco obras consecutivas hechas con el mismo escudo EPB.

% 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%

Fuente: Planificación, proyecto y construcción de túneles de gran longitud. López Fernández, Carlos. [43]

Entonces, para determinar un rendimiento medio mínimo de escudo EPB moderno, se podría pensar en el rendimiento máximo teórico de la Tabla 11 con la eficiencia del 36% obtenida en la Línea 7 de la ampliación del Metro de Madrid (Tabla 14), 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

4.4 Evaluación Económica del proyecto

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, para luego fijar un costo unitario comparable entre ambos métodos y determinar cuál es el más económico.

La evaluación de este capítulo tiene como referencia a las Líneas de Metro de Santiago de Chile, ya que en Lima es la primera vez que se construirá una Línea de Metro subterránea, es por ello que toda información (costos, tiempos de ejecución, etc) tiene como referencia a un proyecto de investigación que se menciona en la bibliografía.

4.4.1 Análisis económico del método NATM.

Se tomará como referencia los costos de la construcción del túnel de una Línea de Metro de Santiago de Chile excavado mediante el método NATM, esta información se ha analizado directamente de un listado de precios y estados de pago de diferentes contratistas que participaron en los contratos de la construcción de los túneles de las Líneas 3 y 6 de Chile y se han tomado ciertos valores para efectos de este análisis [18].

✓ ***Costos a considerar en la construcción de una Línea mediante el método NATM:***

Para el caso de las Línea 3 y 6 de Chile se han considerado costos específicos para la construcción del túnel interestación y se distribuyen en las siguientes etapas [18]:

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

Se realizará un análisis simplificado de costos para los incisos (i), (ii) y (iii) sin entrar en el detalle de la composición de cada ítem. Y para el inciso (iv) se mostrará un detalle de sus partidas y el cálculo de los costos finales que se considerarán para este trabajo

[18].

i. Terreno e instalación de faenas

Para este trabajo de investigación se han considerado valores referenciales de la ciudad de Santiago de Chile para efectos comparativos.

El ajustado tamaño de terreno disponible para las instalaciones de faena, la realización de maniobras y el acopio del material excavado son problemas típicos de los piques de construcción, es por ello que para este trabajo se ha considerado un terreno mínimo de 800 m², como un valor conservador para el m² del suelo de la ciudad de Santiago de Chile, que de acuerdo a un estudio realizado por la empresa Inmobiliaria Arenas & Cayo, el valor promedio para ciertas ciudades ronda las 35,19,17 y 15 UF/m² respectivamente^[18]. Donde UF significa *unidad fomento* que es una unidad de cuenta usada en Chile, que equivale a S/. 132.38 moneda peruana.

Por lo tanto, se asumirá un valor de **15 UF/m²** para los terrenos destinados a piques de construcción, con lo cual el costo asumido se muestra en la tabla 15:

Tabla 15: Costos de terreno para construcción del pique

Ítem	Unidad	Valor
Superficie	m ²	1200
Costo Suelo	UF/m ²	15
Costo Terreno	UF	18,000

Fuente: Estudio de Prefactibilidad para la Construcción de túneles de Metro mediante máquinas tuneladoras, 2016 ^[18].

En cuanto a las instalaciones de faenas, se considera lo siguiente:

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

A partir de los precios unitarios de uno de los contratistas del Metro de Santiago de Chile, se tomará como valores promedios costos calculados para cada pique de construcción de uno de los tramos de la Línea 6 que se muestra en la tabla 16.

Tabla 16: Costo instalaciones de faena en cada pique

Ítem	Unidad	Valor
Instalación de faenas	UF	6,500

Fuente: Estudio de Prefactibilidad para la Construcción de túneles de Metro mediante máquinas tuneladoras, 2016 ^[18].

Por lo tanto, el costo total asociado a la compra del terreno e instalación de faena para cada pique se muestra en la tabla 17 a continuación:

Tabla 17: Costo terreno e instalación de faena para cada pique.

Ítem	Unidad	Valor
Terreno + Instalación de faenas	UF	24,500

Fuente: Estudio de Prefactibilidad para la Construcción de túneles de Metro mediante máquinas tuneladoras, 2016 [18].

ii. Construcción de piques y galerías de conexión

Las excavaciones del túnel interestación mediante el método NATM, necesitan de la construcción previa de piques y galerías de conexión que sirven de acceso al túnel y permiten iniciar los trabajos en múltiples frentes. El costo de esta etapa depende del tamaño y profundidad del pique, así como la longitud de la galería. Es por ello, que se ha tomado el costo promedio de 5 piques construidos en la Línea 6 del Metro de Santiago [45], a continuación en la tabla 18 se muestra los costos totales.

Tabla 18: Costo construcción de piques y galerías.

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

Fuente: Estudio de Prefactibilidad para la Construcción de túneles de Metro mediante máquinas tuneladoras, 2016 [18].

Finalmente, 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, se muestran en la tabla 19:

Tabla 19: Costo total de Pique de construcción

Ítem	Unidad	Valor
Terreno + Instalación de faenas	UF	24,500
Pique	UF	12,500
Galería	UF	30,000
Total	UF	67,000
Total	USD	2,5 millones

Fuente: Estudio de Prefactibilidad para la Construcción de túneles de Metro mediante máquinas tuneladoras, 2016 [18].

iii. Construcción de estaciones

Las estaciones constituyen obras independientes al túnel de vías, y su costo depende principalmente del tamaño y método constructivo elegido [45]. Para este caso, se muestra en la tabla 20 distintos tipos de estaciones que fueron consideradas:

Tabla 20: Tipos de estaciones

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

Fuente: Estudio de Prefactibilidad para la Construcción de túneles de Metro mediante máquinas tuneladoras, 2016 [18].

Los costos aproximados en la construcción de estas estaciones se muestran en la tabla 21, teniendo como referencia los presupuestos de obra de las Líneas 3 y 6 de Chile.

Tabla 21: Costo aproximado de estaciones

Tipo Estación	Método Constructivo	Costo aproximado (USD)
Típica	NATM	8,0 millones
Combinación	NATM	15-20 millones
Terminal	Cut and Cover	5,5 millones

Fuente: Estudio de Prefactibilidad para la Construcción de túneles de Metro mediante máquinas tuneladoras, 2016 [18].

iv. Construcción del túnel interestación

Los principales costos de la construcción del túnel interestación provienen de la excavación, del insumo de los materiales como hacer y hormigón, pero también de la mano de obra, personal encargado de realizar estos trabajos.

La tabla 22 muestra un detalle de las partidas y cantidades que se consideran en una la construcción de un tramo del túnel interestación de la Línea 6 de Chile.

Tabla 22: Partidas consideradas en la construcción del túnel interestación mediante método NATM.

DESIGNACIÓN	UND.	CANT.
Tramo 1- Túnel en recta en gravas (L.Tramo = 507m)		
Movimiento de Tierras		
Excavación	m ³	29,935
Hormigones		
Sello de hormigón proyectado grado H-35	m ²	10,196
Hormigón Proyecto Grado H-35 para revestimiento primario	m ³	1,558
Hormigón Proyecto Grado H-35 para revestimiento secundario	m ³	1,395
Hormigón Proyecto 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	m ²	36,135
Puesta a tierra	Kg	620
Marcos Reticulados		
Marco metálico tipo 95.28.22	Kg	151,547
Paralización		
Paralización mayo de 48 hrs y menor de 5 días	un	3
Paralización mayo 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

Fuente: Gonzales del Tánago. Ingeniería de detalle de la obra civil de la línea 6 del metro de Santiago, 2013^[45].

En la figura 49 se muestra la distribución de costos para la construcción del túnel, donde se puede apreciar que la mayor parte del presupuesto corresponde a la colocación de hormigón para el sostenimiento y revestimiento del túnel.

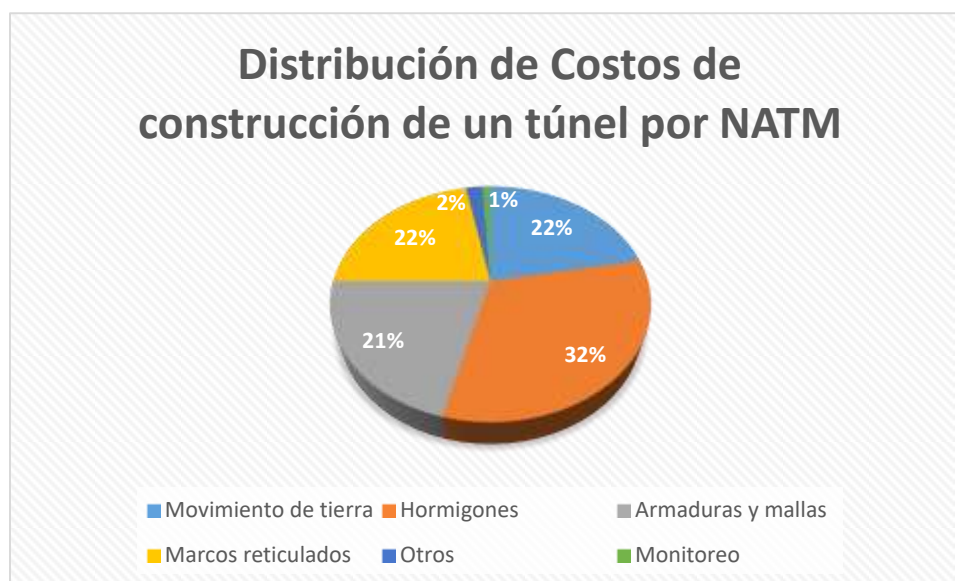


Figura 49: Distribución de costos en la construcción del túnel interestación con NATM [45].

Para el cálculo de costos para la construcción del túnel se ha analizado el listado de precios propuesto por distintos contratistas de la Línea 3 y 6 del Metro de Santiago- Chile, con los cuales se ha logrado determinar un costo promedio por unidad de largo, tal como se muestran las tablas 23 y 24.

Para los cálculos siguientes se ha considerado el valor del dólar y la UF al día 25 de febrero del 2016 fecha que se realizó el presente estudio referencial.

Tabla 23: Costos tramos Línea 3.

DETALLE LÍNEA 3 METRO SANTIAGO - CHILE						
DESIGNACIÓN	UND.	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
Costos Túnel Interestación	UF	136,133	155,118	139,092	187,000	58,018
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 Interestación	USD/ml	11,231				

Fuente: Gonzales del Tánago. Ingeniería de detalle de la obra civil de la línea 6 del metro de Santiago, 2013^[45].

Tabla 24: Costos tramos Línea 6

DETALLE LÍNEA 6 METRO SANTIAGO - CHILE					
DESIGNACIÓN	UND.	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
Costos Túnel Interestación	UF	167,337	105,087	78,309	95,038
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			

Fuente: Gonzales del Tánago. Ingeniería de detalle de la obra civil de la línea 6 del metro de Santiago, 2013^[45].

Podemos concluir que existe una similitud en costos entre ambas líneas (3 y 6), con un costo promedio aproximado de **11,000 USD/ml**.

Para obtener un costo real, se consultó con profesionales involucrados en el análisis de costos de estos proyectos y se llegó a la conclusión que el valor final se aproxima a **15,000 USD/ml**, este incremento se debe al aumento en la cantidad de hormigón producto de las sobre excavaciones del terreno, entre otras cosas.

Finalmente, la tabla 25 nos indica el costo unitario del túnel interestación:

Tabla 25: Costo unitario de construcción del túnel interestación mediante método NATM.

Ítem	Unidad	Valor
Construcción Túnel interestación-NATM	USD/ml	15,000

Fuente: propia

4.4.2 Uso de tuneladoras del tipo EPB.

La estimación de los costos en la excavación del túnel de interestación mediante el uso de una máquina tuneladora del tipo EPB es muy complejo, más aún calcular el costo en función de la longitud total del túnel, ya que cada obra se caracteriza por diferentes factores como la localización, nivel de instalaciones, geología, rendimientos esperados, instrumentación y control, etc.

Se cuenta con un estudio de proinversión a nivel de perfil del *Proyecto Construcción de la Línea 2 y Ramal A. Faucett- Gambeta del Metro de Lima y Callao*, que cuenta con información para el desarrollo de esta evaluación económica.

Los principales costos a considerar en la construcción de un túnel mediante máquinas tuneladoras dependerán de muchas variables, como la longitud del túnel, condiciones del terreno, logística, entre otros.

Se debe incluir como mínimo las siguientes categorías para una buena estimación de costos de construcción de un túnel [47]:

- a) Dependientes del tiempo:**
 - Oficinas / instalaciones
 - Personal
 - Seguro
 - Costos energéticos (agua y luz).
- b) Independientes del tiempo:**
 - Sostenimiento
 - Inyecciones de mortero
 - Tratamientos del terreno
 - Cables alta tensión y fibra óptica
 - Costo del botadero de escombros
 - Mantenimiento de maquinaria (cambio de piezas)
 - Consumos de maquinar (herramientas de corte).
- c) Fijos:**
 - Transporte y montaje de maquinaria.
 - Instalación de faena, instalación y retiro de oficinas, talleres, acopios, etc.
- d) Maquinarias:**
 - Escudo EPB
 - Maquinaria auxiliar, Back up.

El costo de algunos ítems mencionados anteriormente se indicarán a continuación con el fin de conocer la magnitud de los costos involucrado en la implementación de un proyecto con tuneladora TBM. Estos valores fueron recopilados de una tesis española (Sáenz,2007) [47].

a) Costos dependiente del tiempo [47]:

i. Personal

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

Costo esperado: 400,000 USD/mes

ii. Maquinaria general

Estos costos incluyen generadores, grúas, cargadores, camiones, etc. Y se estima un costo aproximado de:

Costo esperado: 20,000 USD/mes

b) Costos independientes del tiempo [47]:

i. Sostenimiento

Las dovelas de hormigón prefabricado corresponden al elemento principal del sostenimiento de las excavaciones realizadas con tuneladoras. Puesto que la ubicación de la obra es variable y no siempre se tiene acceso a una planta destinada a la fabricación de dovelas que resulte económica se ha introducido aquí un coste para el caso de no disponer de ella. Los costos asociados a esta partida se describen a continuación:

- *Costo del revestimiento (materiales, fabricación y transporte):*
7,000 USD/ ml de túnel
- *Costo de la planta de dovelas:*
4'000,000 USD

ii. Tratamiento al terreno

Los costos destinados a tratamientos del terreno para mejorar su estabilidad o excavabilidad, se presentan por metro cúbico de excavación:

Costo esperado: 300 USD/m³ de excavación

iii. Instalaciones auxiliares

Los costes de esta partida están compuestos por los conductos de ventilación además de los 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. La unidad con la que se trabaja en este caso es de dólares por metro lineal, presentando el siguiente valor:

Costo esperado: 300 USD/ ml

iv. Eliminación del material excavado

Esta partida está destinada a los costos correspondientes al transporte del material excavado desde el frente al. Al igual que ocurría en el caso del sostenimiento, aquí también es necesario alcanzar el valor buscado a través de un estudio en detalle de distintos aspectos. Desglosamos el costo final, presentado en dólares por metro cúbico de excavación, en el costo de la cinta transportadora, evidentemente función de la longitud y el importe del uso de dicha cinta. El resultado se muestra a continuación:

Costo uso de cinta: 2.5 USD/m³ excavación

Costo cinta transportadora: 170 USD/ ml

Costo transporte a vertedero: 7 USD/ m³ excavación

v. Mantenimiento

El mantenimiento de la tuneladora, se concentra principalmente en la rueda de corte, con cambio de picas y discos cortadores, y todo esto asciende a un valor en función de volumen excavado, que es:

Costo esperado: 20 USD/m³ excavación

c) Costos fijos

El costo de montaje para una pequeña tuneladora puede ser **USD 200,000** mientras que el costo de montaje para una máquina muy grande en un pique, podría ser de **USD 2'500,000**, este costo considera el personal de la empresa que fabrica la máquina, el transporte, herramientas, etc.

d) Costos de maquinaria

i. Tuneladora:

El costo de una maquina tuneladora dependerá de varios factores, como el diámetro, 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 [47], 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

ii. Maquinaria auxiliar:

Se presenta a continuación un listado de los elementos que componen a la maquinaria auxiliar. Su evaluación económica se basa, en datos de la maquinaria empleada para la ampliación del metro de Madrid y se añade al listado para justificar el valor final aportado:

- *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

Para calcular el costo por unidad de longitud de la construcción del túnel interestación mediante el uso de máquinas tuneladoras del tipo EPB, se ha extraído información de PROINVERSIÓN a nivel de perfil del *Proyecto Construcción de la Línea 2 y Ramal Av. Faucett- Gambeta del Metro de Lima y Callao*". El proyecto se encuentra en la primera etapa de construcción el cual se está utilizando el método NATM, mientras que las tuneladoras serán montadas para dar inicio a las siguientes etapas [46].

Por la cercanía y 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, debería 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 [46].

La tabla 26, muestra cómo se compone el presupuesto total del proyecto.

Tabla 26: Desglose costo total, Proyecto Metro de Lima.

ÍTEM	UNIDAD	VALOR
INFRAESTRUCTURA	MILES USD	2'936,103
IMPREVISTOS	MILES USD	293,610
GASTOS COMPLEMENTARIOS	MILES USD	234,888
MATERIAL RODANTE	MILES USD	871,500
EXPROPIACIONES	MILES USD	217,500
IGV	MILES USD	819,648
TOTAL	MILES USD	5'373,251

Fuente: Concesión de la Línea 2 y Ramal Av. Faucett – Av. Gambetta de la Red Básica del Metro de Lima y Callao, Garcia Codos, C. (2013) [46].

La inversión en INFRAESTRUCTURA incluye las estaciones, pozos, túneles, etc. La tabla 27 muestra el detalle de las partidas que integran la infraestructura del proyecto.

Tabla 27: Costo de partidas de infraestructura, Metro de Lima.

ÍTEM	UNIDAD	VALOR
Túnel entre estaciones	MILES USD	588,270
Estaciones	MILES USD	1'124,000
Pozos y manufactos especiales	MILES USD	296,000
Equipo ferroviario y no ferroviario	MILES USD	702,320
Otros conceptos	MILES USD	216,272
Manejo ambiental	MILES USD	9,241
TOTAL	MILES USD	2'936,103

Fuente: Concesión de la Línea 2 y Ramal Av. Faucett – Av. Gambetta de la Red Básica del Metro de Lima y Callao, García Codos, C. (2013) [46].

Podemos ver en la tabla 27 que un monto cercano a 600 millones de dólares corresponden a la construcción del túnel completo, que corresponden a los 35Km que se excavarán con tuneladoras y por método NATM.

A continuación se realizará un análisis para calcular el costo de cada metro del túnel construido con tuneladora.

Se sabe que:

$$\text{Costo túnel} = 588,270.000 \text{ USD}$$

$$\text{Costo túnel} = \text{Costo NATM} + \text{Costo TBM}$$

Como el túnel será construido mediante 2 métodos (NATM y tuneladora), entonces la longitud total será la suma de lo construido con cada método, es decir:

$$\text{Longitud Total} = \text{Longitud NATM} + \text{Longitud TBM}$$

La tabla 28 indica a detalle el análisis mencionado.

Tabla 28: Longitud de los túneles que se construirán con cada método constructivo.

MÉTODO	LONGITUD (m)
NATM	8,000
TUNELADORAS	27,000
TOTAL	35,000

Fuente: Concesión de la Línea 2 y Ramal Av. Faucett – Av. Gambetta de la Red Básica del Metro de Lima y Callao, García Codos, C. (2013) [46].

Para poder calcular el *Costo NATM* del proyecto de Lima, se tomará como referencia el mismo costo para la construcción del Metro de Santiago, determinado en el punto iv) de la página 81. Este análisis se considera debido a que constructoras internacionales no deberían variar mucho en los costos dentro de la región.

Por lo tanto, se tiene:

$$\text{Costo NATM PERU} = \text{Costo NATM CHILE} = 15,000 \text{ USD/m}$$

Se multiplica por la longitud del túnel construida con este método y se obtiene el costo de dicha obra:

$$\begin{aligned} \text{Costo NATM} &= \text{Longitud NATM} * \text{Costo NATM PERU} \\ \text{Costo NATM} &= 8,000 \text{ m} * 15,000 \text{ USD/m} \\ \text{Costo NATM} &= 120,000 \text{ USD} \end{aligned}$$

Por lo tanto, el costo del tramo construido mediante tuneladoras se determinar con la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \text{Costo TBM} &= \text{Costo túnel} - \text{Costo NATM} \\ \text{Costo TBM} &= 588,270 - 120,000 \\ \text{Costo TBM} &= 468,270 \text{ USD} \end{aligned}$$

Finalmente, el costo unitario de este método constructivo es el siguiente:

$$\begin{aligned} \text{C.U TBM} &= \text{Costo TBM} / \text{Longitud TBM} \\ \text{C.U TBM} &= 468,270 / 27,000 \\ \text{C.U TBM} &= 17.343 \text{ USD/m} \end{aligned}$$

Finalmente, la construcción del túnel interestación mediante máquinas tuneladoras se resume en la siguiente tabla 29:

Tabla 29: Costo lineal de construcción del túnel interestación mediante tuneladoras

Ítem	Unidad	Valor
Construcción Túnel interestación-Tuneladora	USD/ml	18,000

Fuente: Concesión de la Línea 2 y Ramal Av. Faucett – Av. Gambetta de la Red Básica del Metro de Lima y Callao, García Codos, C. (2013) [46].

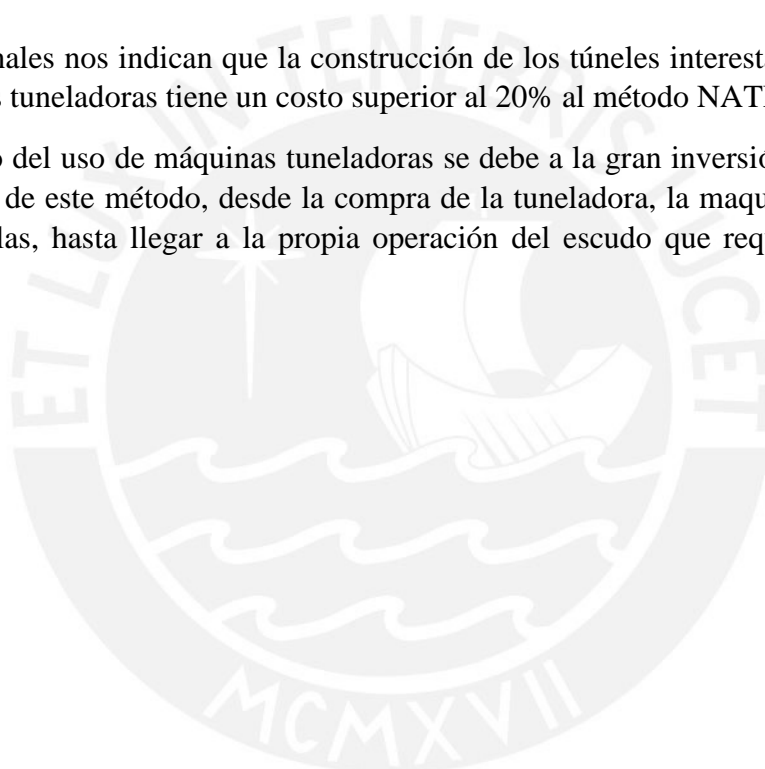
4.4.3 Comparación de costos del túnel interestación para ambos métodos.

Al analizar los costos para cada método constructivo (NATM y tuneladoras), con datos reales y detallados para el método NATM y por estimación para el caso del uso de tuneladoras, se ha llegado a la conclusión de los siguientes costos aproximados por unidad de longitud del túnel interestación que se muestran a continuación:

<p>Costo NATM= 15,000 USD/m</p> <p>Costo TBM= 18,000 USD/m</p>
--

Estos valores finales nos indican que la construcción de los túneles interestación mediante el uso de máquinas tuneladoras tiene un costo superior al 20% al método NATM.

El elevado costo del uso de máquinas tuneladoras se debe a la gran inversión que requiere la implementación de este método, desde la compra de la tuneladora, la maquinaria auxiliar, la fábrica de dovelas, hasta llegar a la propia operación del escudo que requiere de personal especializado.



De manera general, 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. Sin embargo, para el caso de construcción mediante uso de máquinas tuneladoras no es necesario la construcción de piques intermedios, por lo cual este costo no se considera.

Al graficar los costos para ambos métodos en función del número de estaciones se obtiene la figura 50, donde se puede rescatar que a partir de un cierto número de estaciones (12 para este ejemplo) el costo total de la excavación mediante el uso de tuneladoras es inferior al costo de la excavación mediante el método NATM. Esto se debe a dos razones:

- i. La suma acumulada del costo de la construcción de los piques de construcción aumenta para cada tramo que se agregue al trazado.
- ii. La disminución del costo unitario de la excavación del túnel con tuneladora para longitudes importantes.

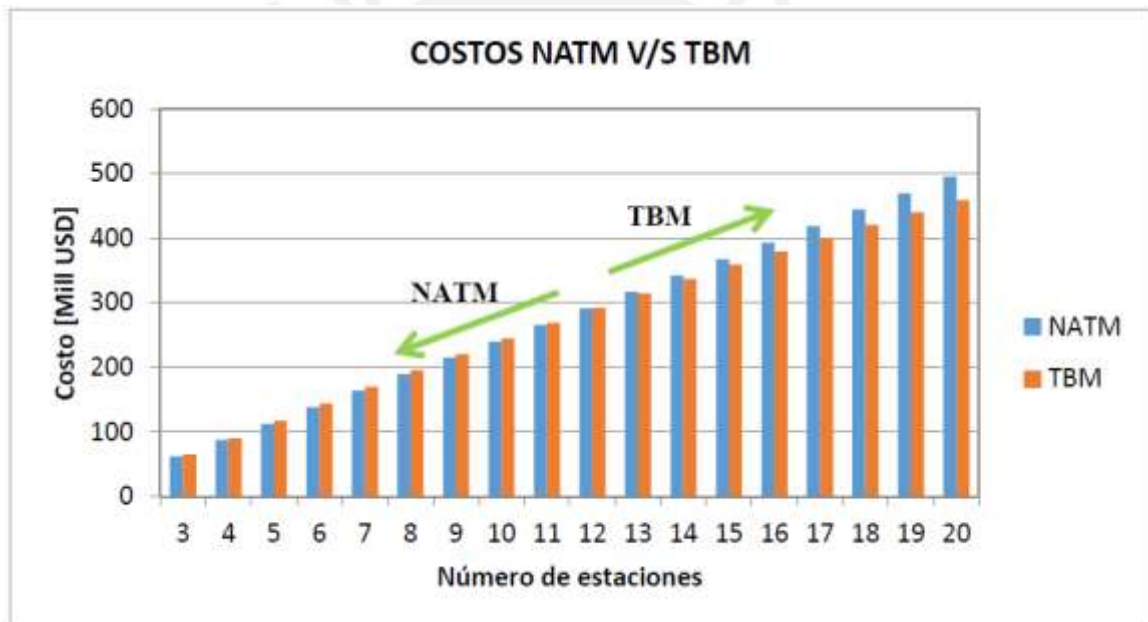


Figura 50: Comparación costos NATM vs TBM [18].

4.4.4 Inversión de las etapas y tramos de construcción.

En la presente fase de Estudio de Prefactibilidad, se ha profundizado el análisis considerando los conceptos de forma más desagregada, con sus incidencias e ítems de referencia para otorgar una afinación de la estimación de la Alternativa elegida.

El esquema del presente presupuesto se ha mantenido en larga medida análogo al esquema de la fase anterior, es decir en primera instancia se ha subdividido entre los que se refiere a la obra civil propiamente dicha, y lo que se refiere a las instalaciones de una línea de las características de la Línea 2 de la Red Básica del Metro de Lima.

En cuanto a los Trabajos Preliminares y Accesorios, se han considerado las siguientes partidas:

- Monitoreo Geológico
- Sondeos
- Interferencias y servicios afectados
- Interferencias Línea 1
- Consolidación de terrenos
- Desvíos
- Topografía y georeferenciación

El segundo grupo de partidas se refiere al Manejo Ambiental:

- Monitoreo Ambiental
- Monitoreo Arqueológico

Por lo que se refiere a la Infraestructura, esta se puede dividir en Obras Civiles, Equipamiento Electromecánico Equipamiento de Sistema y Patios Depósitos Talleres, Entre las Obras Civiles, el trazado ha sido evaluado teniendo en cuenta:

- Túnel de línea excavado por medio de máquinas tuneleras (TBM)
- Túnel de línea excavado en trinchera (Cut & Cover)
- Túnel de línea excavado en caverna
- Estaciones excavadas en trinchera
- Estaciones excavadas en caverna
- Pozos de ventilación
- Patios de maniobra y talleres de operación

Por lo que se refiere al Equipamiento Electromecánico, se han tenido en cuenta:

- Equipamiento en Estaciones
- Equipamiento en túneles y otros manufactos

Por lo que se refiere al Equipamiento de Sistema, se han tenido en cuenta:

- Superestructura ferroviaria (túneles + estaciones)
- Sistemas eléctricos
- Señalización y Automatización
- Supervisión, Telecomunicaciones y Control

Por lo que se refiere a los Gastos Accesorios, se han tenido en cuenta:

- Imprevistos
- Gastos Generales
- Ingeniería de Proyecto
- Ingeniería, Gestión y pruebas de material rodante

Como resultado de todo lo anterior, se han definido los costes de inversión siguiendo las siguientes directrices:

- Identificación de los costos directos de construcción de la infraestructura.
- Identificación de los costos de Trabajos Preliminares y Accesorios, y del Manejo Ambiental.
- Consideración de los imprevistos sobre los costos directos de construcción de la infraestructura (Trabajos Preliminares y Accesorios, Manejo Ambiental, Infraestructura).
- Consideración de los Gastos Generales de realización de la Infraestructura, según la subdivisión en Etapas y Tramos (delimitados mayoritariamente por la configuración de excavación de las TBMs empleadas, que operan como aglutinadoras de instalaciones de obra y de equipos).
- Consideración de los gastos accesorios a la realización de la infraestructura, es decir:
 - Ingeniería de Proyecto (a cargo del concesionario) relativa a la Infraestructura, el Manejo ambiental y los Trabajos Preliminares y Accesorios
 - Ingeniería de Proyecto (a cargo del concesionario) relativa al material rodante, junta a la gestión de su suministro y las pruebas necesarias, tanto en fábrica como en obra
 - Supervisión de Obra (a cargo del concedente)
 - Gestión del Proyecto (a cargo del concedente)

- Consideración de las Utilidades del Contratista.
- Consideración de la Base Imponible total de la infraestructura, suma de los conceptos anteriores.
- Consideración de los costos para la compra del material rodante (en su horizonte temporal hasta la conclusión de la concesión en función de las necesidades impuestas por el crecimiento de la demanda).
- Consideración del costo de las expropiaciones (a cargo del concedente)
- Obtención de la Base Imponible Total (infraestructura + Material rodante + Expropiaciones).
- Consideración del presupuesto total con IGV.
- En la figura 51, 52 y 53 se detallan las inversiones de infraestructura, imprevistos, gastos accesorios, material rodante y expropiaciones por etapas.

El presupuesto resultante es el siguiente:

6,516,887,791.65 US\$ (costo financiero o privado)

Este monto está repartido en tres etapas:

- Primera Etapa: 2,454,945,899.28 US\$
- Segunda Etapa: 3,283,441,015.65 US\$



Figura 52: Costos del Proyecto [44]

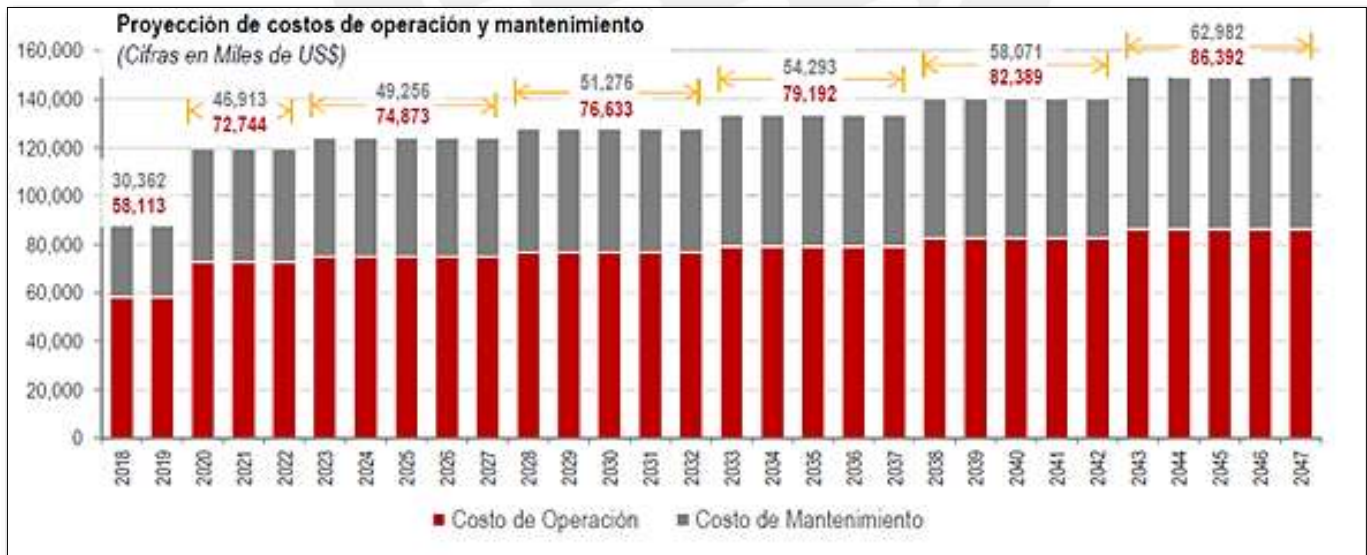


Figura 53: Costos de Operación y Mantenimiento [44]

CAPÍTULO 5: COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

✓ Del trabajo realizado se puede realizar los siguientes comentarios:

- Durante la elaboración de este Proyecto de Investigación, lamentablemente no se adquirió suficiente información correspondiente a los trabajos realizados actualmente, debido a que durante su ejecución no fue posible estar presente. Toda información fue obtenida mediante informes provenientes de Proinversión, Ositrán y estudios de factibilidad.
- Con respecto al costo del uso de las maquinarias, se tomó como referencia información de un Proyecto de investigación de Chile, con el fin de usar ciertos datos para estimar el costo aproximado del uso de tuneladoras en el presente Proyecto, ya que en Lima es la primera vez que se usará este tipo de maquinaria.
- Este sistema de transporte masivo tiene ventajas que podemos mencionar:
 - Disminución de horas de viaje, mejorando la productividad de los usuarios.
 - Integración de la población más alejada a los centros de interés urbano, aumentando la productividad del mercado laboral urbano.
 - Disminución de las afectaciones a la salud y el gasto en atención médica debido a la reducción de la contaminación por gases de combustión y ruido.
 - Disminución del estrés de los pasajeros y conductores por el estado actual de tránsito vehicular.
 - Disminución de accidentes de tránsito después de la construcción del Proyecto.
 - Probable reducción de la delincuencia debido a un tránsito más ordenado y la presencia de elementos de seguridad ciudadana en las estaciones.
 - Probable incremento de actividades económicas (negocios) colindantes a las estaciones y en el área de influencia por la mayor accesibilidad.
 - Mejor visión paisajista de la ciudad.
 - Mayor educación vial para reforzar los conceptos de orden, respeto, limpieza, organización, y aprender el adecuado uso del nuevo medio de transporte.
 - Generación de puestos de empleo durante la ejecución y la posterior operación del proyecto para mano de obra calificada, semicalificada y profesionales.
 - Ahorro en la economía de los usuarios al utilizar el servicio público en lugar del particular.
 - Revalorización de los terrenos a lo largo de la vía al mejorar la calidad del ambiente, accesibilidad, cantidad de áreas verdes, etc.

✓ Del trabajo realizado se concluye:

- La implementación de este nuevo método constructivo para la construcción del Metro de la Línea 2 de Lima-Callao supone un cambio importante en la forma de construir, usando el mejorado método NATM, que ha ido evolucionando constantemente. 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.
- Con respecto a los diferentes sistemas constructivos en Chile, dadas las condiciones geográficas, el sismo representa un elemento vital a considerar a la hora de diseñar cualquier tipo de estructura, por lo que suelen construirse estructuras fortificadas que en el caso de los túneles se expresa en la materialidad, específicamente en el uso de marcos reticulados y mallas electro soldadas a lo largo del tramo.
- La elección de las máquinas tuneladoras es clave fundamental para el éxito de un proyecto, si la elección es correcta es muy probable que no se tengan mayores inconvenientes y se alcancen los rendimientos esperados, pero si la elección no es la correcta, esto afecta directamente al plazo y costo del proyecto.
- En cuanto al tiempo de ejecución del proyecto, se ha concluido en esta investigación 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.
- El análisis de costos se basó en información real y directa de la construcción de las Líneas 3 y 6 del Metro de Santiago- Chile y en información de PROINVERSIÓN del proyecto en construcción de la Línea 2 de Metro de Lima. Con los datos del proyecto de la línea de Lima se pudo determinar el costo unitario para la construcción del túnel con el uso de máquinas tuneladoras, con un valor aproximado de **18,000 USD/m**; por otro lado, los datos de las línea de Santiago permitió determinar un costo para la construcción del túnel interestación mediante el método NATM que se aproxima a **15,000 USD/m**, menos que el costo asociado al uso de máquinas tuneladoras.
- Finalmente, se realizó una comparación de tiempo y costo, considerando una línea típica del Metro de Santiago, donde los parámetros más importantes son la longitud y el número de estaciones a partir del cual el uso de una tuneladora representa un menor costo para la excavación y sostenimiento del proyecto.

CAPÍTULO 6: BIBLIOGRAFÍA

- [1] López Jimeno, C. and Andreani Cano, L. (2001). Ingeo túneles. 1st ed. Madrid: Carlos López Jimeno.
- [2] Emboquille convencional. <http://diarium.usal.es/jnj/modelizacion-geotecnica/>. Acceso: 19/04/2017.
- [3] Montaje de TBM. http://www.cramermedia.com.ar/cramermedia/work/Entries/2012/8/2_CNS_-_Montaje_TBM_%22Argentina%22.html. Acceso: 19/04/2017.
- [4] Tunnel Boring Machine. http://designs.vn/tin-tuc/cong-nghe-dinh-cao-lam-duong-ham_8886.html#.WP-GytI1-00. Acceso: 19/04/2017.
- [5] Comparativas entre métodos tradicionales y el NATM. [9] Navarro Carrasco, S., Ruiz Gómez, R. and Ruiz Marín, J. (n.d.). Geotecnia Aplicada a la Construcción de Túneles. 1st ed. Disponible en: https://issuu.com/primiramone/docs/geotecnia_aplicada_a_la_construccion_de_tuneles. Acceso: 19/04/2017.
- [6] Rey Sabín, A., Pardo Fernández, G. and Hurtado Agra, R. (2010). Túneles y Obras Subterráneas. 1st ed. España. Disponible en: <http://www.construnario.com/ebooks/445/@@@@sika%20construccion%20de%20tuneles/@@@@@@@@@@@@@@@@@@multi-soluciones/18.%20t%C3%B1eles%20y%20obras%20subterr%C3%A1neas/files/assets/common/downloads/publication.pdf>. Acceso: 19/04/2017.
- [7] Navarro Carrasco, S., Ruiz Gómez, R. and Ruiz Marín, J. (n.d.). Geotecnia Aplicada a la Construcción de Túneles. 1st ed. Disponible en: https://issuu.com/primiramone/docs/geotecnia_aplicada_a_la_construccion_de_tuneles. Acceso: 19/04/2017.
- [8] Secuencias de distintos métodos de excavación. [7] Mallada Martín, V. (2010). Instrumentación en interior de túneles y excavaciones. 1st ed. Disponible en: <https://www.etcg.upc.edu/estudis/aula-paymacotas/instrumentacio/ponencies/mallada.pdf>. Acceso: 19/04/2017.
- [9] Portal.uc3m.es. (2017). *Una nueva patente de la UC3M hace más eficiente el uso de las tuneladoras*. [online] Available at: http://portal.uc3m.es/portal/page/portal/investigacion/parque_cientifico/actualidad_agenda/noticia-patente-tuneladora-sept-2013 [Acceso: 19/04/2017].
- [10] Tuneladora Topo. Galabru, P. Tratado de procedimientos generales de construcción. Volumen III. Cimentaciones y Túneles. Barcelona, Reverte, 1973.

- [11] Directindustry.com. (2018). ϕ 2.8 - 12.5 m - Double-shield tunnel boring machine by Herrenknecht AG | DirectIndustry. [online] Available at: <http://www.directindustry.com/prod/herrenknecht-ag/product-59259-385106.html> [Acceso 19/04/2017].
- [12] Eurohinca.com. (2018). *EUROHINCA - Tuneladoras - Escudo abierto*. [online] Available at: <https://www.eurohinca.com/escudo-abierto.html> [Acceso: 19/04/2017].
- [13] Victoryepes.blogs.upv.es. (2018). *Tuneladoras EPB: Escudos de presión de tierras – El blog de Víctor Yepes*. [online] Available at: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2013/11/09/tuneladoras-epb-escudos-de-presion-de-tierras/> [Acceso 19/04/2017].
- [14]” Esquema Escudo con Equilibrio de Presión de Tierras o EPB”. Análisis en 3D de los movimientos del terreno causados por la excavación mecanizada de túneles (EPB). (2015). [ebook] Barcelona: Peng Sun, p.13. Available at: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/26106/1a%20tesina%20final.pdf> [Acceso: 25/01/2018].
- [15]” Diagrama de equilibrio de presiones en un EPB”. Análisis en 3D de los movimientos del terreno causados por la excavación mecanizada de túneles (EPB). (2015). [ebook] Barcelona: Peng Sun, p.13. Available at: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/26106/1a%20tesina%20final.pdf> [Acceso: 25/01/2018].
- [16] Fernando del Real.(n.d.). *Túneles Urbanos: Excavación con Tuneladora*. <https://www.aate.gob.pe/wp-content/uploads/2015/08/Tuneles-Urbanos-Excavacion-con-Tuneladoras-Amberg.pdf> [Acceso: 25/01/2018].
- [17] Directindustry.es. (2018). ϕ 4.2 - 19 m | Mixshield - Tuneladora de escudo mixto by Herrenknecht AG | DirectIndustry. [online] Available at: <http://www.directindustry.es/prod/herrenknecht-ag/product-59259-385103.html> [Acceso: 25/01/2018].
- [18] Gonzáles Valderrama, C. (2016). Estudio de Prefactibilidad para la Construcción de túneles de Metro mediante máquinas tuneladoras. Posgrado. Universidad de Chile.
- [19] Resumen Ejecutivo. (n.d.).Lima: C.P.S de Ingeniería S.A.C, p.3. Acceso: 01/05/2017.
- [20] Caso 1 NATM Vs Tuneladoras. Fuente propia.
- [21] Avance de la Línea 2 del metro de Lima. Resumen Ejecutivo. (n.d.).Lima: C.P.S de Ingeniería S.A.C, p.4. Acceso: 01/05/2017.
- [22] Tramo 1, estudio topográfico. . Resumen Ejecutivo. (n.d.).Lima: C.P.S de Ingeniería S.A.C, p.4. Acceso: 01/05/2017.

- [23] Tramo 2, estudio topográfico. Resumen Ejecutivo. (n.d.).Lima: C.P.S de Ingeniería S.A.C, p.4. Acceso: 01/05/2017.
- [24] Tramo 3, estudio topográfico. Resumen Ejecutivo. (n.d.).Lima: C.P.S de Ingeniería S.A.C, p.4. Acceso: 01/05/2017.
- [25] Terreno N° 1 . Resumen Ejecutivo. (n.d.).Lima: C.P.S de Ingeniería S.A.C, p.4. Acceso: 01/05/2017.
- [26] Terreno N° 2 . Resumen Ejecutivo. (n.d.).Lima: C.P.S de Ingeniería S.A.C, p.4. Acceso: 01/05/2017.
- [27] Terreno N° 3 . Resumen Ejecutivo. (n.d.).Lima: C.P.S de Ingeniería S.A.C, p.4. Acceso: 01/05/2017.
- [28] Apoyo de la Policía Nacional. Resumen Ejecutivo. (n.d.).Lima: C.P.S de Ingeniería S.A.C, p.4. Acceso: 01/05/2017.
- [29] Apoyo de la Policía Nacional. Resumen Ejecutivo. (n.d.).Lima: C.P.S de Ingeniería S.A.C, p.4. Acceso: 01/05/2017.
- [30] Estaciones proyectadas. Resumen Ejecutivo. (n.d.).Lima: C.P.S de Ingeniería S.A.C, p.4. Acceso: 01/05/2017.
- [31] Avance Líneas 2 y 4 del metro de Lima. Resumen Ejecutivo. (n.d.).Lima: C.P.S de Ingeniería S.A.C, p.4. Acceso: 01/05/2017.
- [32] Espacio de aparcamiento de trenes después de estaciones terminales- Estación Gambeta. Resumen Ejecutivo. (n.d.).Lima: C.P.S de Ingeniería S.A.C, p.4. Acceso: 01/05/2017.
- [33] Espacio de aparcamiento de trenes después de estaciones terminales- Estación Carmen de la Legua, Línea 4 . Resumen Ejecutivo. (n.d.).Lima: C.P.S de Ingeniería S.A.C, p.4. Acceso: 01/05/2017.
- [34] Espacio de aparcamiento de trenes después de estaciones terminales- Estación Puerto Callao . Resumen Ejecutivo. (n.d.).Lima: C.P.S de Ingeniería S.A.C, p.4. Acceso: 01/05/2017.
- [35] Espacio de aparcamiento de trenes después de estaciones terminales- Estación Municipalidad de Ate. Resumen Ejecutivo. (n.d.).Lima: C.P.S de Ingeniería S.A.C, p.4. Acceso: 01/05/2017.
- [36] Ubicación de estaciones. Resumen Ejecutivo. (n.d.).Lima: C.P.S de Ingeniería S.A.C, p.4. Acceso: 01/05/2017.
- [37] Patio- Taller Santa Anita . Resumen Ejecutivo. (n.d.).Lima: C.P.S de Ingeniería S.A.C, p.4. Acceso: 01/05/2017.

- [38] Patio- Taller Bocanegra . Resumen Ejecutivo. (n.d.).Lima: C.P.S de Ingeniería S.A.C, p.4. Acceso: 01/05/2017.
- [39] Geología de Lima . Resumen Ejecutivo. (n.d.).Lima: C.P.S de Ingeniería S.A.C, p.4. Acceso: 01/05/2017.
- [40] Granulometría de los terrenos y aplicación a los escudos EPB . Resumen Ejecutivo. (n.d.).Lima: C.P.S de Ingeniería S.A.C, p.4. Acceso: 01/05/2017.
- [41] Herrenknecht.com. (2018). EPB Shield - Herrenknecht AG. [online] Available at: <https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/epb-shield.html> [Acceso: 01/05/2017.].
- [42] Melis M. 2005. Las tuneladoras de 3 carriles de la M-30. Revista de Obras Públicas, N° 3454, 2005. España. Pp 71-106.
- [43] Planificación, proyecto y construcción de túneles de gran longitud. (n.d.). [ebook] López Fernández, Carlos, pp.66-67. Available at: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/16327/722-TES-CA-5655.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Accessed 10 Jul. 2018].
- [44] Presupuesto Línea 2 de Lima. Resumen Ejecutivo. (n.d.).Lima: C.P.S de Ingeniería S.A.C, p.4. Acceso: 01/05/2017.
- [45] Gonzales del Tánago, J. (2013). Ingeniería de detalle de la obra civil de la línea 6 del metro de Santiago. [ebook] Madrid: José Gonzales del Tánago. Available at: <https://docplayer.es/14818329-Ingenieria-de-detalle-de-la-obra-civil-de-la-linea-6-del-metro-de-santiago.html> [Acceso: 20/02/2018].
- [46] Garcia Codos, C. (2013). Concesión de la Línea 2 y Ramal Av. Faucett – Av. Gambetta de la Red Básica del Metro de Lima y Callao. [ebook] Lima, pp.26,27. Available at: http://estaticos.expansion.com/opinion/documentosWeb/2013/03/18/presentacion_cg_proinversion.pdf [Acceso: 20/02/2018].
- [47] Saenz de Santa Maria, I. (2018). Estimación de coste y plazo de ejecución en proyectos de túneles mecanizados. [online] Upcommons.upc.edu. Available at: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/4777> [Acceso: 20/02/2018].