

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil

Trabajo de Investigación

**Análisis del procedimiento constructivo del túnel Pucará
trasandino con tuneladora simple escudo en el proyecto
Majes Sigwas II Fase I, Sibayo - Caylloma - Arequipa 2019**

Moises Luigi Carnero Canales

Para optar el Grado Académico de
Bachiller en Ingeniería Civil

Arequipa, 2019

Repositorio Institucional Continental
Trabajo de investigación



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

ASESOR

Ing. Julio Efraín Postigo Zumarán.

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradecer a Dios por iluminar mi camino y permitirme culminar con este proyecto.

A mis docentes por su apoyo en la vida universitaria y a mi asesor por su ayuda incondicional en el desarrollo de este proyecto de investigación.

A las personas que me acompañaron en la mi formación universitaria, por su tiempo y comprensión.

DEDICATORIA

Dedico la culminación de este trabajo de investigación a mis padres por formarme con sólidos valores, los que permitieron tener los objetivos claros en mis metas trazadas.

A mi esposa por ser mi compañera incondicional, la que me motivo la culminación de mi vida universitaria y del presente trabajo de investigación.

Moisés Luigi Carnero Canales.

INDICE

ASESOR	ii
AGRADECIMIENTO	iii
DEDICATORIA	iv
INDICE DE TABLAS	ix
INDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN	xv
CAPÍTULO I	1
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	1
1.1 Planteamiento y formulación del problema	1
1.1.1 Planteamiento del problema	1
1.1.2 Formulación del problema	2
1.1.2.1 Problema general	2
1.1.2.2 Problemas específicos	3
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo general	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
1.3 Justificación	3
1.3.1 Justificación técnica	3
1.3.2 Justificación económica	4
1.3.3 Justificación social	4
1.4 Importancia	4

1.5	Hipotesis	5
1.6	Variables	5
1.7	Métodos y alcance de la investigación	6
1.8	Diseño de la investigación	6
1.9	Población y muestra	7
1.9.1	Población de estudio	7
1.9.2	Tamaño de muestra	7
	CAPÍTULO II	8
	MARCO TEORICO	8
2.1	Antecedentes del problema	8
2.2	Excavación con máquinas tuneladoras o TBMs	9
2.3	Tipos de máquinas tuneladoras	10
2.3.1	Topos o tuneladoras abiertas	10
2.3.1.1	Topo (Gripper)	10
2.3.2	Escudos	11
2.3.2.1	Tuneladora simple escudo	11
2.3.2.2	Tuneladora doble escudo	12
2.3.2.3	Escudo de balance de presión de tierras (EPB)	13
2.3.2.4	Escudo con presión de lodos (Slurry Shield)	14
2.3.3	Escudos mixtos	16
2.3.4	Sistema back-up	17
2.3.4.1	Sistema back-up de vía única	18
2.3.4.2	Sistema back-up de doble vía	19
	CAPÍTULO III	20
	PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO TUNEL PUCARA TRASANDINO	20
3.1	Obras preliminares a excavación de túnel con tuneladora	20
3.1.1	Descripción de la tuneladora	20
3.1.2	Fabricación de dovelas	21
3.1.3	Plataforma Chalhuanca o playa de vías	27

3.1.4	Obras subterráneas previas	32
3.1.5	Procedimiento constructivo túnel Pucara Trasandino	33
3.1.5.1	Ciclo exterior	34
3.1.5.2	Ciclo abastecimiento y transporte	35
3.1.5.2.1	Mediante instalaciones	35
3.1.5.2.2	Mediante trenes de aprovisionamiento	35
3.1.5.3	Ciclo interior	40
3.1.5.3.1	Descarga de trenes en la tuneladora	41
3.1.5.3.2	Avance o perforación	41
3.1.5.3.3	Inyección bicomponente	43
3.1.5.3.4	Montaje del anillo de dovelas	49
CAPÍTULO IV		55
COMPARATIVA METODOS DE EXCAVACIÓN DE TUNELES “PERFORACION Y VOLADURA” VS “TUNELADORA” Y CONSIDERACIONES A TOMAR EN CUENTA PARA IMPLEMENTACION MASIVA DEL METODO DE EXCAVACION DE TUNELES CON TBM EN AREQUIPA		55
4.1	Método TBM	55
4.2	Método perforación y voladura	55
4.3	Parámetros comparativos de ambos métodos de excavación	55
4.3.1	Rangos de las secciones de excavación	55
4.3.2	Tiempo de suministro de equipos	56
4.3.3	Asistencia técnica y personal	56
4.3.4	Velocidad de excavación	56
4.3.5	Sobre excavación del túnel	58
4.3.6	Seguridad en los túneles	58
4.3.7	Generación de gases	59
4.3.8	Longitud económica de excavación	59
4.4	Consideraciones a tomar en cuenta para una futura implementación masiva del método de excavación de túnel con TBM en Arequipa	60
CONCLUSIONES		63

RECOMENDACIONES.....	65
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	66

INDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Operacionalización de variables.	6
Tabla N° 2: Distribución de un back-up simple escudo.	18
Tabla N° 3: Dosificación de insumos para elaboración de hormigón dovelas.	22
Tabla N° 4: Dosificación de insumos para elaboración de mortero bicomponente.	45
Tabla N° 5: Cantidad de materiales en un avance de la TBM, peso en toneladas.	48
Tabla N° 6: Datos reales de rendimientos de excavación TBM simple escudo a lo largo del mundo.	57
Tabla N° 7: Datos reales de rendimientos de excavación método P&V a lo largo del mundo.	58

INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Maquinas tuneladoras.....	9
Figura N° 2: Esquema tuneladora tipo topo.	11
Figura N° 3: Tuneladora tipo simple escudo.	12
Figura N° 4: Tuneladora tipo doble escudo.	13
Figura N° 5: Tuneladora tipo EPB.....	14
Figura N° 6: Diagrama de equilibrio de presiones en un EPB.	14
Figura N° 7: Tuneladora tipo Slurry Shield.	16
Figura N° 8: Tuneladora tipo escudo mixto.	17
Figura N° 9: Sistema Back Up de un escudo Herrenknecht.	19
Figura N° 10: Conformación de un anillo de dovelas.....	22
Figura N° 11: Limpieza de molde de dovela.....	23
Figura N° 12: Aplicación de desencofrante en molde.	24
Figura N° 13: Colocación de hormigón.	24
Figura N° 14: Fratasado de superficie.....	24
Figura N° 15: Curado del hormigón.....	25
Figura N° 16: Volteo de dovela.	25
Figura N° 17: Colocación y pegado de junta.	26
Figura N° 18: Acopio de dovelas en fabrica.	26
Figura N° 19: Transporte de dovelas al proyecto.	27
Figura N° 20: Acopio de dovelas en proyecto.	27
Figura N° 21: Distribución de plataforma Chalhuanca.....	28
Figura N° 22: Antes del movimiento de tierras y montaje de instalaciones en plataforma Chalhuanca.	31
Figura N° 23: Vista actual de plataforma Chalhuanca.	31
Figura N° 24: Obras preliminares del túnel.	33
Figura N° 25: Conformación de un tren de aprovisionamiento túnel.....	36
Figura N° 26: Líneas de inyección en el escudo de cola.	46
Figura N° 27: 16 posibles posiciones de la dovela llave.....	51
Figura N° 28: Factores a tener en cuenta para la colocación de la dovela llave parte 1.	52
Figura N° 29: Factores a tener en cuenta para la colocación de la dovela llave parte 2.	53
Figura N° 30: Coste según longitud del túnel excavado para los métodos con TBM y Perforación & Voladura.....	60

RESUMEN

En el Perú, la agricultura es uno de los grandes actores de nuestra economía la cual contribuye importantemente a nivel social, desde épocas preincaicas el Perú se ha sostenido y sobresalido por la actividad agrícola. Actualmente tenemos grandes extensiones de tierras eriazas esperando ser irrigadas y así empezar a producir.

Para lograr que estas extensiones de tierras sean irrigadas se tiene la necesidad de realizar proyectos de envergadura, comenzar a represar nuestras aguas en las zonas altoandinas y llevar a donde sea necesario, generalmente estas extensiones de tierra se encuentran cerca a la costa por lo que para derivar estas aguas represadas son necesarios grandes túneles a través de los andes.

Este trabajo de investigación está basado en el proyecto de irrigación de las Pampas de Sigwas el cual tiene una larga historia, este proyecto viene desde los años 70 con Velasco Alvarado de presidente y el cual no fue ejecutado por diversos inconvenientes, y sobre todo por la experiencia obtenida en la etapa I denominada Majes I, en el cual se tuvo cerca de 40 km de excavación de túnel por el método convencional y se demoró cerca de 20 años en terminar el proyecto por diversos motivos ya sea constructivos o políticos.

En el presente trabajo de investigación analizaremos el proceso constructivo del túnel Pucara Trasandino del proyecto Majes Sigwas II ejecutado por el método de excavación TBM y las Consideraciones a tener en cuenta para una futura implementación masiva del método de excavación de túnel con TBM en Arequipa, ya sea para proyectos de irrigación, viales, energéticos, etc.

Del trabajo de investigación se puede concluir:

- Al utilizar el método de excavación con tuneladora la seguridad de los trabajadores es máxima, los accidentes laborales en excavación de túneles con TBM son casi inexistentes, pasa todo lo contrario para otros métodos de excavación convencional, esto sucede por la sencilla razón de que el personal obrero siempre trabaja con el terreno recubierto por concreto prefabricado, lo que se consigue con esto es que se elimine el principal factor de accidentes laborales en construcción de túneles que son los desprendimientos de rocas.

- Excavando los túneles con tuneladora se pueden obtener rendimientos diarios de 3 a 4 veces más altos que excavar con métodos convencionales, los rendimientos de excavación con TBM están alrededor de los 20 a 25 m diarios, lo que por método convencional aproximadamente están entre 5 a 7 metros diarios, este rendimiento influye significativamente en los plazos de ejecución de los proyectos, lo que al final se puede repercutir en dinero.

- Los túneles con tuneladora son la forma de excavar más amigables con el medio ambiente ya que los principales factores de contaminación en construcción de túneles son los siguientes:
 - Contaminación por explosivos que al usarse contaminan los suelos y aguas subterráneas, esto excavando con TBM no sucede ya que no se usan explosivos.

 - Contaminación acústica, por la misma razón que la anterior al usar explosivos se produce este tipo de contaminación, esto en el método TBM no sucede porque no se usan explosivos.

 - Contaminación con gases, al excavar con métodos convencionales se usan bastantes equipos de línea amarilla que al usar petróleo expiden CO₂, por método TBM no se usa petróleo ya que las tuneladoras son eléctricas y la contaminación por CO₂ es mínima.

ABSTRACT

In Peru, the agriculture is one of the great actors in our economy which contributes significantly at the social level, since pre-Inca times Peru has been sustained and excelled by agricultural activity. We currently have large areas of eriazas land waiting to be irrigated and thus start producing.

To ensure that these extensions of land are irrigated, there is a need to carry out large-scale projects, begin to dam our waters in the high Andean areas and take them where necessary, generally these extensions of land are close to the coast, so that Bypassing these dammed waters large tunnels are necessary through the Andes.

This research work is based on the irrigation project of the Pampas de Sigwas which has a long history, this project comes from the 70s with Velasco Alvarado as president and which was not executed due to various inconveniences, and especially by the experience obtained in stage I called Majes I, in which there was about 40 km of tunnel excavation by the conventional method and it took about 20 years to complete the project for various constructive or political reasons.

In this research we will analyze the construction process of the Pucara Trasandino tunnel of the Majes Sigwas II project executed by the TBM excavation method and the Considerations to be taken into account for a future massive implementation of the TBM tunnel excavation method in Arequipa, since whether for irrigation, road, energy, etc. projects

From the research work it can be concluded:

- When using the method of excavation with TBM, the safety of workers is maximum, occupational accidents in tunnel excavation with TBM are almost non-existent, the opposite is true for other conventional excavation methods, this happens for the simple reason that the Workers always work with the ground covered by prefabricated concrete, what is achieved with this is that the main factor of accidents in the construction of tunnels that are rockfalls are eliminated.
- Digging tunnels with tunneling machine can obtain daily yields of 3 to 4 times higher than excavating with conventional methods, the excavation yields with TBM are around 20 to 25 m daily, which by conventional method are

approximately between 5 to 7 meters per day, this performance significantly influences the execution times of the projects, which in the end can have an impact on money.

- Tunnels with tunnel boring machines are the most environmentally friendly way of digging since the main pollution factors in tunnel construction are the following:
 - Contamination by explosives that when used contaminate the soil and groundwater, this excavating with TBM does not happen since no explosives are used.
 - Noise pollution, for the same reason as the previous one when using explosives this type of contamination occurs, this in the TBM method does not happen because no explosives are used.
 - Pollution with gases, when digging with conventional methods, a lot of yellow line equipment is used that uses CO₂ to emit oil, by TBM method no oil is used since the TBMs are electric and CO₂ pollution is minimal.

INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de presente trabajo de investigación es analizar el proceso constructivo del túnel Pucara trasandino del proyecto Majes Siguan II y dar a conocer las consideraciones a tener en cuenta para una futura implementación masiva del método de excavación de túnel con TBM en Arequipa

La estructura del presente trabajo de investigación es:

- **Capítulo I**

En este capítulo se desarrolló los planteamientos de problemas general y específicos, así como también los objetivos generales y específicos, se sustentó la justificación técnica, económica y social, se describió la importancia del proyecto, se plantearon las hipótesis y variables, se definieron los métodos y alcance de la investigación, diseño de la investigación y población y muestra.

- **Capítulo II**

En este capítulo se desarrollará el marco teórico comenzando por los antecedentes del problema en donde daremos a conocer algunas tesis que fueron de soporte para desarrollar el presente trabajo de investigación, también definiremos que son las maquinas tuneladoras y daremos a conocer los tipos de máquinas tuneladoras que existen.

- **Capítulo III**

En este capítulo desarrollaremos todo lo referente al proceso constructivo del túnel con tuneladora simple escudo en donde explicaremos los diferentes ciclos que se tienen al momento de excavar, como lo son el ciclo exterior, ciclo de transporte y ciclo interior.

- **Capítulo IV**

En este capítulo haremos un comparativo entre los métodos de excavación perforación y voladura contra el método de excavación con tuneladora, y daremos a conocer unas consideraciones a tener en cuenta para una futura

implementación masiva del método de excavación de túnel con TBM en Arequipa.

- **Conclusiones y recomendaciones**

En este título se podrá encontrar las conclusiones y recomendaciones que se lograron obtener del presente trabajo de investigación

- **Referencias bibliográficas**

En este título se podrá leer el listado de toda la bibliografía utilizada para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 Planteamiento y formulación del problema

1.1.1 Planteamiento del problema

En la actualidad las aguas del río Colca y Apurímac desembocan en el océano Atlántico, lo que genera que dicho recurso hídrico no sea aprovechado adecuadamente.

El gobierno del Perú plantea irrigar las pampas de Sigwas con dicha agua, ampliando la frontera agrícola en 38,500 hectáreas, para lo cual se necesita represar las aguas del río Colca y Apurímac y mediante un túnel de conducción llevar las aguas hacia el río sigwas, donde se construirá un pequeño embalse y un túnel final de conducción denominado Lluclla – Sigwas, que será el que desemboque las agua en un vaso regulador en las pampas de Sigwas, para poder ser distribuido en dichas Pampas. (Proinversión, 2018)

El presente proyecto de investigación abordara el proceso constructivo del primer túnel denominado Pucara – Trasandino que tiene una longitud de 15,865 m y un diámetro interno terminado de 5.00 m, el proyecto es ejecutado por la empresa española Cobra Instalaciones y Servicios, la ejecución integral del proyecto es de 50 meses, para el túnel Pucara – Trasandino es de 21 meses con un presupuesto de 150 millones de dólares. (Proinversión, 2018)

La obra se encuentra situada en la Provincia de Caylloma y se accede por la carretera que une la ciudad de Arequipa con la ciudad de Chivay, y Caylloma. Se encuentra dentro de la jurisdicción de Caylloma y Tisco.

El Proyecto Majes – Sigwas II, Fase I, es un proyecto de desarrollo regional basado en la regulación y derivación de recursos hídricos de las cuencas altas de los ríos Salado y Apurímac, para su uso racional en la irrigación de hasta 60,000 hectáreas de tierras nuevas en las Pampas de Majes y Sigwas, Departamento de Arequipa. (Proinversión, 2018)

Como parte del plan de incremento de las zonas de riego en el departamento de Arequipa, se planificó el Proyecto Majes Sigvas II el cual incluiría como zona de cultivo las Pampas de Majes y Sigvas. En una primera etapa se completó las obras destinadas a irrigar las Pampas de Majes, correspondiendo la segunda etapa la irrigación de las Pampas de Sigvas. (Proinversión, 2018)

El Proyecto Majes Sigvas – Etapa II, Fase I, tiene como propósito irrigar una extensión neta de 38,500 ha de terrenos eriazos, ubicados en las Pampas de Sigvas. La Etapa II cuenta con dos fases:

La Fase I que comprenden la presa Angostura y los túneles Pucará y Trasadino; la Fase 2 que comprende la derivación Lluclla-Sigvas y el sistema de distribución de las aguas. Adicionalmente la Etapa II está conformada por obras existentes como la presa Condorama, la bocatoma Tuti y el sistema de aducción Majes-Sigvas. (Proinversión, 2018)

Con fecha 9 de diciembre del 2010, Concesionaria Angostura Sigvas S.A. celebró con el Estado de la República del Perú, debidamente representado por el Gobierno Regional de Arequipa, el Contrato de Concesión para la Construcción, Operación y Mantenimiento de las Obras Mayores de afianzamiento hídrico y de infraestructura para irrigación de las Pampas de Sigvas (Proyecto Majes – Sigvas II Etapa)

El Proyecto considera la ejecución de los túneles TRANSANDINO Y PUCARA, de 9522.00 m y 6330.00 m respectivamente, dentro de las obras que son necesarias para la operación y mantenimiento de las obras mayores de afianzamiento hídrico y de infraestructura para irrigación de las Pampas de Sigvas. Proyecto especial Majes Sigvas Etapa II. (Proinversión, 2018)

1.1.2 Formulación del problema

1.1.2.1 Problema general

¿Cómo es el procedimiento constructivo del túnel Pucara Trasadino con tuneladora simple escudo en el proyecto Majes Sigvas II fase I, Sibayo – Caylloma - Arequipa 2019?

1.1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cuál es la mejora en la seguridad del personal obrero utilizando este método constructivo para excavar túneles?
- ¿Qué tanto mejora el rendimiento en producción al utilizar este método constructivo para excavar túneles?
- ¿Por qué este método de excavación es amigable con el medio ambiente?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Analizar el procedimiento constructivo del túnel Pucara Trasandino con tuneladora simple escudo en el proyecto Majes Sigvas II fase I, Sibayo – Caylloma - Arequipa 2019.

1.2.2 Objetivos específicos

- Establecer la seguridad del método constructivo de túneles con tuneladora.
- Evidenciar el alto rendimiento por día de excavación con este método de construcción de túneles.
- Evidenciar la manera amigable de trabajar con el medio ambiente.

1.3 Justificación

1.3.1 Justificación técnica

Técnicamente al excavar los túneles con tuneladora se alcanzan altos rendimientos, altos estándares de seguridad al personal, amigable con el medio ambiente y calidad de obra única. La tuneladora o TBM por sus siglas en inglés Tunnel Boring Machine, es una máquina excavadora de túneles y a su vez coloca

sostenimiento de concreto al mismo, tiene una longitud total de 234 m y coste aproximado de 14 millones de dólares.

1.3.2 Justificación económica

Los túneles con tuneladora son rentables cuando tienen una longitud mayor a 6 km ya que sus instalaciones son muy costosas, a longitudes menores a la indicada no sale a cuenta económicamente usar este método de excavación, pero las vidas humanas son incalculables, por lo que no habría punto de comparación con otros métodos de excavación ya que el más seguro para el personal es excavar los túneles con tuneladora.

1.3.3 Justificación social

La ejecución de este proyecto tendrá un impacto social muy grande ya que ampliaría la frontera agrícola Arequipeña en 38,500 hectáreas, generando 106,000 empleos directos y 80,000 empleos indirectos. La inversión privada en Arequipa incrementaría en un 18% anual. (Hernández, 2018)

1.4 Importancia

Es importante conocer los nuevos métodos de excavación de túneles que se utilizan en el primer mundo, implementar masivamente esta tecnología en nuestro país, ya que sería muy beneficioso en las obras públicas, porque comparándolo con el método antiguo de perforación y voladura, este es muy dañino para el medio ambiente por usar explosivos como dinamita y se expone de sobre manera al personal que labora porque este tipo de método se tiene que excavar sin un sostenimiento que proteja al trabajador, por otro lado el mantenimiento que necesita túnel excavando con método de perforación y voladura es constante y costoso.

Las capitales de Latinoamérica cuentan con un sistema de transporte subterráneo denominado metro, ciudades como Santiago en Chile, Bogotá en Colombia, Quito en Ecuador, Caracas en Venezuela, Rio de Janeiro en Brasil, etc. Todas estas cuentan con un metro subterráneo excavados con máquinas tuneladoras, en Lima esta pronto a realizar la línea 2 del metro de Lima con 2 tuneladoras de 10.00 m de diámetro, porque no pensar en provincias como La

libertad, Piura, Cajamarca, Puno, Junín, Cusco, Arequipa, Lambayeque y Ancash que sumadas tienen casi el 40% de la población nacional, tengan su propio metro, utilizando esta tecnología que es antigua en el viejo continente.

El Perú al ser un país con el relieve tan accidentado necesita bastantes túneles y no carreteras interminables y peligros bordeando cerros, causando innumerables accidentes.

1.5 Hipotesis

El proceso constructivo con tuneladora simple escudo del túnel Pucara Trasandino del proyecto Majes Siguan II Fase I, Sibayo – Caylloma – Arequipa 2019, genera una mayor seguridad a la integridad del personal, altos rendimientos de excavación y es mucho más amigable con el medio ambiente, ya que su procedimiento de excavación está libre de explosivos los que son muy contaminantes para el medio ambiente.

1.6 Variables

Variable independiente	Dimensión	Indicador
Procedimiento de construcción de túnel con método de excavación con tuneladora	Ciclo exterior	Elaboración del bicomponente, acopio y carga de anillos y carga de materiales auxiliares.
	Ciclo de abastecimiento y transporte	Mediante los trenes de aprovisionamiento e instalaciones fijas como tuberías.
	Ciclo interior	Descarga de materiales, perforación, inyección de mortero, montaje de anillos y montaje de servicios aux.
Variable dependiente	Dimensión	Indicador
Mejoras seguridad del personal obrero, altos rendimientos y	Seguridad	La seguridad del personal obrero se debe básicamente al recubrimiento que se va montado en el túnel luego de hacer 1 avance.
	Rendimiento	Los rendimientos de excavación de este método no tienen comparación otros

amigable con el medio ambiente		métodos los cuales los supera ampliamente.
	Medio ambiente	Este método es amigable con el medio ambiente porque no se utiliza explosivos en la excavación.

Tabla N° 1: Operacionalización de variables.

Fuente: Elaboración propia.

1.7 Métodos y alcance de la investigación

Se trata de una investigación de método no experimental; dicha investigación se realiza sin manipular deliberadamente las variables independientes, se observan situaciones ya existentes, no provocadas intencionalmente en la investigación por quien la realiza. En la investigación no experimental las variables independientes ocurren y no es posible manipularlas, no se tiene control directo sobre dichas variables ni se puede influir sobre ellas, porque ya sucedieron, al igual que sus efectos. (Hernandez, Fernandez, & Baptista, 1991)

El tipo de investigación es transeccionales descriptivos, Los diseños transeccionales descriptivos tienen como objetivo indagar la incidencia de las modalidades o niveles de una variable en una población. El procedimiento consiste en ubicar en una variable a un grupo de personas u otros seres vivos, objetos, situaciones, contextos, fenómenos, comunidades; y así proporcionar su descripción. Son, por tanto, estudios puramente descriptivos y cuando establecen hipótesis, éstas son también descriptivas (de pronóstico de una cifra o valores). (Hernandez, Fernandez, & Baptista, 1991)

Con respecto al nivel de la investigación, corresponde a descriptiva; la información que obtendremos servirá para entender perfectamente el problema de estudio. (Namakforoosh, 2005)

1.8 Diseño de la investigación

Dado que es una investigación no experimental, en esta categoría se utiliza principalmente la técnica de la observación.

Este método de recolección de datos consiste en el registro sistemático, válido y confiable de comportamientos y situaciones observables, a través de un conjunto de categorías y subcategorías. (Hernandez, Fernandez, & Baptista, 1991)

1.9 Población y muestra

1.9.1 Población de estudio

La población de la que se obtendrá información para el proyecto de investigación, serán los datos recogidos de campo en el proceso de excavación del túnel, así como también el expediente técnico de la obra, informes de producción, videos y fotos de todo el procedimiento constructivo del túnel Pucara Trasadino con tuneladora simple escudo en el proyecto Majes Sigvas II fase I, Sibayo – Caylloma - Arequipa 2019

1.9.2 Tamaño de muestra

En cuanto a la muestra se trabajará con la totalidad ya que son datos muy específicos de los cuales no se pueden descartar, ya que al ser un proyecto descriptivo los datos son muy representativos.

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

2.1 Antecedentes del problema

No se pudo encontrar antecedentes sobre el tema en particular a evaluar que es el procedimiento constructivo de un túnel con tuneladora, por lo que se convierte en un desafío aún más alentador, ya que se podría decir que este proyecto de investigación será una de los pocos en su campo, no encontrar trabajos parecidos no es algo negativo, ya que al estar trabajando directamente en un túnel con tuneladora se tiene de donde recoger todos los datos que se necesita, si implica trabajar un poco más pero el proyecto saldrá adelante. A continuación, presentare otros antecedentes que guardan relación con los túneles con tuneladora y posteriormente explicare brevemente como es “El procedimiento constructivo del túnel Pucara Trasandino con tuneladora”.

En un primer trabajo de investigación de Emiliano Paredez (2010), quien realizó “Las maquinas tuneleras tipo “TBM” como alternativa al sistema de perforación y voladura para la excavación de túneles caso: túneles Yuncan”, el trabajo de investigación se realizó en la Universidad Nacional de Ingeniería en Lima Perú, para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Mención en Ingeniería de Minas, La cual tiene como uno de sus objetivos delinear técnica y económicamente, el sistema más conveniente de excavación de túneles. El cual nos indica que el sistema de “Perforación y Voladura” (P&V), aplicado a la excavación de túneles, viene siendo reemplazado por una variedad de tipos y tamaños de máquinas tuneleras (TBMs, Tunnel Boring Machines); como producto del avance tecnológico, exigencias de productividad y control ambiental, escenarios al que el Perú no está ajeno. El presente estudio, pretende ser un marco de referencia para la selección del sistema más conveniente de excavación, bajo una longitud mínima que justifique su aplicación, información que sirve para el proyecto ya que tiene información local que es muy escasa.

Del mismo modo se encontró un trabajo que corresponde a Pedro Soto (2004), quien realizo “Construcción de túneles”. El trabajo de investigación se realizó en la Universidad Austral de Chile, para obtener el título de constructor civil, la cual tiene por principal objetivo realizar un estudio detallado de esta innovación

tecnológica la cual es la tuneladora, sin olvidar los métodos clásicos, de forma que ésta sirva de guía para las diferentes personas que se ven involucradas en la construcción de un túnel, ya que las publicaciones existentes son escasas y, debido al constante avance del mundo tecnológico, no debidamente actualizadas. En este proyecto se encontró datos y estadísticas importantísimas para el desarrollo del proyecto.

2.2 Excavación con máquinas tuneladoras o TBMs

Las máquinas para excavar túneles también se les llaman TBM o tuneladoras, las cuales excavan los túneles a sección competa y a la vez colocar sostenimiento de segmentos de concreto prefabricado denominados dovelas.

Para la ejecución de túnel en terrenos frágiles o inestables, se utilizan las TBMs de tipo escudo, son máquinas con una cabeza de corte giratoria equipadas con herramientas de corte conocidas como cortadores, construidas con el diámetro que se desea hacer la excavación, estas máquinas avanzan con el empuje de una seria de gatos hidráulicos perimetrales que se apoyan en las dovelas, todo este trabajo se realiza dentro del interior del escudo. (Gonzalez, 2016)

Existen distintos tipos de escudos según el terreno a excavar, si hablamos de terrenos de roca competente y estable hablamos de excavar con una TBM de escudo abierto, para terrenos con señales de inestabilidad de utiliza un TBM de escudo cerrado.



Figura N° 1: Maquinas tuneladoras.

Fuente: (Gonzalez, 2016)

Los rendimientos de las TBMs normalmente son muy elevados comparándolo con otros métodos, aunque también son variables dependiendo a la dovela a usar, al escudo utilizar.

2.3 Tipos de máquinas tuneladoras

En la actualidad hay distintos tipos de TBMs diseñadas según el terreno a excavar, por un lado, tenemos a los Topos/Gripper son tuneladoras diseñadas para excavar en roca duras o semi duras, en terrenos buenos que no tienen necesidad de colocar sostenimiento. Por otro lado, están los escudos, las cuales son más complejas que normalmente se utilizan en suelos blandos o inestables. Seguido de esto tenemos las TBMs doble escudo que trabaja de los 2 tipos como topo o simple escudo, estas máquinas están diseñadas para terrenos que son muy cambiantes. Finalmente, en los últimos años, nuevos proyectos de túneles están siendo ejecutados en terrenos de material muy cambiante lo que obliga a la construcción de nuevos tipos de tuneladoras es ahí donde nacen las tuneladoras de escudos mixtos. (Gonzalez, 2016)

2.3.1 Topos o tuneladoras abiertas

Son tuneladoras diseñadas para excavar en roca duras o semi duras, en terrenos buenos que no tienen necesidad de colocar sostenimiento.

2.3.1.1 Topo (Gripper)

Son máquinas diseñadas para terrenos con rocas competentes (roca dura o estables), son máquinas básicas y simples, al igual que cualquier TBM consta de una cabeza de corte del mismo diámetro a excavar, dicha cabeza está equipada con cortadores, situadas según diseño para un mejor performance para el corte de la roca, el proceso de excavación se resume en lo siguiente, cuando la cabeza de corte comienza a girar la TBM desprende los grippers los cuales se apoyan a los costados del terreno para mantenerse estacionaria, luego los cilindros de empuje ejercen fuerza sobre la viga principal de la tuneladora lo cual hace que los cortadores de la cabeza de corte comiencen a rozar el terreno y fracturando la roca, luego por una faja transportadora se lleva el material excavado para ser eliminado, una vez los gatos estén estirados a su máxima longitud se considera un avance, se

procede a realizar el sostenimiento correspondiente al terreno y se vuelve a empezar el ciclo de excavación. (Gonzalez, 2016)

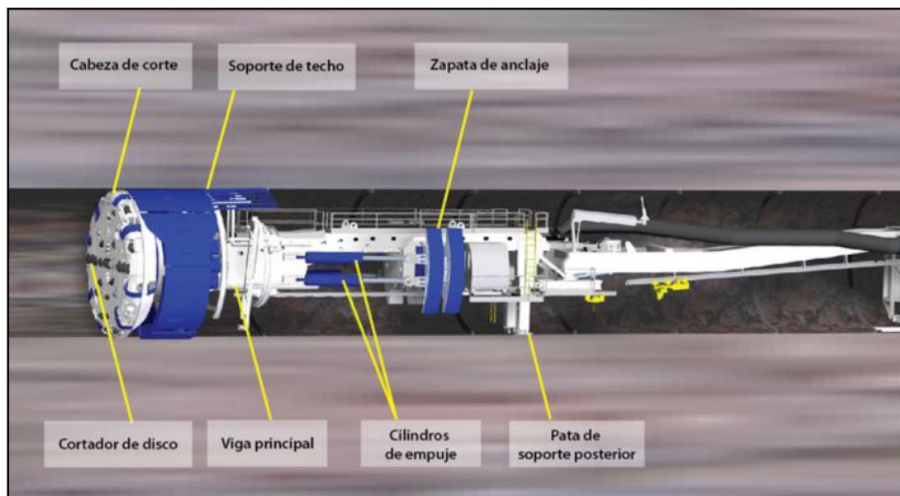


Figura N° 2: Esquema tuneladora tipo topo.

Fuente: (Gonzalez, 2016)

2.3.2 Escudos

2.3.2.1 Tuneladora simple escudo

Este tipo de tuneladoras simple escudo son usadas para terrenos roca dura, algo inestables con riesgo de desprendimientos o deslizamientos, consta de un escudo metálico protector tras la cabeza de corte, este tipo de tuneladoras va colocando anillos de concreto prefabricado en cada avance que realiza, la principal utilidad del escudo es evitar la caída de rocas dentro de la máquina y a los trabajadores. Para realizar un avance los gatos hidráulicos de empuje se apoyan en las dovelas colocadas por lo que este tipo de TBM no es necesarios los grippers, la figura N° 3 se muestra los componentes de una TBM simple escudo.

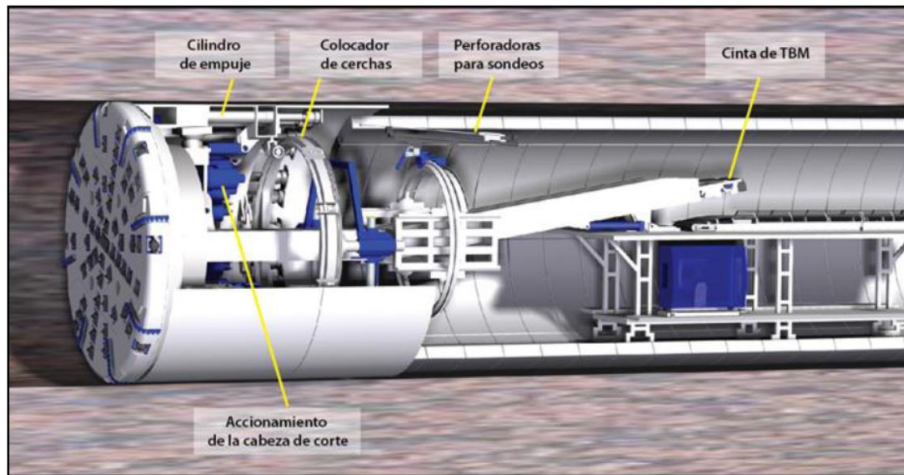


Figura N° 3: *Tuneladora tipo simple escudo.*
Fuente: (Gonzalez, 2016)

2.3.2.2 Tuneladora doble escudo

Las tuneladoras doble escudo constan de 2 partes, una de ellas es el escudo delantero donde se encuentra la cabeza de corte y los cilindros de empuje principales, y la otra es el escudo de cola donde están ubicados los cilindros de empuje auxiliares y el erector de dovelas. Entre los dos escudos se encuentra el escudo intermedio o articulación, el cual tiene un menor diámetro que los dos anteriores, el cual se ancla en el terreno mediante los grippers lo que permite que el escudo delantero siga excavando mientras el escudo de cola coloca el sostenimiento de dovelas, esto no sucede en una tuneladora simple escudo la cual deja de excavar para colocar el sostenimiento, lo que permite a las TBMs doble escudo tener aun rendimientos superiores.

Lo explicado en el párrafo anterior se da cuando se está trabajando en un terreno de roca estable o competente donde incluso se puede obviar el sostenimiento, pero en el caso que la tuneladora encuentre terreno regular o malo, los grippers del escudo intermedio no encontraría un terreno bueno donde apoyarse por lo que estos se retraen y la TBM trabajaría en modo simple escudo la apoyaría sus gatos auxiliares en los anillos de sostenimiento y ambos escudos delantero y trasero avanzarían juntos.

En conclusión, podemos observar que este tipo de TBMs puede trabajar en modo simple escudo o doble escudo dependiendo del tipo de terreno que se

vaya a excavar. En la figura N° 4 se observa las partes de una TBM doble escudo.

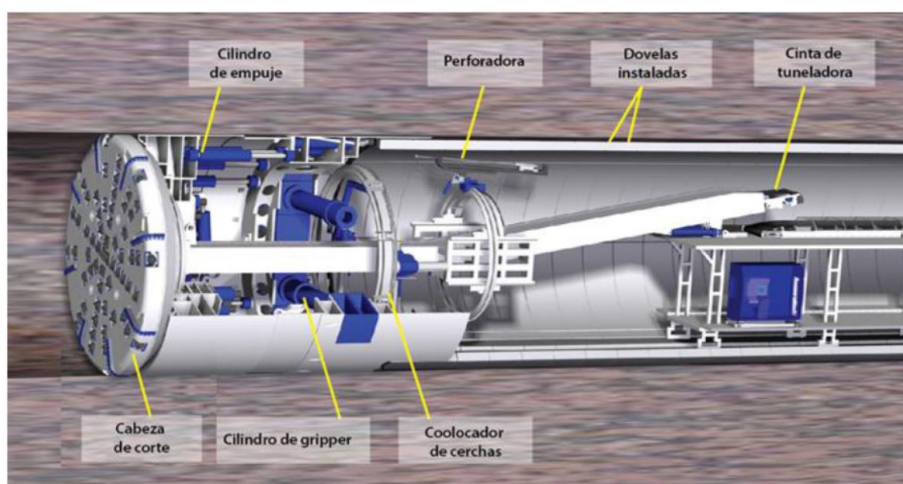


Figura N° 4: Tuneladora tipo doble escudo.

Fuente: (Gonzalez, 2016)

2.3.2.3 Escudo de balance de presión de tierras (EPB)

Los escudos de presión de tierra, llamados escudos EPB, (sigla en inglés Earth Pressure Balance) fueron diseñadas para poder afrontar el problema de excavar en terrenos bastantes inestables, este tipo de tuneladoras tratan el material excavado con polímeros y espumas especiales lo que permite excavar de manera adecuada y así evitar que el terreno se pueda venir contra la maquina TBM.

Básicamente el funcionamiento de estas tuneladoras se basa en una cámara donde se almacena material excavado justo detrás de la cabeza de corte lo que origina un equilibrio de presiones contra el terreno y así evitar posibles asentamientos superficiales, otra característica fundamental es que este tipo de TBMs cuenta con un tornillo sinfín para extraer los escombros. En la figura N° 5 se presenta un TBM tipo EPB, y en la figura N° 6 se puede apreciar el equilibrio de presiones generado entre el terreno y la TBM. (Gonzalez, 2016)

De la misma forma que todas las tuneladoras de frente cerrado, las EPB hacen un avance de excavación con los polímeros y aditivos necesarios para tratar el terreno, luego con el erector se procede a colocar el sostenimiento de dovelas y todas las instalaciones necesarias como tuberías, cables, banda de cinta, etc., luego se vuelve a repetir el ciclo.

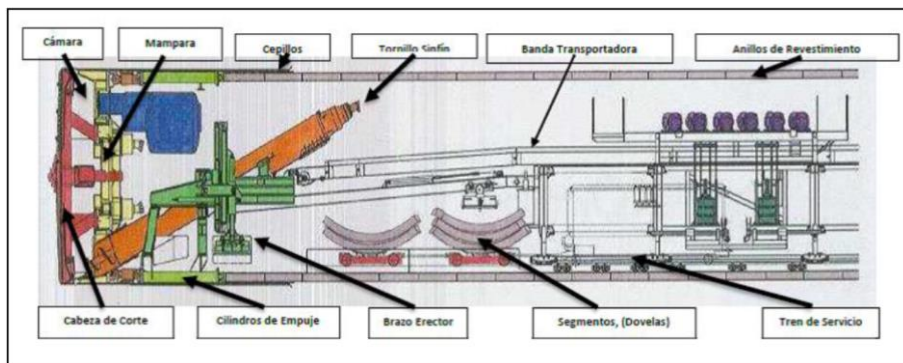


Figura N° 5: Tuneladora tipo EPB.
Fuente: (Gonzalez, 2016)

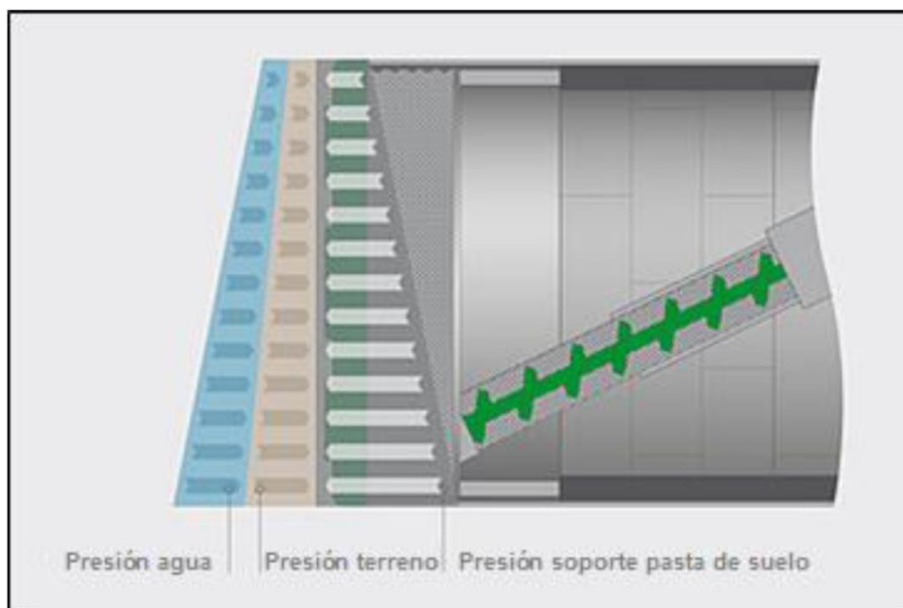


Figura N° 6: Diagrama de equilibrio de presiones en un EPB.
Fuente: (Gonzalez, 2016).

2.3.2.4 Escudo con presión de lodos (Slurry Shield)

Son el tipo de tuneladoras ideal para excavar en suelos no cohesivos, inestables y en particular con cargas importantes de agua. La idea básica consiste en operar con bombeo de lodos arcillosos en un circuito cerrado que incluye el espacio entre frente y cabeza. Por una parte, el terreno arrancado por la rueda de corte se mezcla con lodos, forma un fluido espeso, pero bombeable. La bomba principal lo aspira y envía al exterior por la tubería de salida. Al mismo tiempo, por la tubería de entrada, se aporta al frente un caudal equivalente de lodos recuperables por separación del escombro de la mezcla, con lo que se mantiene la presión en el frente. (Serradell, 2017)

El desarrollo de la tecnología de los escudos de lodos logró pleno éxito a partir de dos líneas básicas de investigación diferentes, la primera desarrollada en Japón – slurry shield – empleando todo tipo de arcillas para formar el lodo y la segunda, la alemana –hydroshields – que utilizó exclusivamente lodos bentoníticos, usados hoy en día con carácter general. Las dos características principales de la versión japonesa son: la rueda cerrada que ayuda a la estabilidad del frente y el mantenimiento de la presión por regulación del caudal de lodos. El inconveniente principal es la limitación de los tamaños máximos del suelo a excavar, derivado del tamaño de las aberturas. Para resolver esta limitación, la técnica alemana introdujo las tres variantes principales:

- Una burbuja de aire comprimido para mantener la presión del lodo, pues la ventaja del aire comprimido es la respuesta a una reducción de la presión en el frente que puede ser prácticamente instantánea.
- El trabajo con lodos bentoníticos que mejoran la estabilidad del terreno en el frente.
- La rueda abierta, que permite una libertad mayor de tamaños, a reducir luego por machaqueo hasta 100 mm., con todo lo cual se amplió notablemente su campo de aplicación. (Serradell, 2017, p. 38)

En todo caso, el transporte del material se hace hidráulicamente, y de ahí el nombre de “hydroshield” usado para todas esas máquinas. Las ventajas de la bentonita se conocieron durante el desarrollo de la tecnología de las pantallas continuas. El lodo arcilloso asegura, en primer lugar, una excelente contención del frente, porque se produce no solo por medio de la presión hidráulica que ejerce directamente la masa de lodo y terreno excavado, además el lodo penetra unos pocos centímetros en los huecos del material por excavar y forma un cake que ayuda de manera considerable a conseguir la estabilidad del frente de excavación. (Serradell, 2017)

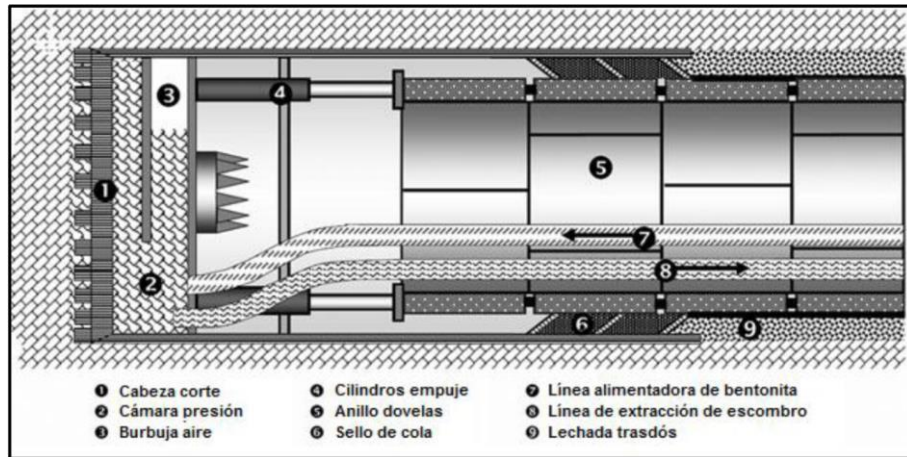


Figura N° 7: Tuneladora tipo Slurry Shield.
Fuente: (Gonzalez, 2016)

2.3.3 Escudos mixtos

En esta nueva era de las maquinas tuneladoras es cada vez más común que en los proyectos se encuentren terrenos a excavar de tipo mixto, que van desde roca dura hasta suelos malos sueltos. Dentro de estas condiciones nacen las tuneladoras tipo escudos mixtos que son la mejor solución para este tipo de desafíos, la combinación más usada es EPB-Slurry.

Las TBMs mixtas tienen la característica de reducir riesgos y hacer realidad excavaciones bastantes complicadas, todo parte de tener un muy buen estudio geológico, ejemplos, un escudo mixto EPB/Topo esta máquina de debe optimizar o bien para Topo o para EPB, esto depende del tipo de terreno digamos que el 70% es roca dura y el 30% suelo suelto, entonces la optimización seria para Topo y con esto poder excavar sin contratiempos. Y digamos que el suelo tenga bastante contenido de agua y en otros tramos sea un terreno suelto sin contenido de agua, en este caso utilizaríamos una tuneladora escudo mixto Slurry-EPB.

La figura N° 8 se aprecia un escudo mixto Slurry-EPB de marca Herrenknecht, donde se puede identificar el sistema de bombeo para Slurry y el sistema de tornillos sinfín de una EPB para eliminar las tierras.

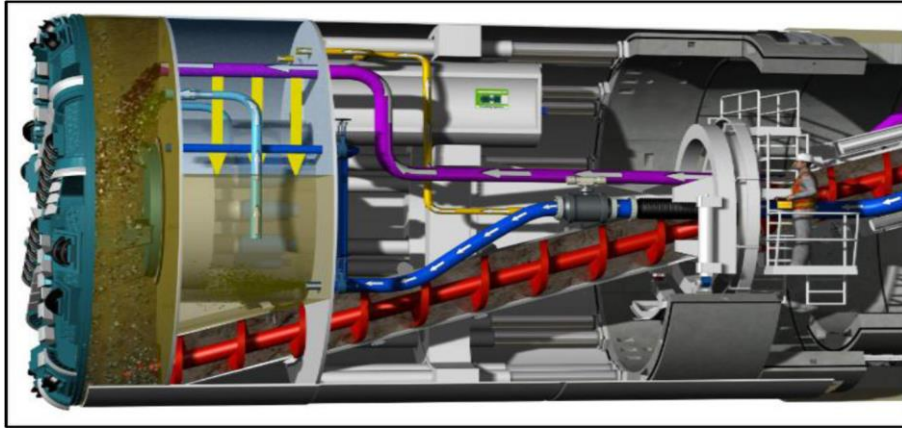


Figura N° 8: *Tuneladora tipo escudo mixto.*
Fuente: (Gonzalez, 2016)

2.3.4 Sistema back-up

El sistema back-up se puede definir como plataformas adosadas a la tuneladora donde se lleva la parte logística que necesita una tuneladora para excavar, los principales contratiempos de excavación de un túnel es la evacuación de escombros y tener los materiales o accesorios a la mano para no tener contratiempos, en una tuneladora esa es la función que cumple el back, ya que es un tren adosado a la TBM donde se lleva todo lo necesario inmediatamente para el correcto desenvolvimiento de la excavación.

La longitud del back-up depende del diámetro de excavación del túnel ya que si son diámetros medianos de 4 a 7 m el back-up solo tendrá un nivel por ende será muy largo llegando alcanzar longitudes de 250 m y si el diámetro de la tuneladora es de 8 metros a más, el back-up puede tener 2 o 3 niveles donde se pueden tener longitudes de 100 a 120 m de largo.

En el caso de una tuneladora simple escudo de unos 6 m de diámetro de excavación se tendrían los siguientes equipos en el back-up:

Remolque 01	Cabina de control Transferencia de cinta de TBM a cinta de túnel Captador de polvo Alimentador de dovelas
Remolque puente	Equipos de generación de espuma Zona de desplazamiento de grúa de dovelas Alimentador de dovelas
Remolque 02	Zona de desplazamiento de grúa de dovelas
Remolque 03	Bombeo de grasa EP2 y de cola

	Bombeo de componente B
	Descarga rápida
	Zona de desplazamiento de grúa de dovelas
Remolque 04	Unidades de bombeo de sistemas hidráulicos
	Reservorio de aceite hidráulico
	Sistema de refrigeración de Aceite
	Descarga rápida
	Zona de desplazamiento de grúa de dovelas
Remolque 05	Gabinetes de MCC01 y transformador 20KV/0.46KV
Remolque 06	Gabinetes de MCC02 y transformador 20KV/0.69KV
Remolque 07	Gabinetes de MCC02 y transformador 20KV/0.69KV
Remolque 08	Gabinete eléctrico para bicomponente SDB06
	Gabinete circuito de emergencia SDB05
	Gabinete de celdas de media tensión
	Gabinete sub-distribución eléctrica de grúa de dovelas
Remolque 09	Equipos bombeo de polímero
	Equipos de aire a presión (Compresor + tanque)
Remolque 10	Equipos bombeo de agua + tanque
	Equipos refrigeración y filtración de agua
	Equipos de bentonita + tanque
Remolque 11	Equipos de bombeo de componente A + tanque
Remolque 12	Contenedor de personal
Remolque 13	Contenedores eléctrico y mecánico
Remolque 14	Cámara de refugio
	Enrollador de manguera de componente B
Remolque 15	Enrollador de manguera de agua fría
	Enrollador de manguera de agua caliente
	Enrollador de manguera de componente A
	Enrollador de cable de media tensión
Remolque 16	Área de almacenamiento de tuberías
	Difusores de ventilación
	Área de almacenamiento de estructuras y equipos de cinta transportadora
Remolque 17	Zona de ampliación de cinta transportadora
Remolque 18	Generador de emergencia
	Cassette para almacenamiento de manga de ventilación

Tabla N° 2: Distribución de un back-up simple escudo.

Fuente: Elaboración propia.

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

2.3.4.1 Sistema back-up de vía única

El sistema de back-up por vía única depende del diámetro de excavación del túnel, ya que si los diámetros son pequeños de 4 a 7 metros solo entraría

una vía del tren y esto interfiere directamente en la producción del túnel ya que los materiales demorarían en llegar al back-up

2.3.4.2 Sistema back-up de doble vía

Cuando se tiene túneles de grandes diámetros mayores a 8 metros se puede trabajar con doble vía, esto haría que se optimice al máximo los rendimientos de excavación.

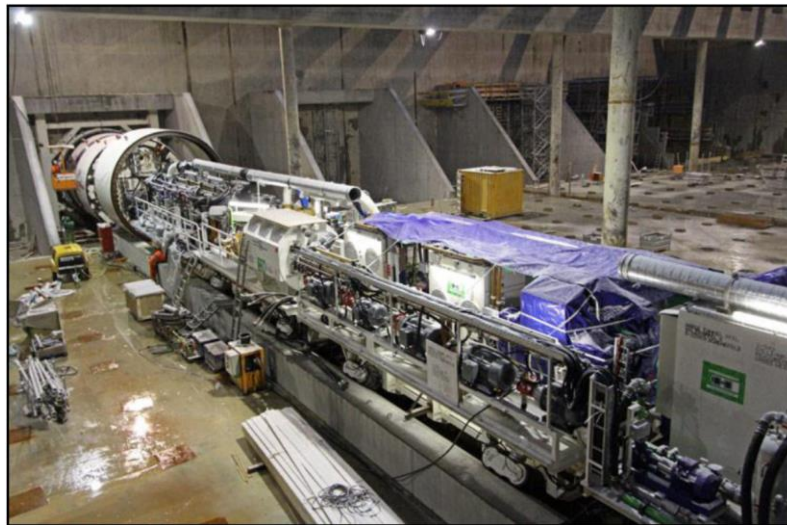


Figura N° 9: Sistema Back Up de un escudo Herrenknecht.

Fuente: (Gonzalez, 2016)

CAPÍTULO III

PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO TUNEL PUCARA TRASANDINO

3.1 Obras preliminares a excavación de túnel con tuneladora

3.1.1 Descripción de la tuneladora

Una vez analizada la geología y geotecnia del macizo rocoso se toma la decisión de elección del tipo de tuneladora a utilizar, en el caso de este proyecto se elige una tuneladora o TBM para excavar roca dura, del tipo “ESCUDO SIMPLE”, que colocará un sostenimiento/revestimiento de anillos de dovelas prefabricadas de concreto reforzado, del tipo denominado anillo universal, constituido por 4 + 2 dovelas, por ser el método más seguro y rápido de construcción de los túneles.

Con el fin de trabajar con pendiente favorable al desagüe por gravedad, dicha TBM construirá, primero, los 9.522,00 m del túnel TRASANDINO y, a continuación, los 6.330 m del túnel PUCARÁ.

Por lo que se refiere al diseño de la TBM, las características principales son las siguientes:

La tuneladora llevará a cabo las operaciones de excavación y colocación del sostenimiento/revestimiento del túnel de modo simultaneo.

La TBM tipo ESCUDO SIMPLE está formado por la rueda de corte y su accionamiento; el escudo delantero; el escudo intermedio con la articulación; el escudo de cola con el erector de dovelas para la colocación y fijación del anillo prefabricado de concreto reforzado y la cinta transportadora para extraer las tierras procedentes de la cámara de escombros existente entre la rueda o cabeza de corte y el mamparo, el cual soporta, a su vez, la rueda de corte.

A lo anterior se añade, como parte integrante de la TBM, un “BACK-UP” compuesto por 18 remolques, en los que se montan los equipos con los que se llevan a cabo todas las operaciones necesarias para realizar los sucesivos módulos de avance del túnel, de una longitud de 1,70 m.

Por último, debe señalarse que para garantizar que la construcción de los túneles sigue perfectamente el trazado del proyecto, tanto el ESCUDO SIMPLE como el “BACK-UP” se han diseñado para que puedan desarrollar curvas en planta, de un radio mínimo de 400 m.

La TBM colocará las dovelas prefabricadas para conformar cada uno de los anillos de 1,70 m de longitud, correspondientes a los módulos de avance y, a continuación, rellenará el “espacio anular” (o “gap”) entre anillo y terreno para su fijación definitiva, dejando el módulo de túnel sostenido, revestido e impermeabilizado.

3.1.2 Fabricación de dovelas

El conjunto de las obras necesarias para la construcción de los túneles, del proyecto Majes Sigvas II, incluye la fabricación de anillos de dovelas para realizar el sostenimiento/revestimiento del túnel Pucará Transandino en la fase I. La fabricación de dichos anillos de dovelas está a cargo de un subcontratista.

El diámetro interior del túnel mide 5,00 metros. El revestimiento está formado por un anillo de seis dovelas (4+2), prefabricadas de 23,50 cm de espesor y 1,70 metros de longitud media. El diámetro exterior del anillo es por tanto de 5,47 metros. El diámetro de excavación es de 5.82 m.

En resumen, los diámetros son los siguientes:

- Diámetro de corte : 5.82 m.
- Diámetro exterior del anillo : 5.47 m
- Diámetro interior del anillo : 5.00 m.

Las dovelas empleadas son de tipo universal, de modo que, girando la posición del anillo, puede adaptarse a rectas y curvas sin cambiar el diseño. En total se disponen seis dovelas: una dovela llave en forma de cuña para cierre del anillo (tipo K); dos dovelas trapezoidales de contrallave, que se colocan junto a la de clave (tipos D y E); y tres dovelas rectangulares A (contrallave), B y C. En la siguiente figura se representa la definición geométrica del anillo propuesto:

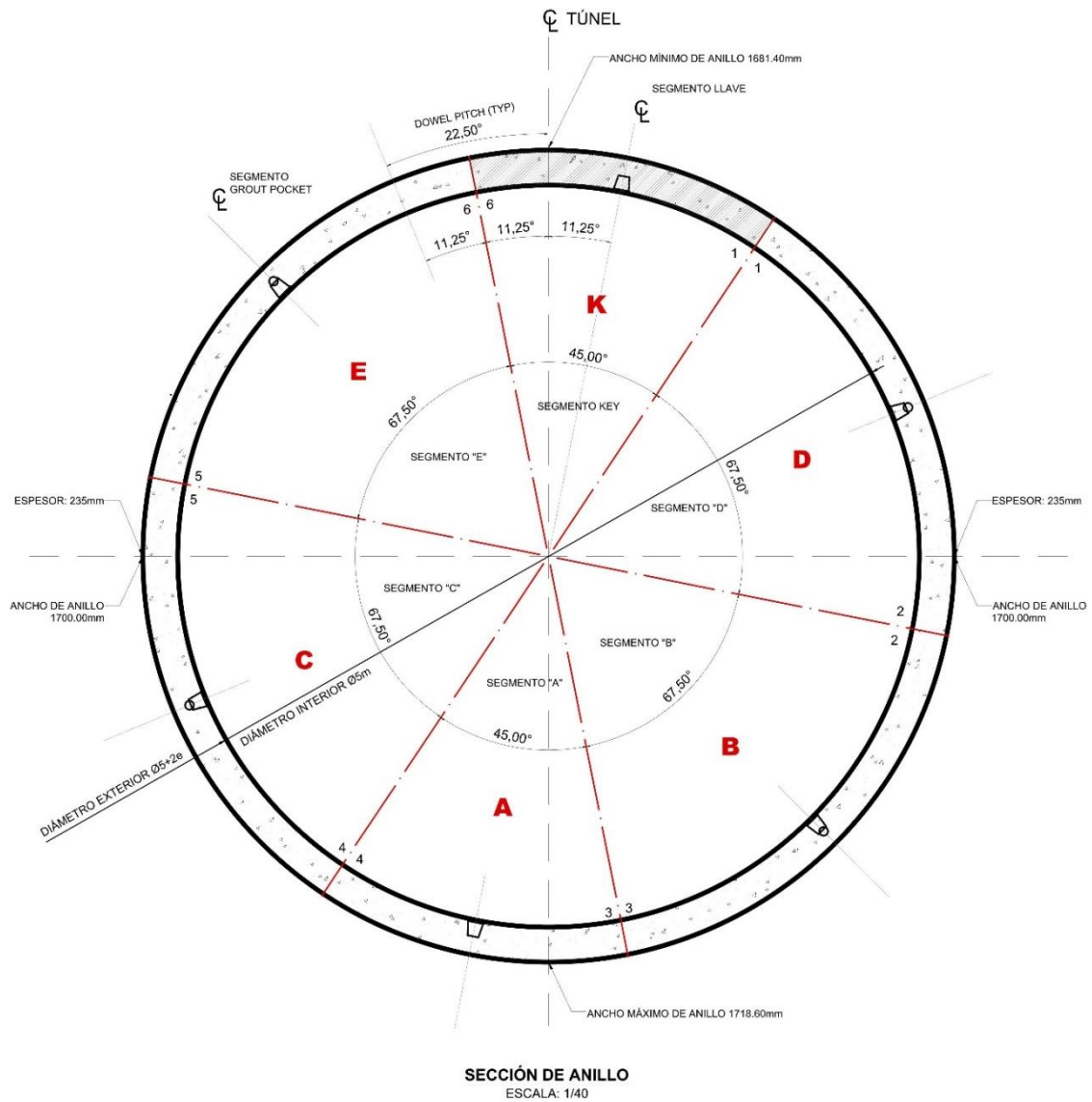


Figura N° 10: Conformación de un anillo de dovelas.
Fuente: Propia.

la dosificación del concreto por m3 para las dovelas es:

Insumo	Cantidad
Cemento tipo IP	460 kg
Agregado fino	820 kg
Agregado grueso	998 kg
Agua	175 L
Fibra metálica	40 kg
Neoplast	2.51 L

Tabla N° 3: Dosificación de insumos para elaboración de hormigón dovelas.
Fuente: Elaboración propia.

Las dovelas a los 28 días tienen que alcanzar una resistencia de 40 MPa, pero se tienen que desmoldar a las 5 horas con una resistencia de 20 MPa, esto por tema de producción, la fábrica tiene un rendimiento mínimo de 720 anillos mes, se trabaja las 24 horas del día, todo esto se debe a que se tiene que ir al mismo ritmo de excavación de la tuneladora, si la tuneladora se queda desabastecida, toda la producción para, ya que no se puede excavar sin dejar de hacer el revestimiento de dovelas.

A continuación, se explica el proceso de fabricación, preacopio, acopio de las dovelas y traslado a la plataforma Chalhuanca.

A.- Limpieza del molde: Con aire a presión, eliminando con espátula, si es necesario, los restos de hormigón.



Figura N° 11: Limpieza de molde de dovela.
Fuente: Propia.

B.- Aplicación del desencofrante y cierre del molde: Se aplicará desencofrante en toda la superficie del molde, comprobando que queda totalmente extendido por toda la superficie del molde, así como si están colocados y engrasados todos los tetones y bulones.



Figura N° 12: Aplicación de desencofrante en molde.
Fuente: Propia.

C.- Colocación y vibrado del hormigón: Se colocará el hormigón con aperturas y cierres intermitentes de las valvas, asegurando el llenado completo del molde.



Figura N° 13: Colocación de hormigón.
Fuente: Propia.

D.- Fratasado y alisado de la superficie: Se alisará el trasdós de la dovela mediante llanas, reglas, fratás o cualquier otro elemento adecuado para tal operación, dejando la superficie uniforme, sin irregularidades.



Figura N° 14: Fratasado de superficie.
Fuente: Propia.

E.- Curado: Se realizará mediante la cubrición de las piezas con las lonas térmicas y la aplicación de un vapor que está a una temperatura de unos 60 grados y que es producido por una caldera.



Figura N° 15: Curado del hormigón.
Fuente: Propia.

F.- Desencofrado y volteo: El desencofrado se efectuará mediante la ventosa, dejando el molde en el puesto de limpieza, listo para el comienzo de un nuevo ciclo.



Figura N° 16: Volteo de dovela.
Fuente: Propia.

G.- Colocación de la junta: Se procederá a la aplicación de cola y colocación de la junta de forma manual. Se identifica la dovela mediante el marcado con N° de anillo de fabricación.



Figura N° 17: Colocación y pegado de junta.
Fuente: Propia.

H.- Acopio de dovelas: Se procederá acopiar las dovelas en el orden, lugar y forma coordinada.



Figura N° 18: Acopio de dovelas en fabrica.
Fuente: Propia.

I.- Transporte de dovelas a plataforma Chalhuanca: Una vez que las dovelas tengan la edad y resistencia adecuada serán transportadas al proyecto.



Figura N° 19: Transporte de dovelas al proyecto.
Fuente: Propia.

J.- Acopio en plataforma Chalhuanca: Este será el último acopio de las dovelas antes de ingresar al túnel para ser montadas.



Figura N° 20: Acopio de dovelas en proyecto.
Fuente: Propia.

3.1.3 Plataforma Chalhuanca o playa de vías

La plataforma Chalhuanca o playa de vías, es donde va instalada las instalaciones auxiliares necesarias para el normal funcionamiento del proceso de excavación.

En la figura N° 21 se aprecian las instalaciones de CHALHUANCA, correspondiéndose cada número a la instalación siguiente:

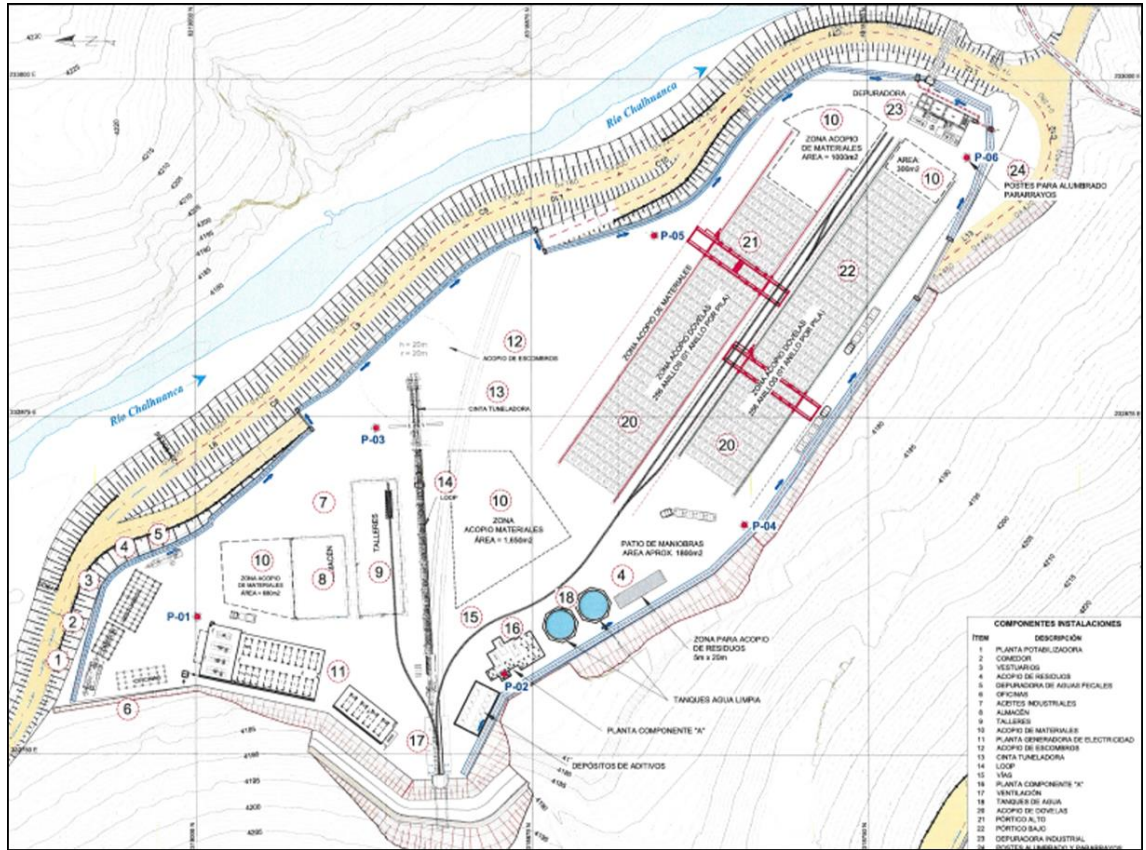


Figura N° 21: Distribución de plataforma Chalhuanca.

Fuente: Propia.

1. Planta potabilizadora
2. Comedor
3. Vestuarios
4. Acopio de residuos
5. Depuradora de aguas fecales
6. Oficinas
7. Aceites industriales
8. Almacén
9. Talleres
10. Acopio de materiales
11. Planta generadora de electricidad
12. Acopio de escombros
13. Cinta de la tuneladora

14. Loop
15. Vías
16. Planta componente A
17. Ventilación
18. Tanques de agua
19. (No incluido en el plano)
20. Pórtico alto
21. Pórtico bajo
22. Depuradora industrial
23. Postes de alumbrado y pararrayos

En la zona más próxima al emboquille se encuentra la estructura de empuje de la tuneladora, así como las instalaciones de ventilación del túnel. Seguidamente se encuentran las instalaciones de cinta, que acabarán en el cono de tierras desde donde se procede al transporte del material excavado a vertedero.

A la izquierda de las vías se encuentra las instalaciones de acopio de las dovelas, que estará equipada con dos grúas pórtico, situadas una a continuación de la otra, con las que se organizará el acopio y se cargarán los trenes, y a continuación de esta zona de acopio de dovelas se encuentra la planta depuradora. En esta zona también se encuentra la planta de componente A y los depósitos de agua.

A la derecha de las vías se encuentra la planta de generación eléctrica, los talleres para el mantenimiento y reparación de los trenes, el almacén, depósito de aceites industriales y una zona de acopios.

Al final del acopio de anillos se acopiarán otros materiales necesarios según el avance de la tuneladora, como son carriles, bandas de cinta, cables y tuberías. También en esta zona se situarán las instalaciones de vestuarios, aseos y comedor y otras instalaciones auxiliares.

Para el caso del proyecto Majes Siguan II túnel Pucara Trasandino, se hizo la plataforma desde cero, hubo bastante movimiento de tierras y muchos m³ de concreto armado utilizado para la cimentación de todas las instalaciones auxiliares que a continuación nombraremos:

- Cimentación y losa de la nave almacén.
- Cimentación, losa, vía y foso de la nave taller.
- Cimentación para vestuarios, oficinas y comedor.
- Cimentación planta potabilizadora.
- Cimentación depuradora de aguas residuales doméstica.
- Banco de ductos eléctricos.
- Obras civiles para redes de agua y electricidad.
- Cimentación para cuna TBM
- Cimentación y muros planta depuradora industrial. Ejecutado.
- Cimentación depósitos de agua.
- Cimentación planta general eléctrica y cerramiento.
- Cimentación planta bi componente.
- Cimentación grúas portico.
- Cimentación vías tren.
- Captación de agua.
- Cimentación cinta túnel.
- Cimentación ventilador Chalhuanca.

Del mismo modo se hizo el montaje de todas las instalaciones auxiliares que se detalla a continuación:

- Montaje de grúa pórtico.
- Vestuarios.
- Oficinas.
- Comedor.
- Nave almacén.
- Nave taller.
- Planta potabilizadora de aguas domésticas.
- Planta depuradora de aguas residuales domésticas.
- Planta depuradora de aguas industriales.
- Pórtico sobre neumáticos 100TM.
- Locomotoras.
- Trenes (el tren lo forman vagón de personal, cuatro vagones portan dovelas y dos vagones de carga general).
- Planta de componente A.
- Captación y depósitos de agua.

- Pórticos sobre vías.
- Planta de energía.
- Cinta túnel.



Figura N° 22: Antes del movimiento de tierras y montaje de instalaciones en plataforma Chalhuanka.
Fuente: Propia.



Figura N° 23: Vista actual de plataforma Chalhuanka.
Fuente: Propia.

Los principales materiales o productos que sirven al interior son los siguientes:

- Anillos de dovelas.
- Grasas y lubricantes.

- Tuberías para prolongación de las distintas instalaciones.
- Carriles para prolongación vías.
- Componente B del mortero bicomponente.
- Estructura cinta para su prolongación.
- Casette de ventilación.
- Herramientas rueda de corte, cortadores, rastrillos etc.
- Soportes de tuberías, ventilación etc.
- Bobinas de cables para su prolongación.

3.1.4 Obras subterráneas previas

Se ejecutaron obras subterráneas, tales como los pre-túneles, que tendrán una longitud de 15 metros, en los portales de entrada y salida de los túneles Transandino y Pucará.

Estas obras son previas a la excavación con la TBM de los túneles. El diámetro de excavación es de 6.25 m, la sección es en herradura y a nivel de sostenimiento se emplearán:

- Marcos reticulares W4x13
- Perno helicoidal ASTM Gr60
- Shotcrete SH-25

A la entrada de la excavación se ejecutará un paraguas pesado de micropilotes formado por 15 tubos de acero N-80 y longitud de 12 m.

A continuación, se hará una visera de protección compuesta por:

- Marcos reticulares W4x13
- Chapa Bernold
- Shotcrete SH-25

Todos estos trabajos para la protección ante la posibilidad de caídas de objetos de las zonas superiores.



Figura N° 24: Obras preliminares del túnel.
Fuente: Propia.

3.1.5 Procedimiento constructivo túnel Pucara Trasandino

En el caso del tema de investigación, el proceso de trabajo de las tuneladoras independientemente del tipo o modelo a utilizar en cada proyecto, se puede comparar con el trabajo en una fábrica, ya que se puede decir que su funcionamiento está basado en una cadena de montaje, en la cual se realizan una serie de trabajos o ciclos de proceso que llevan una determinada secuencia.

Esta secuencia o cadena de montaje, no evita que muchos de los trabajos que se deben de realizar, se puedan llevar a cabo de una forma simultánea: como ejemplo más llamativo podemos citar el avance o perforación y la inyección del mortero bicomponente que se realizan de forma simultánea, sin embargo, la mayoría de los trabajos a realizar dependen de otra labor realizada con anterioridad.

Un detalle a tener muy en cuenta, en el proceso normal de trabajo de las tuneladoras es que todas estas fases que se tienen que realizar, tienen una importancia vital, debido a que cualquier proceso condiciona de algún modo otro, con lo cual si se rompe la cadena de trabajo en algún punto esto repercutirá rápidamente a la tuneladora con la consiguiente disminución del proceso productivo.

Se pueden destacar a grandes rasgos tres ciclos o procesos en las tuneladoras, que a su vez se componen de una serie de trabajos que se deben realizar. Estos ciclos, de aquí en adelante se denominarán de la siguiente manera:

- A. Ciclo Exterior.
- B. Ciclo de abastecimiento Transporte
- C. Ciclo Interior

3.1.5.1 Ciclo exterior

Este primer ciclo o proceso se denomina así dado que todas las tareas que lo componen se realizan en el exterior del túnel y más en concreto en la playa de vías de la tuneladora.

En esta etapa se realizan una serie de trabajos que son:

- Elaboración del componente A del bi-componente de inyección, para su posterior bombeo hasta el depósito de la TBM mediante tubería.
- Acopio y carga de anillos de dovelas en los correspondientes vagones de dovelas para transporte en el tren.
- Carga de materiales auxiliares de la tuneladora en el tren, como pueden ser los diferentes tipos de grasas, aceites o espumas, así como de otros muchos materiales que emplea la T.B.M. para su avance normal, como tuberías de agua, soportes de ventilación, vías, cables eléctricos, elementos prolongación cinta del túnel.

Todos estos trabajos realizados en el exterior en la playa de vías, estarán supervisados directamente por el encargado de exterior y serán realizados por un equipo específico.

La carga de los trenes se realizará mediante grúas pórtico adaptados a las cargas a manipular y a las características propias de la playa de vías.

Para una perfecta carga de los trenes, se debe fijar con anterioridad la posición donde este se debe detener, para así poder realizar todas las cargas sin que este tenga que realizar ningún tipo de movimiento, primeramente, por seguridad en las cargas, así como para reducir el tiempo de esta.

3.1.5.2 Ciclo abastecimiento y transporte

Los abastecimientos al túnel se realizan de dos formas o maneras distintas:

- Mediante instalaciones más o menos fijas que se van prolongando según se va avanzando.
- Mediante los trenes de aprovisionamiento.

3.1.5.2.1 Mediante instalaciones

En este caso la TBM se alimenta desde el exterior con las siguientes instalaciones que van fijadas sobre la estructura de hormigón del túnel, mediante soportes:

- Cable de alimentación eléctrica de alta tensión en este caso 20.000 voltios.
- Cable de fibra óptica, iluminación, tierras, comunicaciones etc.
- Tubería de agua entrada de refrigeración TBM.
- Tubería de agua retorno de refrigeración TBM
- Tubería de bombeo mortero bicomponente componente A.
- Tubería de ventilación túnel.
- Banda de extracción del desescombro.

3.1.5.2.2 Mediante trenes de aprovisionamiento

La otra forma de abastecer la tuneladora es mediante los trenes de aprovisionamiento. Estos sirven todos los materiales ó productos necesarios, así como el transporte del personal para el avance normal de la TBM, desde el exterior ó la playa de vías hasta el interior de la tuneladora.

Los principales materiales o productos que se sirven al interior del túnel, mediante los trenes de aprovisionamiento, son los siguientes:

- Anillos de dovelas.
- Grasas y lubricantes.
- Tuberías para prolongación de las distintas instalaciones.
- Carriles para prolongación de vías.
- Componente B del bi-componente.
- Estructura cinta para su prolongación.
- Casette de ventilación.
- Herramientas rueda de corte, cortadores, rastrillos etc.
- Soportes de tuberías, ventilación etc.
- Bobinas de cables para su prolongación.

Los trenes de aprovisionamiento tienen la siguiente configuración:

- Locomotora Diesel
- 1 vagón de personal.
- 1 vagón para transporte de materiales.
- 4 vagones para el transporte de dos anillos.
- 1 vagón de carga de rieles

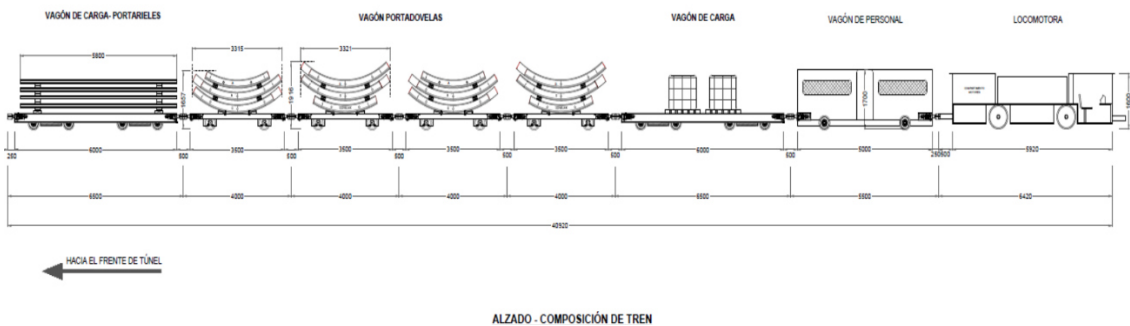


Figura N° 25: Conformación de un tren de aprovisionamiento túnel.
Fuente: Propia.

En este proyecto los trenes carecen de vagones para transporte de mortero, debido a que los tanques son fijos en la tuneladora y el componente A del bicomponente es bombeado mediante tubería desde el exterior hasta la tuneladora, con lo cual no se necesitan este tipo de vagones.

El personal accede al interior de la TBM en los vagones de personal diseñados a tal efecto, quedando terminantemente prohibido viajar en cualquier otro lugar del tren.

La circulación de trenes se planifica y organiza en función del avance de excavación de la tuneladora, por lo tanto, depende del ritmo de producción, por lo que quien deberá organizar estos ciclos de funcionamiento y circulación, es el Ingeniero responsable de Producción o quien sea designado por él. El protocolo de comunicación se ejecuta de la siguiente forma:

El Ingeniero de Producción o el Ingeniero jefe de turno de la TBM, y el responsable de la playa de vías coordinará con el maquinista, y con el equipo de mantenimiento del túnel, para organizar los ingresos y salidas de los trenes y así hacer que los ciclos de funcionamiento y circulación de los trenes se haga más efectivo y seguro.

La comunicación se establece entre la Tuneladora, la locomotora y el responsable de la Playa de Vías mediante telefonía IP, emisoras y walkies.

- El responsable de la Playa de Vías indica al conductor de la locomotora que operación debe realizar para entrar y los trabajos que se están realizando en el túnel. Una vez informado el conductor de la situación comienza el transporte de material a través del túnel.
- Por otro lado, el conductor está en contacto mediante las emisoras/walkies, con el interior del túnel para hacer saber de su ubicación.
- En todos los trabajos que se realicen a lo largo del túnel, el capataz posee un walkie con el que se puede comunicar con los conductores de las locomotoras.
- Todo personal que entre a los túneles, deberá entregar antes de subirse a la maniobra el carnet de autorización de trabajo, en el

puesto de control de acceso situado en playa de vías. Estará prohibido el acceso sin carnet de autorización.

Las normas para la circulación de trenes son:

- Todas las maniobras (locomotoras + vagones de personal + mesillas) deberán ir provistas de cámaras que permitan al conductor de la locomotora ver, en condiciones aceptables, la vía, tanto en dirección de entrada a los túneles, como en dirección de salida. Estará prohibido movilizarlas si no se asegura el correcto funcionamiento de dicho sistema.
- Los maquinistas dispondrán de carnet de locomotoras expedido por la autoridad minera competente.
- Antes de utilizar cualquier maniobra siempre se comprobará el estado del sistema de frenado, estando totalmente prohibido movilizarlas si no se asegura el correcto funcionamiento de dicho sistema.
- Todo el personal que realice trabajos de mantenimiento, topografía, en el túnel, deberá comprobar que no existe ningún elemento o herramienta derivado de su trabajo, en la vía.
- No cruzar nunca entre vagones de trenes estacionados.
- Las locomotoras, vagones, pantallas de protección que se encuentren estacionados en el túnel, deberán ir provistos de balizas intermitentes de señalización.
- Disponer de topes adecuados en los finales de recorrido, tanto en el exterior como en la tuneladora.
- El transporte de personal a su puesto de trabajo, solo podrá realizarse mediante el vagón de personal, el cual irá en la composición del tren después de la tuneladora.

- Respetar en todo momento los límites de velocidad establecidos.
- No subirse ni desplazarse sobre las máquinas en movimiento.
- Deberá existir en la TBM, siempre una composición formada como mínimo con una locomotora y dos vagones de pasajeros, con el objeto de cumplir con lo establecido en el plan de Autoprotección y Emergencia, en referencia a la evacuación de emergencia.
- La comunicación es por teléfonos tipo IP y emisoras (walkies) con selector PTT.
- La autorización de salida de los trenes desde playa de vías hacia la TBM se da con la confirmación de vía libre por parte del operario responsable.

Sobre la capacidad de tracción y frenado de la locomotora diésel en la ejecución con TBM de los Túneles Transandino y Pucará será necesario disponer de varias composiciones formadas por locomotoras y una serie de plataformas con las que se transportarán tanto materiales como personal desde el exterior a la tuneladora y viceversa.

En función de las características de la locomotora a usar, se puede precisar que una locomotora Schöma que se quiere usar en la ejecución de los túneles, es suficiente para desplazar por el túnel a una velocidad máxima de 20 km/h (más que suficiente para el trabajo a realizar) las composiciones de producción previstas para la realización de los trabajos de abastecimiento de materiales y personal a la tuneladora durante la ejecución de los túneles Transandino y Pucará.

También queda demostrado, que el sistema de frenado que incorporan tanto la locomotora como las plataformas que forman la composición, es suficiente para detener el convoy en las condiciones más desfavorables en una distancia interior a los 40m.

3.1.5.3 Ciclo interior

Este ciclo se realiza dentro del túnel y más propiamente en la tuneladora. Esta etapa a su vez la componen una serie de trabajos que se podría resumir en los siguientes:

- Descarga de materiales del tren.
- Perforación o avance.
- Inyección de mortero bi-componente.
- Montaje de anillo de dovelas.
- Montaje de servicios auxiliares.

Para la realización de todos los trabajos en el interior de la T.B.M se precisará un número determinado de personal que va normalmente en función de las características de la tuneladora, pero a modo general se puede establecer que está compuesto por el siguiente equipo mínimo:

- Encargado de turno.
- Capataz.
- Piloto u operador de la T.B.M.
- Erectorista o montador de anillo de dovelas.
- Ayudantes montaje de anillo de dovelas
- Operador grúa de dovelas.
- Operador de inyección de mortero
- Ayudante inyección de mortero
- Montadores de servicios auxiliares.
- Mecánico
- Electricista
- Soldador
- Topógrafo

Todo este equipo de personas, así como de todas las demás que realizan su función fuera de la tuneladora estarán supervisadas por un ingeniero de turno.

A continuación, se describen los trabajos a realizar en el ciclo interior de la TBM:

3.1.5.3.1 Descarga de trenes en la tuneladora

La descarga comienza con el emplazamiento del tren en la posición de descarga establecida con anterioridad. Esta maniobra será realizada y controlada por el capataz de interior y para realizar dicha maniobra de emplazamiento del tren tanto el capataz como el maquinista del tren deben de ir provisto en todo momento de unas emisoras portátiles que faciliten la comunicación entre ellos para realizar la maniobra, así como disponer de las cámaras de videos que llevan los trenes.

Después de este emplazamiento se procederá a la descarga de todos los materiales que transporta el tren, que son los siguientes:

- Descarga de los anillos de dovelas del tren: los anillos son separados de las plataformas del tren mediante unos apiladores hidráulicos que los levantan quedando así las mesillas de dovelas liberadas, a continuación, mediante una grúa de dovelas, se traslada cada una de las piezas que conforman el anillo a una mesa de alimentación siguiendo una secuencia definida: de esta manera el erector puede coger las dovelas de la mesa de alimentación para su montaje.
- Descarga del componente B para su posterior inyección durante el periodo de excavación.
- Descarga de materiales auxiliares, como pueden ser espumas, grasas, tuberías, soportes de tuberías y ventilación y un largo etc. de materiales que la tuneladora necesita para su avance diario

3.1.5.3.2 Avance o perforación

Una vez realizada todas las descargas y abastecimientos de la tuneladora, por lo general la TBM se encuentra en situación de poder realizar a continuación el avance o perforación.

El tiempo empleado para la perforación estará condicionado por el tipo de terreno a excavar, así como de sus características geofísicas, por lo

tanto, el tiempo de avance se puede mover en un intervalo bastante amplio si las características del terreno varían a lo largo del trazado.

La perforación o avance es realizada por el operador de la tuneladora, teniendo en ese momento el control prácticamente de toda la tuneladora, exceptuando la inyección de mortero bicomponente y otros trabajos secundarios como pueden ser montaje de vías, tuberías, ventilación, montaje de cintas etc.

Para realizar la perforación y controlar todos los parámetros de la T.B.M, el piloto dispone de una serie de ordenadores que le facilitan su trabajo. Por un lado, tendrá un PC conectado a un autómata que le dará en tiempo real todos los datos de la maquina como pueden ser velocidad, revoluciones, penetración, temperaturas de aceites, y un largo etc. También tendrá a su disposición un ordenador de topografía conectado a un teodolito láser que indica al piloto la situación de la maquina en cada momento, indicándole las posibles desviaciones del eje teórico del túnel, para poder realizar así las oportunas correcciones.

El piloto comienza la perforación siguiendo una secuencia de arranque preestablecida en cadena, de todos los equipos necesarios o instalaciones para realizar el avance, esta secuencia puede variar un poco en función de cada fabricante de las diferentes marcas de tuneladoras existentes, pero por lo general la puesta en marcha no suele variar mucho de la siguiente secuencia de arranque:

- Arranque del circuito de refrigeración.
- Arranque del Circuito de filtración.
- Arranque de compresores
- Circuito de servicios auxiliares.
- Arranque de motores accionamiento.
- Ventilación interior.
- Arranque de las cintas de extracción de material.
- Arranque de la bomba de avance.
- Circuitos de grasas.
- Circuitos de inyección de agua y espuma.

A grandes rasgos esta es la secuencia de arranque de una tuneladora. Una vez realizados todos estos pasos y después de colocar el ordenador de topografía en modo avance el piloto procederá a realizar la excavación.

De forma similar a las de su tipo, en esta TBM simple escudo, elegida para el proyecto, la fuerza del empuje para el avance la realizan 32 gatos hidráulicos dispuestos en todo el perímetro del escudo principal, que apoyan contra el anillo de dovelas situado en el escudo de cola. Esta disposición proporciona el empuje o fuerza de propulsión durante la perforación, así como el control del direccionamiento de la máquina, el empuje máximo es de 60.801 KNm a 420 bares de presión, en la figura N° 3 se mostró los componentes de una TBM simple escudo.

Terminado el avance, y mientras se hace el montaje del anillo, se procederá a realizar el control de desgaste de los cortadores. La primera vez se limitará a una inspección ocular y en la inspección siguiente se realizará un control del estado general y del desgaste de todos los cortadores, empleando para ello las galgas facilitadas por el fabricante. Este trabajo precisa un cierto tiempo de parada de la TBM, pero permite conocer el desgaste medio aproximado por cada módulo de avance.

Terminada la perforación de avance, el piloto rellenará una hoja con los datos de control relativos a las incidencias ocurridas, reflejando, además los valores alcanzados por los parámetros más importantes de la TBM, datos que servirán de base para rellenar el parte diario de producción.

También existe una hoja de control de cortadores que se rellenara cada vez que se realice una medición de los cortadores.

3.1.5.3.3 Inyección bicomponente

El relleno del espacio anular (o "gap") existente entre el anillo de concreto y el terreno, que se hacía con los morteros de arena y cemento, se hará en esta TBM con el nuevo material denominado bicomponente que no es un mortero sino un gel, resultado de la mezcla de dos componentes: el Componente A, una lechada densa (un "grout") de cemento, bentonita y

agua, y el Componente B, una solución en agua de un silicato acelerador de fraguado.

Este nuevo material para rellenar el “gap” se aplica por inyección de la mezcla de ambos componentes a través de varias toberas o salidas (en este caso 5 toberas) repartidas en el perímetro del escudo de cola. En cada tobera hay un detector de presión para que el sistema pueda controlar que la inyección se realiza de forma homogénea en todo el anillo. Para un adecuado control del relleno, la persona que maneja el Sistema, que denominamos Operador de inyección, debe tener en cuenta, tanto dicha presión como el volumen teórico a inyectar. Los efectos buscados son:

- Una perfecta impermeabilización del túnel
- Consolidar el anillo de dovelas con el terreno
- Evitar que se produzcan asentamientos en superficie

Como se ha dicho, el bicomponente a utilizar en el relleno del GAP está formado por dos elementos, que en lo sucesivo denominaremos componente A y componente B.

El componente A consiste en una mezcla homogénea y fluida, compuesta por cemento, bentonita, agua y un aditivo dispersante-estabilizador del fraguado.

El componente B es un reactivo acelerador de fraguado a base de silicato, disuelto en agua.

La inyección conjunta de ambos componentes, forma una masa cohesiva y tixotrópica que sufre un proceso de gelificación.

En base a los estudios previos realizados, se ha diseñado una dosificación tipo del mortero bicomponente, que servirá como base para el inicio de los trabajos,

La dosificación es:

Insumo	Cantidad
Componente A	
Cemento Tipo IP	350 kg/m ³
Bentonita	39 kg/m ³
Retardante	4.1 kg/m ³
Agua	820 kg/m ³
Componente B	
Silicato Sódico	5 - 6 % de Comp A.

Tabla N° 4: Dosificación de insumos para elaboración de mortero bicomponente.

Fuente: Elaboración propia.

El componente A es elaborado en el exterior del túnel en una planta diseñada especialmente para este tipo de producto, posteriormente es bombeado al interior de la tuneladora mediante una tubería, que se ira prolongando a medida que la tuneladora avanza. Por otro lado, el componente A es almacenado en la tuneladora en un tanque de mortero de 10 metros cúbicos, al que están conectados las 6 bombas de componente A situadas justamente debajo. Las características y funcionamiento de los equipos A son los siguientes:

- Las bombas de componente A tienen una potencia eléctrica de 7,5 KW.
- El caudal máximo de inyección es de 41.4 m³/hora.

Cada bomba alimenta una tobera por línea independiente, en la que se intercala un caudalímetro para controlar el volumen de componente A que se inyecta por cada una de las líneas.

El sistema de inyección del componente B es muy similar al del componente A. En este caso solo existe dos depósitos de componente B en la tuneladora de 1 m³, con un almacenaje total de 2 m³, que están conectados con las bombas de componente B. El componente B llega a la tuneladora mediante los trenes de suministro.

- Las bombas de componente B tienen una potencia eléctrica de 1,5 KW y son seis unidades.

- El caudal máximo de inyección es de 6.12 m3/h.

Estas bombas de componente B al igual que las del A bombean, por una línea independiente hasta el escudo de cola, pasando a su vez por otra serie de caudalímetros como en el componente A, para tener también el volumen de inyección por cada una de las líneas.

La inyección del bicomponente se realiza a través de las toberas situadas en el escudo de cola, en este caso a través de cinco puntos denominados L1- - L5. Cada tobera tiene dos entradas, una para el componente A y otra para el componente B, cuyo posicionamiento queda definido en el plano adjunto (señaladas en color azul).

Tailskin / Cola del escudo

5x 2 grout lines DN50
1 for operation / 1 reserve
with connected component B lines
11 grease injection lines 2"

For more details:
Drawing 4898-A-001-01 D
Diagram 4898-A-503-002-10
Diagram 4898-A-502-002-00

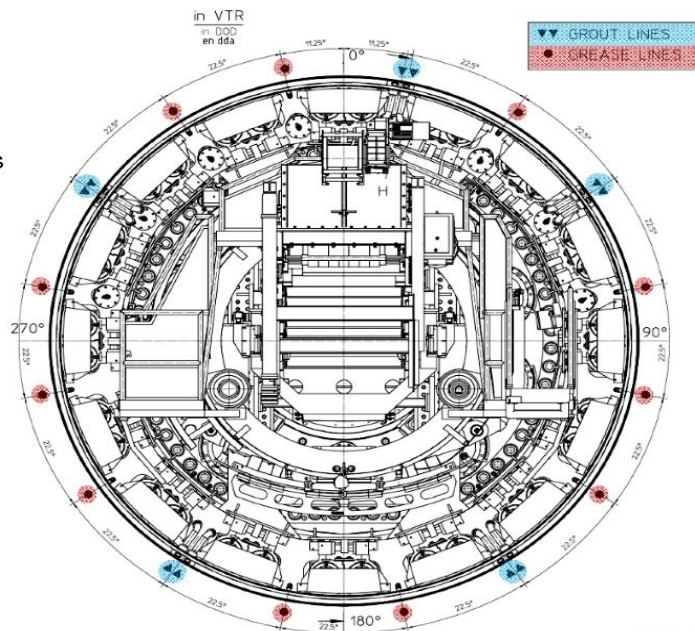


Figura N° 26: Líneas de inyección en el escudo de cola.

Fuente: Propia.

Dichas salidas o toberas corresponden a las 5 líneas de operación, cada una de las cuales tienen una línea de reserva, además de la línea 6 con la que se puede inyectar bicomponente en otros anillos distintos del recién colocado.

En el plano anterior pueden verse también, las 11 salidas o toberas (color rojo) de las líneas de inyección a presión del mástic o “grasa” de la junta de sellado de cola.

El volumen teórico de relleno del GAP para un anillo de 1,7 m. es de 5.27 metros cúbicos, en consecuencia, se puede considerar que con ese volumen inyectado el GAP del anillo quedaría completamente relleno. Debido al hecho de que la excavación no es perfecta, se tiene que establecer un sistema que asegure el control de llenado, aparte de los controles volumétricos que serán los principales.

El control de llenado del GAP (Gteo) se establece de la siguiente manera:

- Para la inyección de componente "A" y "B", en la TBM hay instaladas tantas bombas por componente y línea de inyección, es decir 5 para el relleno del anillo en el escudo de cola y 1 para la inyección de relleno por la línea 6 en puntos del interior del túnel, en caso de necesidad.
- El volumen total de la inyección será igual a la suma de todos los caudalímetros de cada línea de inyección, teniendo en cuenta que estos volúmenes serán distintos debido a la situación de cada una de las líneas: las situadas en la parte inferior enseguida se llenan y su volumen es menor que las situadas a más altura, el corte de inyección será por presión en todas las líneas y no por volumen, porque si no se corre el riesgo que la inyección se vaya hacia la rueda de corte.
- En los casos en los que el control de pesada del material excavado se encuentre entre el 0,9 y el 1,1 del peso teórico estimado, se considerará la inyección concluida cuando el volumen inyectado en el anillo supere el 0,8 del valor teórico ($0,8 * G_{teo}$).
- En aquellos casos en los que el volumen de inyección se sitúe por debajo del $0,8 * G_{teo}$, se procederá a una reinyección del anillo.
- En el caso de que el volumen excavado supere el 1,1 del peso teórico, será preciso evaluar un nuevo valor de referencia del Gteo en función del estudio de la posible fracturación de la zona

atravesada. El criterio de inyección será el mismo del caso anterior pero relacionado con el nuevo valor de G_{teo}^* .

- Se establecerá un control, por turno, del material inyectado (G total turno). Este valor se comparará con el volumen teórico que se debería haber inyectado (G total turno/ N número anillos turno = G_{real}) con el mismo criterio de aceptación indicado ($G_{real} \geq 0,8 * G_{teo}$). Todo el sistema de bombeo va controlado por un ordenador en el que se pueden cambiar los distintos parámetros de inyección.
- Adicionalmente se pueden obtener testigos del trasdós de la dovela a efectos de comprobación del relleno del GAP. Este método se realizará de forma sistemática durante los primeros metros de la excavación del túnel, esperando siempre a que transcurran más de 48 horas desde la inyección.

Para terminar lo relativo al control del relleno del “gap”, en la tabla siguiente se recogen dos datos de las pesadas para el material de la excavación de este proyecto (tobas – andesitas)

Longitud avance	Densidad material	Peso en toneladas		Teórico
		Mínimo 10%	Máximo 10%	
1.7	2.7 ton/m ³ (**)	109.88	134.30	122.09

(**) Peso específico de las tobas y Andesita.

Tabla N° 5: Cantidad de materiales en un avance de la TBM, peso en toneladas.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, el peso teórico de un avance está en 122.09 toneladas. Siempre y cuando este peso no varíe entre un $\pm 10\%$ como indica la tabla, no se tomará ninguna medida adicional (nivel de atención 1). Independientemente se deberá controlar la inyección del bicomponente.

Si el peso sobrepasa el 15% permitido ($1,15 * P$ teórico) pasaríamos a nivel de atención 2, que implica, si es posible, una revisión del frente de

excavación al concluir el avance en busca de posibles sobre excavaciones. En el caso de no existir ninguna sobre excavación se seguirá con el trabajo normal. Si aparecen sobre excavaciones, se prestará atención, según lo indicado en el párrafo anterior a la inyección de este anillo (anillo N), inyección que se realizará cuando se excave el anillo N + 8, ya que, dadas las dimensiones de la TBM y la longitud del anillo tipo, hay 6 anillos ya excavados anteriormente, entre el que se va a excavar (el N +8) y el que se va a inyectar (el anillo N) que es donde se produjo la sobre excavación por lo que se debe rellenar con el volumen de inyección necesario hasta el corte por presión en las 5 líneas.

En el caso de que la pesada sobrepase un 15 % se entraría en el nivel 3 de atención. La inyección se realizaría como en el caso anterior, pero se procedería a bajar las revoluciones de la rueda de corte y en caso de falla, a cerrar parte de las entradas de material de la rueda si se produce otra pesada semejante para evitar la entrada de demasía de material.

El cierre de la rueda para paso de falla será objeto de un procedimiento específico.

3.1.5.3.4 Montaje del anillo de dovelas

Una vez terminada la perforación, así como la inyección de mortero bicomponente se inicia al montaje del anillo de dovelas.

El túnel ejecutado por esta TBM escudo simple, va revestido mediante anillos de dovelas de concreto armado con fibras metálicas, que están contruidos de tal forma que permitan girar el revestimiento del túnel hacia arriba, abajo, derecha e izquierda o una combinación de estas direcciones. Para lograr esto el anillo está formado de varios segmentos llamados dovelas, una de ellas la de menor longitud en función de cómo este diseñado el anillo, llamada llave la cual, en función de su posición en el montaje del anillo, permitirá adoptar el revestimiento al trazado de proyecto del túnel.

Este tipo de anillo es conocido con el nombre de anillo universal y, en este caso, está formado por un total de 6 dovelas. Sobre la dovela/s inferior/es irá montada la vía principal, por la que circulan los trenes.

Los elementos o dovelas que forman el anillo del túnel TRANSANDINO y PUCARA, son:

- 2 dovelas de nominadas B Y C.
- 2 dovelas contra claves D Y E
- 1 dovela llave K
- 1 dovela contrallave A

Una vez elegida la posición de la dovela llave la secuencia de montaje será la siguiente A, B, C, D, E y K

El montaje del anillo será realizado por el erectorista u operador del erector de dovelas con la ayuda normalmente de dos operarios. Para el control y manejo de todo el sistema de montaje de anillos el erectorista llevara una consola con mando a distancia que le permita realizar dicho montaje con la mayor celeridad y seguridad posible.

Previamente al montaje del anillo el ordenador de topografía habrá seleccionado una posición de montaje donde ira situada la dovela llave.

Son varios los factores a tener en cuenta para una perfecta elección de la posición de la llave partiendo del principio de que el túnel a construir siempre debe seguir a la cola del escudo que es donde se realiza el montaje de anillos.

Estos factores a tener en cuenta son los siguientes:

- La extensión de los cilindros de avance o empuje.
- La separación en la cola del escudo con respecto al anillo.
- La extensión de los cilindros de articulación.

A continuación, se adjuntan las imágenes correspondientes a las 16 posibles posiciones de la dovela llave.

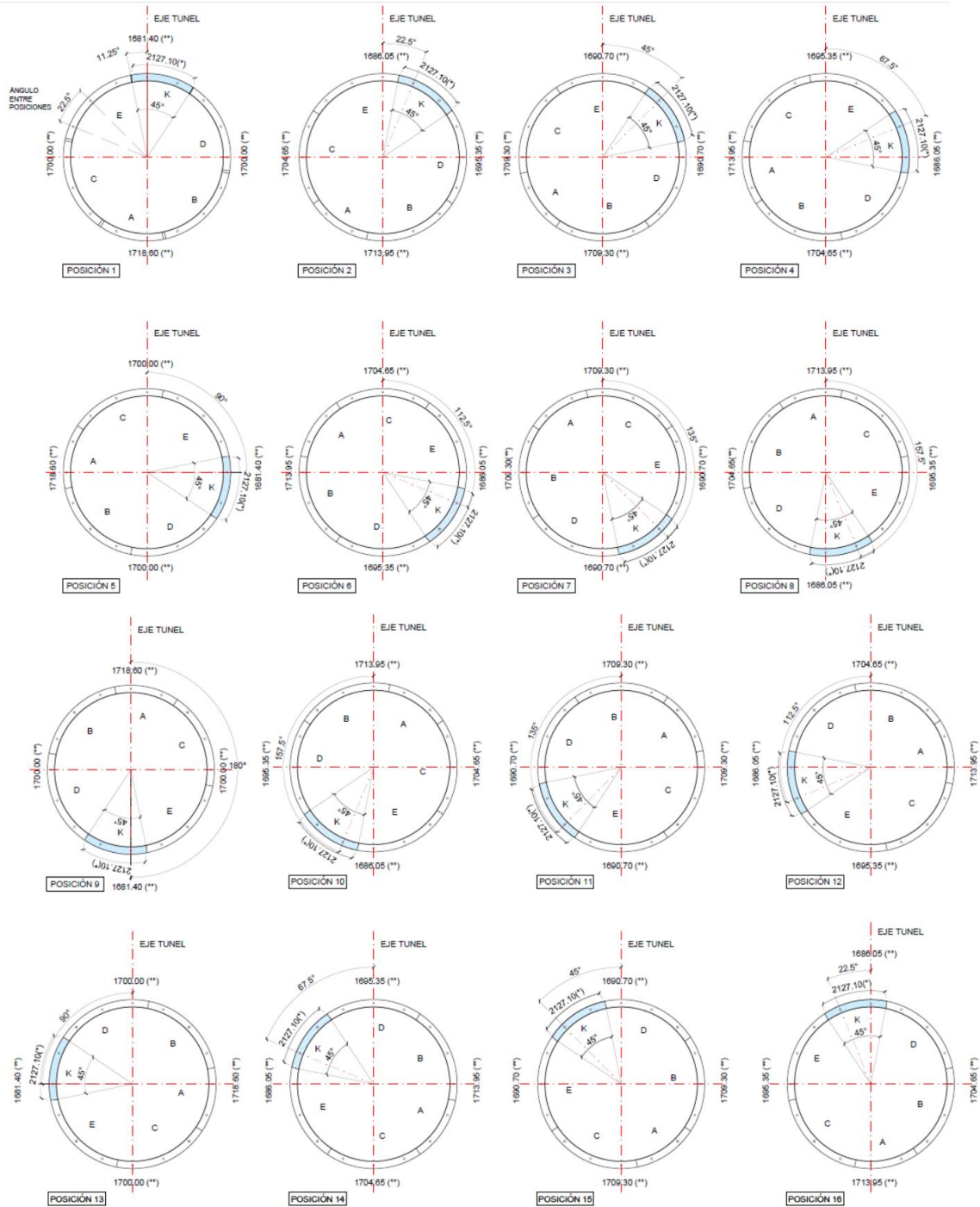


Figura N° 27: 16 posibles posiciones de la dovela llave.
Fuente: Propia.

Una perfecta elección de la llave evitará que el revestimiento pierda la trayectoria del trazado, así como la posible rotura de los cepillos de cola por falta de espacio, incluso de las propias dovelas, ya que se podrían producir interferencias con el escudo.

Los cilindros de avance se apoyan en el último anillo colocado para realizar el siguiente avance, estos se extenderán hasta realizarlo, pero no todos tendrán la misma extensión por lo que debemos recuperar esa diferencia para:

- Mantener el paralelismo entre el frente del anillo y el plano de escudo.
- Evitar exceder la extensión máxima de los cilindros de avance.

Esto sólo se logra colocando la dovela llave donde menos extendidos estén los cilindros de empuje, ya que nuestra dovela llave es la de menor longitud (1681.40 mm).

Los cilindros de articulación del escudo permiten el giro del mismo, por ello la parte más extendida provocará la mayor extensión del cilindro de empuje. Como se ha indicado el paralelismo necesario ha de ser entre el frente del anillo y el plano del escudo y no de la cola, por lo que la extensión de la articulación deberá restarse a la extensión del cilindro de empuje colindante. Estos resultados permiten calcular la posición de la llave.

En el siguiente gráfico se observa el paralelismo mencionado anteriormente:

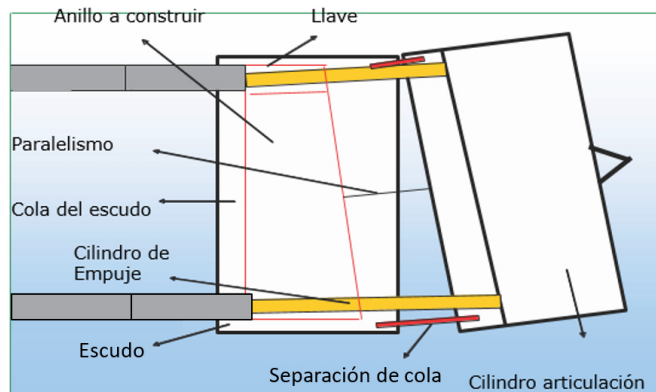


Figura N° 28: Factores a tener en cuenta para la colocación de la dovela llave parte 1.
Fuente: Propia.

Otro de los factores a tener en cuenta es la separación en cola que es el espacio existente entre la pared interna del escudo de cola y la pared

externa del anillo construido anteriormente, esta se mide en cuatro posiciones como se aprecia en la imagen 4.

Siempre que se construya un anillo hay que evitar que esta separación de cola se reduzca al punto que el anillo choque con la pared de la cola del escudo y esto solo se puede evitar seleccionando la llave en la posición que más separación tenga, pues hacia allí se dirigirá el próximo anillo a construir.

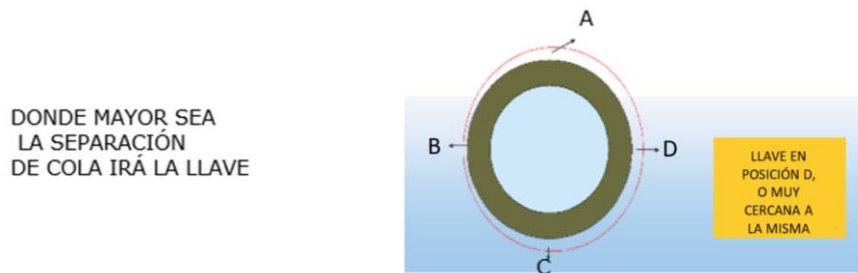


Figura N° 29: Factores a tener en cuenta para la colocación de la dovela llave parte 2.
Fuente: Propia.

A parte de los factores ya reseñados que determinan la posición de la llave, puede que en un momento prime más la extensión de los cilindros o la separación en cola, pero existen otros factores subjetivos importantes como son los siguientes:

- La pericia del piloto en prever el movimiento de la T.B.M sin hacer grandes cambios de dirección.
- La tendencia a seguir según el trazado ya que si mantenemos dicha tendencia no se tendrán que realizar recuperaciones y el paralelismo siempre se mantendrá

En definitiva, la posición de la dovela llave definirá el trazado del túnel.

Según todo lo antes mencionado el ciclo exterior, abastecimiento y transporte y ciclo interior se resume a que un avance de la tuneladora consiste en excavar la longitud de un anillo en este caso 1.70 m y a la vez ir eliminando todo el material excavado por la cinta transportadora, luego con el erector se procede a colocar las dovelas en toda la circunferencia del túnel con sus accesorios de sujeción correspondientes

conformando así todo el anillo de sostenimiento, se procede a inyectar el mortero bicomponente trasdos dovela, y paralelamente se coloca todo lo necesario para el siguiente avance como: cable alimentador de TBM, cables de iluminación, luminarias, tuberías de agua y bicomponente, rieles para tren, rieles auxiliar de back-up, manga de ventilación, etc. En resumen, este es todo el proceso de construcción de un túnel con tuneladora.

CAPÍTULO IV

COMPARATIVA METODOS DE EXCAVACIÓN DE TUNELES “PERFORACION Y VOLADURA” VS “TUNELADORA” Y CONSIDERACIONES A TOMAR EN CUENTA PARA IMPLEMENTACION MASIVA DEL METODO DE EXCAVACION DE TUNELES CON TBM EN AREQUIPA

En el mundo actual de la excavación subterránea, existen dos grandes métodos de excavación de túneles, los métodos convencionales y los mecanizados. Dentro de los métodos de excavación subterránea se encuentra la técnica de perforación & voladura, también conocida con Drill & Blast, mientras que en el método de excavación mecanizada se encuentra las tuneladoras o TBM.

4.1 Método TBM

La excavación por TBM es mecanizada, ya que se emplea una enorme maquina tuneladora elegida según el terreno a excavar, que, mediante una cabeza de corte giratoria equipada con cortadores, perfora el terreno, y a la vez retira los escombros y coloca sostenimiento al túnel.

4.2 Método perforación y voladura

La técnica Perforación & Voladura es bastante distinta, este método es más manual y consiste en perforar el terreno, y cargar con explosivos las perforaciones, luego de hacer la explosión se deja ventilar el túnel, se pasa a retirar los escombros, para posteriormente lanzar un sostenimiento denomina shotcrete, en resumen, estas son las etapas de método P&V:

1. Perforación de la roca.
2. Carga de explosivos.
3. Voladura.
4. Ventilación.
5. Desescombro y saneo.
6. Sostenimiento con shotcrete.

4.3 Parámetros comparativos de ambos métodos de excavación

4.3.1 Rangos de las secciones de excavación

Las secciones de excavación de las tuneladoras varían desde 1 metro (microtuneladoras) hasta 17.48 metros (tuneladora marca Hitachi construida para reparar un viaducto canadiense), mientras que el método de perforación & voladura se puede hacer secciones mucho más amplias llegando posiblemente a los 25-30 metros de ancho.

Por otro lado, las secciones de excavación de las tuneladoras son circulares, en cambio con el método perforación & voladura se puede tener secciones variables a lo largo de la excavación como tipo baúl, circular, herradura, etc.

4.3.2 Tiempo de suministro de equipos

Las tuneladoras son equipos sofisticados cuyo diseño y fabricación demanda un tiempo considerable, que aproximadamente son de 14 a 16 meses ya sea maquina nueva o reacondicionada, mientras para los equipos de perforación y voladura normalmente toma 6 meses, algunas veces se pueden encontrar en stock disponible para la venta.

4.3.3 Asistencia técnica y personal

Las tuneladoras necesitan asistencia técnica altamente especializada que la brinda solo el fabricante, mientras que los equipos de perforación y voladura al ser comunes en nuestro medio, el personal peruano que se dedica a este rubro tiene una amplia experiencia en mantenimiento a estos equipos.

Por otro lado, el personal que labora exclusivamente en la tuneladora, son el operador de la TBM, encargado de faja y operador de erector, mientras que en el método P&V son todos los operadores de los equipos (Jumbo, cargador, volquete, perforistas, vigías, encargado explosivos, etc.)

4.3.4 Velocidad de excavación

Según las referencias mundiales el rendimiento de excavación de túneles con tuneladoras es de 3 a 4 veces más con respecto al método de P&V. En la tabla N° 4, se puede observar los rendimientos por el método de excavación TBM en túneles del canal de la Mancha obteniendo una media entre 22.32 m/día.

Túnel	Diam. m	Long. m	Equipo	Comienzo	Fin	Metros/ mes
T8 Mar Tren N. Ingl.	8.36	17,651	TBM Robbins-Markham	27-feb-89	22-abr-91	685
T9 Mar Tren S. Ingl.	8.36	18,803	TBM Robbins-Markham	16-jun-89	17-may-91	817
T12 Tierra Tren N. Ingl.	8.70	7,911	TBM Howden	02-ago-89	11-sep-90	594
T11 Tierra Tren S. Ingl.	8.70	7,859	TBM Howden	20-nov-89	20-nov-90	655
T7 Mar Servicio Ingl.	5.38	21,770	TBM Howden	04-ene-88	30-oct-90	643
T10 Tierra Servicio Ingl.	5.76	7,930	TBM Howden	30-sep-88	09-nov-89	596
T2 Mar Tren N. Francia	8.78	20,009	EPB Kawasaki-Robbins	28-nov-88	26-may-91	670
T3 Mar Tren S. Francia	8.78	18,860	EPB Kawasaki-Robbins	27-mar-89	28-jun-91	697

Tabla N° 6: Datos reales de rendimientos de excavación TBM simple escudo a lo largo del mundo.

Fuente: (Soto, 2004)

Por otro lado, en la tabla N° 5 se pueden observar los rendimientos de túnel por método convencional a lo largo del mundo con una media de 6.14 m/día, estos datos confirma lo anterior dicho, que el método TBM tiene un rendimiento de 3 a 4 veces más al método P&V, en este caso específico de análisis resulta 3.64 veces más de rendimiento de TBM vs P&V datos que difícilmente se pueden comparar al tener un ratio de avance con tanta diferencia, esto hace que los túneles excavados con TBM siempre estén un escalón más arriba a los túneles con métodos convencionales.

TÚNEL	Sección m ²	Long. M	Comienzo	Fin	Metros/mes
Mont Cenis (1870)	75	12.233	Dic-57	dic-70	78
S.Gotardo 1 (1882)	60	14.900	Ago-72	jun-82	127
Arlberg (1884)		10.400	1880	1884	244
Simplón 1 (1905)		19.800	Nov-98	feb-05	262
Loetschberg 1		14.500	Jun-06	mar-13	179
Apenino		18.400	1920	1934	118
Simplón 2		19.800	Jun-12	jun-21	183
MontBlanc	80	11.600	May-59	ago-62	301
Frejus		12.870	Oct-74	abr-79	239
S.Gotardo Carretera	65	16.900	Jun-70	jun-80	141
Seelisberg (2x9.3)		18.600	Jun-70	jun-80	155

Tabla N° 7: Datos reales de rendimientos de excavación método P&V a lo largo del mundo.

Fuente: (Soto, 2004)

4.3.5 Sobre excavación del túnel

La sobre excavación en roca competente o roca dura por el método TBM es casi nula, pero esto depende del tipo de terreno, pero según referencias aproximadamente es un 5%, pero en el caso de perforación y voladura es aproximadamente 25 – 30 %, ya que los explosivos son poco predecibles y es el principal motivo el exceso de sobre excavación.

4.3.6 Seguridad en los túneles

La excavación de túnel históricamente ha sido una construcción muy peligrosa, pero a medida que ha pasado el tiempo se ha implementado más seguridad para los trabajadores. En el túnel de Mont Cenis murieron 28 hombres, en el S. Gotardo 1 la cifra de muertos oscila según las fuentes entre 177 y 310, con 877 inválidos o heridos graves. En el Simplón 1 ya comenzaron las medidas de seguridad e higiene, aunque murieron 39 hombres. En el Loetschberg murieron 37 hombres, 12 por un desprendimiento de una ladera, en el Gran Apenino 97 hombres y en el San Gotardo carretero, 19 hombres. Los túneles actuales son

mucho más seguros, incluso trabajando con P&V. Sigue habiendo muertos en los túneles de P&V, pero los accidentes mortales en los túneles de tuneladora cerrada son casi inexistentes. (Soto, 2004)

4.3.7 Generación de gases

Los gases nocivos generados por el funcionamiento de las “TBMs”, es prácticamente inexistente por ser completamente eléctrico - hidráulico, salvo por la circulación de la locomotora de servicios y el personal que labora dentro del túnel, al que ocasionalmente se puede sumar la presencia de otros equipos diesel, como cargadores frontales y camiones. Por consiguiente, no existen demoras para ventilar la labor a fin de diluir y eliminar éstos, significando un ahorro económico y de tiempo. (Giraldo, 2010)

En la excavación con perforación y voladura en cambio, las emanaciones son abundantes, desde el ingreso del equipo de perforación con su sistema diesel, emanación de vapores de la nitroglicerina que contienen las dinamitas, emanaciones como producto de la reacción explosiva (básicamente el CO y NO₂), que son los más significativos en este sistema, a esto se suman lo generado por la operación de los equipos de carguío y la circulación de los equipos de transporte. Análogo al caso de las “TBMs”, la contaminación por la respiración y transpiración del personal es aún mayor por cuanto laboran más personas dentro del túnel. Para eliminar todos los gases generados por este sistema, se considera un tiempo dentro del ciclo de excavación, esto también implica mayor costo en equipos y accesorios de ventilación. (Giraldo, 2010)

4.3.8 Longitud económica de excavación

Como regla general, para longitudes de excavación mayores de 4,5 km emplearemos un TBM y para longitudes de menos de 1,5 km emplearemos la técnica Perforación & Voladura. (Putzmeister, 2018)

Falta mencionar que esto es a grandes rasgos, ya que pueden encontrarse factores que hagan que un túnel de 5 km se excave por P&V en lugar de TBM o que un túnel de 1,5 km se excave por TBM en lugar de P&V. Por eso se debe estudiar cada caso en concreto. (Putzmeister, 2018)

Para aquellos túneles cuya longitud de excavación está comprendida entre los 1,5 km y los 4,5 km, los costes de ejecución son similares, por lo que deben tenerse en cuenta otros factores, como son esos de orden geológico, geométrico, ambiental y de tiempos de ejecución. (Putzmeister, 2018)

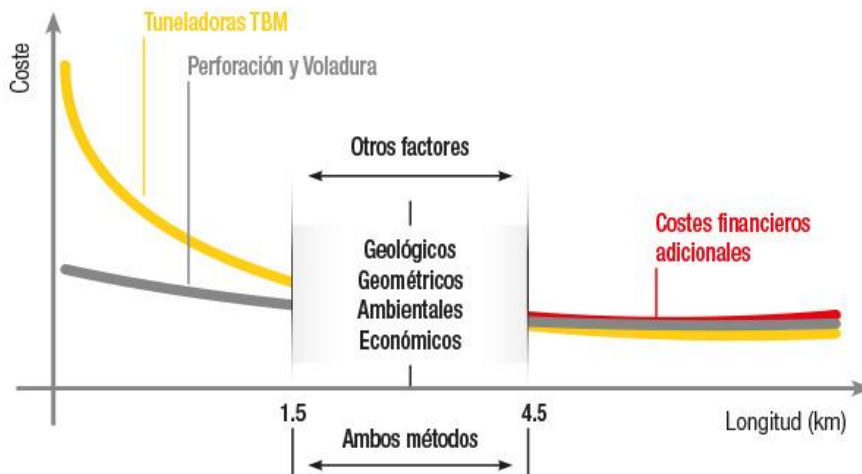


Figura N° 30: Coste según longitud del túnel excavado para los métodos con TBM y Perforación & Voladura.
Fuente: (Putzmeister, 2018)

4.4 Consideraciones a tomar en cuenta para una futura implementación masiva del método de excavación de túnel con TBM en Arequipa

En Arequipa hay varios proyectos de irrigación, centrales hidroeléctricas, viales, etc. En los que se requieren túneles de gran envergadura, en esta parte del capítulo IV mostraremos las ventajas de excavar un túnel con el método TBM.

- i) El volumen de material excavado con TBM es normalmente el teórico más el esponjamiento del material y un 5% de sobre excavación, lo que en otros métodos este 5% se convierte en un 25 al 30% de sobre excavación, estamos hablando de $\frac{1}{4}$ más de material excedente a transportar a los botaderos y si hablamos de distancias muy largas a transportar esto se convierte en una partida imponente y un coste en exceso comparándolo con el método TBM.
- ii) La seguridad para el personal y los equipos en el interior del túnel es la idónea para trabajar, en este método de excavación por TBM es casi inexistente las muertes en el proceso de construcción. Pasa lo contrario en

otros métodos de excavación convencional que normalmente se tienen muertos en sus procesos de construcción como lo vimos en el punto 4.3.6, esto sucede por una sencilla razón, en los métodos convencionales el personal todo el tiempo está en contacto con el terreno a excavar y pueden ocurrir deslizamientos o desprendimientos de material, en cambio en el método con TBM el personal en ningún momento está en contacto con el terreno ya que la tuneladora cuando está excavando el personal se encuentra en el escudo de la misma y como sabemos se va poniendo sostenimiento de concreto en cada avance que se hace, entonces siempre está resguardado y seguro.

- iii) El número de personal para trabajar en el interior del túnel es un 40% menos que para excavar por métodos convencionales, ya que el método convencional al utilizar bastantes equipos para la excavación depende de mucho personal.
- iv) Altos rendimientos de excavación como lo mencionamos en el punto 4.3.4 los rendimientos que desarrollan una tuneladora al excavar son inalcanzables por los métodos convencionales, lo que implica que el tiempo de ejecución de un proyecto se reduce aproximadamente a $1/3$ o $1/2$ del tiempo planificado.
- v) El material excavado tiene una granulometría uniforme, lo que permite un sistema de transporte continuo como las fajas transportadoras, lo que facilita su eliminación del frente de trabajo.
- vi) Método de excavación de túneles más limpio y amigable con el medio ambiente, al no usar explosivos no genera gases contaminantes, polvos y contaminación acústica, perjudiciales para el ser humano, al ser la tuneladora un equipo eléctrico tampoco genera CO_2 como todos los otros equipos de los métodos convencionales.
- vii) El método de excavación de túneles con TBM se puede usar tanto en zonas que no están pobladas como en pobladas, los métodos convencionales están limitados en este sentido por las vibraciones que generan, nos ponemos en el caso que Arequipa necesita construir un metro subterráneo, la posibilidad

más latente, más económica y menos perjudicial sería usar una TBM ya que sería la opción más adecuada al no generar vibraciones.

CONCLUSIONES

El presente trabajo de investigación es un análisis de construcción de túnel por el método mecanizado de excavación con tuneladora simple escudo, este análisis permitirá conocer las ventajas de usar este método de excavación y poder implementarlo masivamente en los proyectos de Arequipa y porque no a nivel nacional.

- Al utilizar el método de excavación con tuneladora la seguridad de los trabajadores es máxima, los accidentes laborales en excavación de túneles con TBM son casi inexistentes, pasa todo lo contrario para otros métodos de excavación convencional, esto sucede por la sencilla razón de que el personal obrero siempre trabaja con el terreno recubierto por concreto prefabricado, lo que se consigue con esto es que se elimine el principal factor de accidentes laborales en construcción de túneles que son los desprendimientos de rocas.
- Excavando los túneles con tuneladora se pueden obtener rendimientos diarios de 3 a 4 veces más altos que excavar con métodos convencionales, los rendimientos de excavación con TBM están alrededor de los 20 a 25 m diarios, lo que por método convencional aproximadamente están entre 5 a 7 metros diarios, este rendimiento influye significativamente en los plazos de ejecución de los proyectos, lo que al final se puede repercutir en dinero.
- Los túneles con tuneladora son la forma de excavar más amigables con el medio ambiente ya que los principales factores de contaminación en construcción de túneles son los siguientes:
 - Contaminación por explosivos que al usarse contaminan los suelos y aguas subterráneas, esto excavando con TBM no sucede ya que no se usan explosivos.
 - Contaminación acústica, por la misma razón que la anterior al usar explosivos se produce este tipo de contaminación, esto en el método TBM no sucede porque no se usan explosivos.
 - Contaminación con gases, al excavar con métodos convencionales se usan bastantes equipos de línea amarilla que al usar petróleo expiden

CO₂, por método TBM no se usa petróleo ya que las tuneladoras son eléctricas y la contaminación por CO₂ es mínima.

- Excavando túneles con el método tuneladora simple escudo no se tiene sobre excavaciones, a diferencia de los métodos convencionales, al no tener sobre excavaciones, se tiene ahorro en sostenimiento y material excedente a eliminar, estas dos partidas tienen incidencia considerable en este tipo de obras lo que repercute considerablemente en el presupuesto final.

RECOMENDACIONES

Según el desarrollo del presente trabajo de investigación se puede tomar como recomendaciones las siguientes:

- El estado debería implementar en el estudio de sus expedientes técnicos que tengan frentes con túneles, la alternativa de excavarlos con tuneladoras, ya que en el presente trabajo de investigación con la teoría recopilada se pudo ver que es factible aplicar estos métodos de excavación obteniendo bastantes beneficios.
- Los beneficios señalados en el párrafo anterior no solo podrían ser económicos, también se destacan beneficios ambientales, seguridad del personal y sobre todo que este método se puede aplicar en cualquier parte del territorio, ya sean zonas alejadas como en ciudades, por ejemplo, para excavación de túneles viales (metro), a diferencia de métodos convencionales que generan bastantes vibraciones y podrían dañar la infraestructura de la ciudad, las tuneladoras no generan vibraciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AUTODEMA. (2018). *https://www.autodema.gob.pe/estado-de-ejecucion-del-proyecto-majes-siguas_segunda-etapa-a-octubre-del-2018/*. (Autoridad Autonoma de Majes) Recuperado el 25 de abril de 2019, de https://www.autodema.gob.pe/estado-de-ejecucion-del-proyecto-majes-siguas_segunda-etapa-a-octubre-del-2018/.
- Giraldo Paredes, E. M. (2010). *Las Maquinas Tuneladoras Tipo "TBM" como Alternativa al Sistema de Perforación y Voladura para la Excavación de Túneles caso: Desarrollo de Túneles en Yuncan*. Lima - Perú.
- Gonzalez Valderrama, C. E. (2016). *Estudio de Prefactibilidad para la Construcción de Túneles de Metro Mediante Máquinas Tuneladoras*. Santiago de Chile - Chile.
- Hernández Rubiños, M. (2018). *Majes - Sigvas II Etapa: De las Lecciones Aprendidas a las Políticas Públicas - Proinversión*. Lima - Perú.
- Hernandez, R., Fernandez, C., & Baptista, P. (1991). *Metodología de la Investigación*. 5a. ed. DF - México: McGraw - Hill Interamericana de México.
- Namakforoosh, M. (2005). *Metodología de la Investigación*. 2a. Ed. DF México - México: Limusa.
- Proinversión. (2018). *<https://www.proinversion.gob.pe/modulos/LAN/landing.aspx?are=0&pfl=1&lan=10&tit=institucional-popup>*. Recuperado el 26 de abril de 2019, de <https://www.proinversion.gob.pe/modulos/LAN/landing.aspx?are=0&pfl=1&lan=10&tit=institucional-popup>.
- Putzmeister. (2018). *<http://bestsupportunderground.com/tbm-perforacion-voladura/>*. Recuperado el 17 de julio de 2019, de <http://bestsupportunderground.com/tbm-perforacion-voladura/>.

- Serradell Mejia, D. (2017). *Análisis de Rendimientos en las Diferentes Etapas de Excavación de un Túnel en Suelo Firme, Utilizando un Escudo EPB*. Ciudad de México - México.
- Soto Saavedra, P. R. (2004). *Construcción de Túneles*. Valdivia - Chile.