



ESCUELA DE TECNOLOGÍAS

TRATAMIENTOS Y SOLUCIONES DE PROBLEMAS CONSTRUCTIVOS
EN EXCAVACIONES SUBTERRANEAS

AUTOR

HECTOR ANDRÉS MORA CARPIO

AÑO

2020



ESCUELA DE TECNOLOGÍAS

**TRATAMIENTOS Y SOLUCIONES DE PROBLEMAS CONSTRUCTIVOS EN
EXCAVACIONES SUBTERRANEAS**

TRABAJO DE TITULACIÓN PRESENTADO EN CONFORMIDAD CON LOS
REQUISITOS ESTABLECIDOS PARA OPTAR POR EL
TITULO DE TECNÓLOGO EN CONSTRUCCIÓN Y DOMOTICA.

PROFESOR GUÍA

ARQ. FRANCISCO ZAMDULBIDE

AUTOR

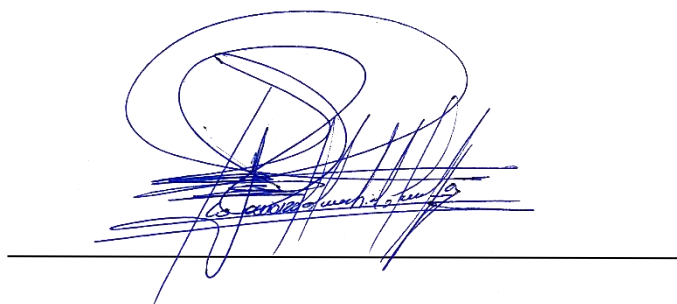
HECTOR ANDRÉS MORA CARPIO

AÑO

2020

DECLARACIÓN DE PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo, tratamientos y soluciones de problemas constructivos en excavaciones subterráneas, a través de reuniones periódicas con el estudiante Héctor Andrés Mora Carpio, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los trabajos de titulación.”

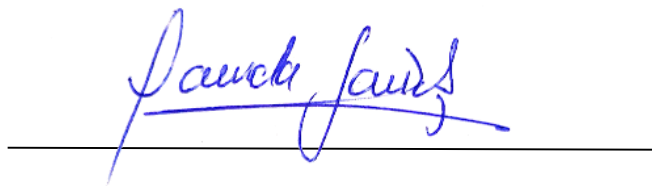


Arquitecto Francisco Javier Zaldumbide Zurita

C.C. 1718906280

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado este trabajo, tratamientos y soluciones de problemas constructivos en excavaciones subterráneas, a través de reuniones periódicas con el estudiante Héctor Andrés Mora Carpio, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regula los Trabajos de Titulación.”



Arquitecta Pamela Sánchez Albán

C.C 0502950793

DECLARACIÓN DE LA AUTORIA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se ha citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos del autor vigentes.”

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'AMC', with a horizontal line and an arrow pointing to the left extending from the bottom of the signature.

Héctor Andrés Mora Carpio

C.C 1716631054

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi coordinador y tutor de tesis, Francisco Zaldumbide, su ayuda inmediata a la hora de resolver dudas y su paciencia en las tutorías y correcciones. A pesar de realizar el trabajo a distancia me he sentido apoyado y guiado en todo momento.

Así mismo, a los que intervinieron en mi camino, con enseñanza y paciencia para que pudiera andar y desarrollarme en lo que hoy soy y siguen apoyándome como mi familia, sobretodo mi madre y mi esposa.

RESUMEN

A lo largo del tiempo, como solución al rápido crecimiento demográfico, se han creado y desarrollado con rapidez nuevos medios de transporte para abastecer a la población. Asimismo, la tecnología empleada en estos, evoluciona diariamente con métodos de mayor eficacia. Cómo es el caso de la excavación de túneles. Durante la ejecución y el desarrollo de estas nuevas tecnologías, junto con la complejidad de los distintos terrenos a excavar, han surgido patologías y problemas que necesitan ser resueltos en el transcurso de la realización de la obra.

Se ha tomado como modelo de estudio un tramo del túnel del Metro de Quito para analizar los tratamientos previos a la excavación del túnel y las posteriores patologías con sus respectivas soluciones. Para al final, brindar las conclusiones y recomendaciones debidas.

ABSTRACT

Over time, as a solution to rapid population growth, new ways of transportation have been created and developed rapidly to supply these population. Also, the technology used in these, evolves daily with more effective methods. ¿How is the case of tunnel excavation? During the execution and development of these new technologies, along with the complexity of the different areas to be excavated, there have been pathologies and problems that need to be solved during the execution of the work.

A section of the Quito Metro tunnel has been taken as a study model to analyze the treatments prior to the tunnel excavation and the subsequent pathologies with their respective solutions. In the end, conclusions and recommendations due will be provided.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 FORMULACION DEL PROBLEMA	4
1.3 OBJETIVOS	5
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	5
1.3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	5
1.4 ALCANCE DE ESTUDIO Y PLANTAMIENTO A LAS SOLUCIONES DEL PROBLEMA	6
2. JUSTIFICACIÓN	7
2.1 JUSTIFICACION TEÓRICA	7
2.2 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA	7
2.3 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA	8
3. MARCO TEÓRICO	10
3.1 HISTORIA DE LAS EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS DE TÚNELES	10
3.2 HISTORIA DE LA METODOLOGÍA CONSTRUCTIVA EN TÚNELES	12
4. DESCRIPCIÓN DE PASOS CONSTRUCTIVOS DE TÚNELES	15
4.1 ESTUDIOS PRELIMINARES	16
4.1.1 HISTORIAL ESTUDIO GEOLÓGICO	17
4.1.2 SONDEOS	18
4.1.3. TÚNELES DE RECONOCIMIENTO	20
4.2. MÉTODOS DE PERFORACIÓN	21
4.3 OPERACIONES DE LA CONSTRUCCIÓN	23
4.3.1. EL ARRANQUE	24
4.3.1.1. MÉTODO MANUAL	24
4.3.1.2. MÉTODO CON EXPLOSIVOS	24
4.3.1.3. MÉTODOS MECANIZADOS	27
4.3.2. EL TRANSPORTE	30
4.3.3. REVESTIMIENTO	32

5. FACTORES GEOLÓGICOS Y DEFINICIÓN DE PATOLOGÍAS EN EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS DE TÚNELES	39
5.1. PROBLEMAS GEOLÓGICOS	40
5.1.1 TÚNELES EN TERRENOS SALINOS Y EXPANSIVOS	41
5.1.2 MOVIMIENTOS SÍSMICOS EN TÚNELES	44
5.1.3 NIVEL FREÁTICO Y CAMBIOS PERIÓDICOS DE HUMEDAD	45
5.1.3.1 CONTROL DEL FLUJO DE AGUA EN UN TÚNEL	49
5.1.3.2 CAÍDA DE RESISTENCIA POR AGUA SUBTERRÁNEA	51
5.1.4 ASENTAMIENTOS	52
5.1.5 FACTORES QUE AFECTAN A LA EFICACIA DE LOS SOSTENIMIENTOS	53
5.2 PRINCIPALES PATOLOGÍAS TÉCNICO CONSTRUCTIVAS	54
5.2.1 PROBLEMAS EN REVESTIMIENTO	54
5.2.1.1 FISURAS O AGRIETAMIENTO DE REVESTIMIENTO DE TÚNEL	55
5.2.1.2 FILTRACIONES	55
5.2.1.3 DESCANTILLADURA	56
5.2.1.4 FLORESCENCIA	57
5.2.1.5 DECOLORACIÓN	58
6. TRATAMIENTOS DE TERRENO PREVENTIVOS Y SOLUCIONES A PATOLOGÍAS A LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES	58
6.1 TRATAMIENTOS DE TERRENO PREVIOS USADOS EN TÚNELES	58
6.1.1 TRATAMIENTOS DEL TERRENO POR INTERIOR DE TÚNEL	59
6.2. TRATAMIENTO DEL TERRENO POR EXTERIORES DE TÚNEL	61
6.3 TRATAMIENTOS PARA PATOLOGIAS TECNICO CONSTRUCTIVAS	65
6.3.1 TRATAMIENTO DE ZONAS DE ANHIDRITA	65
6.3.2 REPARACIÓN DE GRIETAS Y FILTRACIONES	67
6.3.2.1 SELLADO GRIETAS ESTRUCTURALES	68
6.3.2.2 SELLADO DE FILTRACIONES	70
6.3.3. IMPERMEABILIZACIÓN Y DRENAJE	72
6.4 NUEVOS TIPOS DE HORMIGONES Y FIBRAS UTILIZADOS PARA RESOLVER PATOLOGÍAS POR TIPO DEL MATERIAL	74

6.4.1 NUEVOS HORMIGONES PROYECTADOS ECOLÓGICOS _____	75
6.4.2 HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES (AUTO-NIVELANTES) _____	76
6.4.3 HORMIGONES CEMENTICOS (ECC) _____	76
6.4.4 HORMIGONES POLIMÉRICOS _____	77
6.4.5 HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA _____	77
6.4.6 NUEVOS TIPOS FIBRAS PARA PATOLOGÍAS DE REVESTIMIENTO DE HORMIGÓN _____	78
6.4.7 TIPOS DE FIBRAS MODERNAS UTILIZADAS EN REVESTIMIENTOS DE TÚNEL _____	79
7. TRATAMIENTOS Y SOLUCIONES A PROBLEMAS CONSTRUCTIVOS EN EXCAVACIÓN SUBTERRÁNEA CON TUNELADORA EN TERRENOS MIXTOS EN PROYECTO METRO DE QUITO ENTRE LOS TRAMO EL LABRADOR – LA CAROLINA _____	82
7.1 DESCRIPCIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS APLICADOS EN LA EXCAVACION DEL TUNEL TRAMO LABRADOR – CAROLINA _____	84
7.1.1 TÚNEL CON TUNELADORA TBM _____	87
7.2 TRATAMIENTOS y soluciones PREVIAs a problemas geologicos ANTES DE REALIZAR ExCAVACIONES del tramo labrador-carolina CON TUNELADORA TBM-EPB - PLANO DE IDENTIFICACIÓN DE TRAZADOS DEL TRAMO analizado _____	93
7.2.1 PLANOS SUBTRAMOS A IDENTIFICAR TRATAMIENTOS Y SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS PARA EL PASO DE LA TUNELADORA _	95
7.3 PATOLOGÍAS Y SOLUCIONES A PROBLEMAS POR LA EJECUCIÓN DE TUNEL CON TUNELADORA TBM EN EL TRAMO LABRADOR– CAROLINA _____	103
7.3.1 PLANO DE IDENTIFICACIÓN DE PATOLOGÍAS Y SOLUCIONES POR SUBTRAMOS _____	103
7.3.2.1 PANTALLAS Y PILOTE CON ESFUERZO A TRACCION Y COMPRESION CON HORMIGON ARMADO _____	105
7.3.2.2 SOLUCIÓN DE PASO DE PANTALLAS PARA TUNELADORA _	108
7.4 PROBLEMAS DE DOVELAS _____	109
7.4.1 FISURAS DE DOVELAS _____	110
7.4.2 DEFICIENCIAS POR FABRICACION DE DOVELAS _____	111
7.4.3 COMPORTAMIENTO DE JUNTAS ENTRE DOVELAS _____	112
7.4.4 OVALACIÓN Y MOVIMIENTOS SOBRE LOS ANILLOS DE COLA ____	114

7.4.5 PROBLEMAS CON FILTRACIONES _____	116
7.5 INYECCIÓN MORTERO DE ANILLOS EN LA COLA DEL ESCUDO _____	116
7.5.1 INYECCIÓN Y TRATAMIENTOS EN TERRENOS PARA FILTRACIONES _____	119
7.6 ANÁLISIS PREVIO Y CAMPO DE APLICACIÓN DE INYECCIÓN _____	121
7.7 IDENTIFICACIÓN DE FILTRACIONES EN EL TÚNEL TRAMO LABRADOR-LA CAROLINA _____	124
7.8 METODOS Y PROCEDIMIENTO OPERATIVO APLICADO PARA LA INYECCION DE FILTRACION EN TRAMO LABRADOR-LA CAROLINA _____	128
7.8.1 MÉTODOS DE INYECCIÓN PARA OBTURACIÓN Y CONTROL DE VÍAS DE AGUA. _____	128
7.8.1.1 LIMPIEZA DE LA SUPERFICIE: _____	129
7.8.1.2 PERFORACIÓN DE LOS PUNTOS DE INYECCIÓN _____	129
7.8.1.3 LIMPIEZA DE LOS HUECOS DE LOS TALADROS: _____	130
7.8.1.4 COLOCACIÓN DE LOS INYECTORES: _____	130
7.8.1.5 LIMPIEZA DE LA GRIETA, SI ES NECESARIO _____	130
7.8.1.6 INYECCIÓN DE LA RESINA Y CATALIZADOR: _____	130
7.8.1.7 LIMPIEZA: _____	132
7.8.2 INYECCIÓN EN TRASDÓS DE MUROS CON MORTERO _____	133
7.9 PROBLEMAS EN FRENTE DE ESCAVACIONES _____	135
7.9.1 INESTABILIDAD O COLAPSO EN EL FRENTE DE EXCAVACIÓN _____	135
7.9.2 DESVIACIONES EN GUIADO DE TUNELADORA TBM _____	138
7.9.3 DESGASTE EN LOS CEPILLOS _____	139
8. CONCLUSIONES _____	141
9. RECOMENDACIONES _____	142
REFERENCIAS _____	144

1. INTRODUCCIÓN

Se considera que las excavaciones subterráneas modernas en la actualidad han coadyuvado al adelanto y progreso de las sociedades a nivel de infraestructura, en la actualidad, gracias a este desarrollo se tiene la capacidad de tener mejoramiento continuo en la fabricación de maquinaria, equipamiento, utillajes, técnicas y materiales que han hecho viable alcanzar el avance tecnológico y científico, así mismo, ha posibilitado la comunicación entre poblados y naciones por medio de túneles y carreteras de grandes redes; sumándose a ello muchas actividades como la extracción de minerales (metalurgia), la generación de energía (hidroeléctrica), construcción de mega canales de agua potable o aguas residuales para la urbanización de las ciudades. Es innegable que el individuo siempre pretenderá cavar la corteza terrestre para su beneficio y organización, por lo cual se necesita incursionar en las mejoras constructivas en cuanto a desarrollo para excavaciones de túneles se refiere.

1.1 ANTECEDENTES

En épocas pasadas, el quebrantamiento de ingentes porciones de tierra cuyo objetivo posterior fue su remoción, pudo ser posible únicamente a través de la utilización de materiales explosivos, que a corto o largo plazo genera repercusiones negativas en los suelos y el medio ambiente, como: Desajuste en las condiciones del terreno, contaminación en los ecosistemas, perjuicios a las diferentes estructuras, ondas expansivas peligrosas, rocas volátiles, entre otros. A razón de las nuevas exigencias de preservación ambiental, productividad y desarrollo tecnológico presentadas ante el hombre, la invención y construcción de máquinas que no

requieren el uso de explosivos para la extracción de materiales pétreos ha sido posible gracias a los conocimientos avanzados.

Desde su concepción, los métodos de excavación han sufrido importantes cambios, definidos en gran medida por requerimientos de seguridad, calidad y tiempos de ejecución, al grado de que los métodos actuales se asemejan a procedimientos industriales, por lo que se les ha otorgado la denominación de métodos mecanizados. Para poder lograr estos avances han sido necesarios grandes esfuerzos, de hecho, los primeros precedentes de la mecanización se establecieron en 1825, cuando Brunel desarrolló el primer escudo para la excavación del Río Támesis, en Londres. A partir de la invención de Brunel, las innovaciones y mejoras tomaron diversas vertientes, las cuales han concluido en el desarrollo de las tuneladoras que se usan hoy en día. Las tuneladoras para roca dura, los escudos simples, los escudos dobles, los hidro escudos y los escudos EPB son los que han alcanzado un buen grado de aceptación, bajo distintos campos de aplicación.

Durante este largo periodo de desarrollo, el método convencional no dejó de ser aplicable, en la actualidad su implementación sigue siendo la más usada bajo ciertas circunstancias. La selección de entre estos dos métodos está influenciada por factores de carácter económico, técnico, tiempos de ejecución, seguridad, así como de carácter geotécnico y geológico.

A la fecha, no se ha desarrollado una tuneladora capaz de excavar en *tototerreno* y esto todavía representa un reto para las firmas fabricantes de este tipo de máquinas. Una de las condiciones que representa mayor dificultad durante la excavación de los túneles, está definida por los denominados frentes mixtos. Una buena cantidad de túneles excavados alrededor del mundo han dejado constancia de las dificultades que representa la excavación bajo estas condiciones ya que son

modelos que muchas veces, al ser prototipos tienen fallas técnicas en los procesos constructivos existentes.

Los escudos que han otorgado mayores ventajas para la excavación de este tipo de terreno son los de tipo EPB, pero al igual que los demás tipos de tuneladoras, algunas dificultades pueden acontecer durante su utilización. (Pialarissi Cavalaro, 2009). El conocimiento insustancial de estas dificultades, motivó el desarrollo del presente trabajo, se pretende describir a detalle los factores asociados a su ocurrencia, estableciendo medidas de prevención y corrección para disminuir los impactos generales que provocan en este tipo de obras, lo cual se ve reflejado en los costos y tiempos generales de ejecución.

En la excavación de túneles mediante métodos mecanizados, se debe considerar que para que la construcción de un túnel sea exitosa, no basta con elegir adecuadamente el tipo de tuneladora, también resulta necesario implementar otras medidas relacionadas a otros procesos constructivos involucrados en la excavación.

En obras públicas, con frecuencia se analiza el conflicto existente para la construcción de túneles, puesto que muchas de las excavaciones tienden a presentar una accidentada geografía; no obstante, estas extracciones son de mucha importancia para lograr conectar a urbes o lugares de importancia para los sistemas de transportación que facilitan las diversas transacciones de comercio o la interacción entre comunidades; asimismo, por el considerable crecimiento de la actividad económica global, en la última década, ha sido necesario el análisis de nuevas opciones de circulación vial que puedan sustituir a las ya existentes, para así mejorando los niveles de atención a los usuarios. De acuerdo con Soto (2014), el mejoramiento y perfeccionamiento de las diversas técnicas aplicadas para una eficiente construcción de túneles ha ido en su avance hacia el aprovechamiento de

los recursos que se disponen, generando reducción de costos aplicados en materia de operación y mantenimiento, cuyos beneficios son atribuibles a la sociedad en general. (Soto, 2014).

La necesidad emergente de este tipo de infraestructura tales como grandes túneles carreteros, de aducción, trasvases, metros y otros, cuyos planes favorezcan la reciprocidad comercial, abastecimiento de agua e irrigación, generación de energía, facilidad el transporte terrestre, etc., para lo cual, involucra la implementación de formas más eficientes para el diseño y edificación vías subterráneas.

Debido a la inusual y diversa configuración geográfica de los frentes de excavación, con el objeto de realizar las oportunas recomendaciones para la elaboración de túneles se realizan diversos trabajos en obras públicas y de laboratorio. La caracterización de sitio previa a la construcción civil presenta un rol fundamental en la optimización de la ingeniería tanto en términos de soluciones ingenieriles como en la prevención de los riesgos geológicos asociados a las características del sitio (sismicidad, licuación, presencias de cárcavas, fallas, arcillas expansivas, etc.). Sin embargo, al momento de la ejecución de estos proyectos dejan muchos percances e incidentes que, al momento de las planificaciones, situaciones no tomadas en cuenta que se van desarrollando a lo largo del proyecto, así mismo las soluciones para la innovación de esas obras, dichas dificultades en el desarrollo de los proyectos son motivo de estudio en el presente trabajo.

1.2 FORMULACION DEL PROBLEMA

Por el crecimiento y la eficiencia de proyectos de infraestructura subterránea con tipologías diferentes de terrenos, produce que los procesos constructivos modernos sean diferentes, por lo que todavía se deja de lado la investigación para dar

solución a procesos sincronizados a la excavación, dándose desfases e imprevistos bruscos a lo largo del desarrollo de las excavaciones de túneles, los cuales retrasan el avance de la obra viéndose afectado el presupuesto y la planificación mensual en cuanto a materiales y mano de obra.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Reconocer los inconvenientes más comunes al realizar excavaciones subterráneas dándoles un tratamiento y solución técnica constructiva adecuada de acuerdo a su tipología, basados en un caso de estudio.

1.3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Definir los tipos de excavaciones más comunes, describiendo su evolución y desarrollo tecnológico hasta nuestros días.
- Describir los procesos constructivos de todas las excavaciones definidas, desarrollando un paso a paso de las actividades para ejecutar su sistema y eficiencia a lo largo del tiempo.
- Definir el tipo de patologías que se presentan de acuerdo a el tipo de suelo, las causas por las que se producen incidentes en los procesos constructivos de excavaciones subterráneas analizando en cadena los fallos de las mismas.
- Describir los diferentes tipos de soluciones a dichas patologías basados en un caso de estudio de proyecto de un túnel, con las evidencias en planos y memorias técnicas de las soluciones escogidas, en las cuales se evidenciaron varias dificultades.

- Determinar los problemas más importantes que se presentan al momento de entablar las técnicas para llevar a cabo el plan, basados en un tema de estudio por tramos de túnel, para dar paso a la investigación del origen, soluciones dadas y prevenciones con el fin de mejorar los sistemas de excavación en futuros procesos de ejecución de túneles.

1.4 ALCANCE DE ESTUDIO Y PLANTAMIENTO A LAS SOLUCIONES DEL PROBLEMA

Se realizará una investigación de los tipos de excavación subterránea más eficientes que se han ido desarrollando durante la evolución de las excavaciones subterráneas, para realizar el análisis de cada uno de los problemas constructivos más importantes, sincronizados a las excavaciones más eficientes, con el propósito de ir seleccionando todos los factores influyentes desde su origen, solución y consecuencia, analizando un caso de estudio específico y comparándolo con otros casos donde se dio más dificultades. Se realizará también, un trabajo de investigación complementaria para brindar un amplio contexto de las soluciones y evitar problemas futuros en excavaciones subterráneas.

En el que se entregará en evidencia:

- Conceptos de métodos excavación.
- Estudios, sondeos y tipología de terreno inestable.
- Detalle de procesos constructivos.
- Problemas o patologías en procesos de excavaciones.
- Valoración de soluciones de problemas constructivos.
- Planos originales constructivos de las soluciones.
- Planos temáticos de soluciones.

2. JUSTIFICACIÓN

2.1 JUSTIFICACION TEÓRICA

Se ha decidido desarrollar el tema debido a la implementación aplicable al área de la obra civil, puesto que comprende todas las materias relacionadas a la carrera tecnología en construcción cubriendo todos los aspectos aprendidos en las materias: **Administración de obra:** Está influenciado en la planificación y procesos constructivos de obra en infraestructura.

Vías y carreteras: Estos proyectos se basan en un trazado con guiado de excavación con peraltes y clotoides.

Topografía: Las excavaciones se basan en procesos constructivos guiados por un PK, cotas y coordenadas de referencia para guiarla.

Materiales de construcción: Es importante saber qué materiales son los específicos para la remediación de los problemas constructivos.

Maquinaria y equipos: Identificar la maquinaria o herramienta específica para la ejecución de las excavaciones según los tipos de suelos.

Proyectos constructivos: Identificar el tipo de excavación y saber los pasos constructivos para realizar el proyecto.

Lectura de planos: Saber leer planos para la ejecución del proceso constructivo de infraestructura.

Análisis de costos: Realizar un análisis de costos para saber la influencia final de los problemas constructivos en excavaciones subterráneas.

2.2 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA

Se realiza este estudio, evidenciando las patologías que se producen en el desarrollo de la ejecución de excavaciones de túneles para analizar el origen de sus

causas, soluciones propuestas, pasos constructivos en un caso de estudio dándose las mejoras en la eficiencia de la ejecución para futuros casos de proyectos de túneles, mundialmente hablando. Obteniendo información general desde la tipología de las excavaciones, se realizará una simplificación para obtener el origen de los problemas de las excavaciones subterráneas, ya que al tener este tipo de conocimiento se abren muchas más puertas a soluciones anticipadas para no incurrir en nuevos proyectos de excavación de túneles.

Para evidenciar los problemas es necesario que se abra el debate de cómo prevenirlos, sobre todo los de las patologías que retrasan el rendimiento de las excavaciones, la prevención puede iniciarse mejorando maquinaria, procesos constructivos, investigaciones nuevas y cambios de procedimientos, con lo cual se evitará seguir cometiendo este tipo de desfases en la infraestructura subterránea.

Esta investigación va dirigida a despertar interés en las empresas multinacionales y técnicos o jefes de obra con experiencia en este tipo de proyectos poniendo interés para la investigación y modificación de los procesos constructivos.

2.3 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA

Tabla 1: Investigación metodológica

	Objetivo Específico	Entrega	Desarrollo	Bibliografía
1	Definir los tipos de excavaciones más comunes, describiendo su evolución y desarrollo tecnológico hasta nuestros días.	Tipos de excavaciones.	Desarrollar una investigación de cuales son todos los tipos de excavaciones más eficientes y como se fueron desarrollando a lo largo del tiempo hasta la actualidad.	Acciona infraestructuras

2	Describir los procesos constructivos de todas las excavaciones definidas, desarrollando un paso a paso de las actividades para ejecutar su sistema y eficiencia a lo largo del tiempo.	Descripción de pasos constructivos.	Especificar paso a paso como se ejecuta los procesos de los tipos de excavación ya definidos.	
3	Definir el tipo de patologías que se presentan de acuerdo a el tipo de suelo, las causas por las que se producen incidentes en los procesos constructivos de excavaciones subterráneas analizando en cadena los fallos de las mismas.	Definición de patologías .	Definir las patologías, generando el estudio analizando las causas por las que se producen de acuerdo a su tipo de excavación.	
4	Describir los diferentes tipos de soluciones a dichas patologías basados en un caso de estudio de proyecto de un túnel, con las evidencias en planos y memorias técnicas de las soluciones escogidas, en las cuales se evidenciaron varias dificultades escogidas donde se evidencio dificultades.	Dar a conocer los tipos de tratamientos y soluciones a las patologías.	Establecer los tipos de soluciones para resolver con eficiencia los procesos de excavaciones.	
5	Determinar los problemas más importantes en el diseño del plan, basados en un tema de estudio por tramos de túnel, para dar paso a la investigación del origen, soluciones dadas y prevenciones con el fin de mejorar los sistemas de excavación en futuros procesos de ejecución de túneles	En un caso de estudio dividido en tramos analizaremos todas las patologías dadas para	Basado en un proyecto de túnel analizaremos todos los problemas ocurridos entre el tramo Labrador-pozo de extracción desde su origen hasta la solución tomada significando un mejoramiento en	

		lograr su terminación.	los nuevos procesos a ejecutar.	
--	--	------------------------	---------------------------------	--

3. MARCO TEÓRICO

Siendo muy importante la historia de los túneles desde su comienzo, sus técnicas y razones de hacerlos esto nos da una pauta para comenzar a enlazar su desarrollo en sus métodos, evolución y necesidad de analizar sus problemas para conseguir soluciones y sus mejoras en construcciones futuras.

3.1 HISTORIA DE LAS EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS DE TÚNELES

Para esto es necesario mencionar la historia alrededor de los inicios de las excavaciones.

Según Alonso (2002), la necesidad de supervivencia en el hombre ha generado que éste busque mecanismos de superación de sus limitantes, lo cual lo ha conducido a través de los años a enfrentar los obstáculos naturales y de esta premisa ha partido la idea de construir túneles. En el desarrollo de este tipo de proyectos los individuos se han encontrado con elementos fluviales o marinos que significan grandes desafíos para lograr incorporar edificaciones subterráneas para el transporte. (Alonso, 2002).

Si bien el término túnel es muy extenso; no abarca únicamente el significado de obra lineal sino también, la aplicación de un espacio subterráneo que implica desde la conformación de una caverna, para llegar a conseguir amplios perímetros subyacentes que puedan ser transitables dentro de lo que podría comprenderse como urbanístico y espacios subterrestres.

Juanca (1997), la mina más antigua conocida en el mundo se localiza en el cerro de Bomvu, en Swazilandia y data del año 40.000 a.C., y se presume que la

minería habría tenido su inicio en la era de los metales. La técnica de aplicación de fuego juntamente con agua, habría sido implementada en las primeras galerías mineras como el método utilizado por excelencia, consistente en inducir un incendio en la parte frontal de la excavación, para posteriormente sofocarlo rápidamente con agua fría y con esto las rocas se resquebrajaban consiguiéndose así la excavación. (Junca Ubierna, 1997)

Varios han sido los motivos que han llevado a múltiples civilizaciones a realizar excavaciones y túneles. En el antiguo Egipto, así como en las culturas orientales en el siglo X a.C. los túneles fueron una de las mayores obras que trascendieron en los tempranos trabajos de ingeniería hidráulica, puesto que la facilidad que les proporcionaba la presencia de ríos como en el caso de Egipto con el Nilo, facilitaba el uso del empuje de agua para abastecimiento y captación con motivos agrícolas y distribución de este factor en pueblos. En el caso del antiguo imperio romano, fueron aplicados mecanismos de ingeniería en construcción dirigidos a diseñar túneles para generar sistemas de alcantarillado o drenajes de lagos provenientes de volcanes; además, ciertos túneles eran utilizados con propósitos militares o de mausoleos.

Como afirma Junca (1997), para conseguir una conexión entre el mar Atlántico y Mediterráneo, los franceses trabajaron incansablemente para construir canales fluviales, lo cual significó el inicio de la era de los túneles en aquella región. Este túnel llamado "Canal de Midi" tenía una longitud de 155 metros, 6,5 metros de altura y 8 metros de ancho; su pionero, Jean Babtiste Colbert empleó la pólvora para realizar las perforaciones. (Junca Ubierna, 1997)

La práctica adquirida con la construcción de túneles para canal reflejaría un gran valor en el periodo de la época de los ferrocarriles. Desarrollada a partir del siglo

XIX, los túneles tuvieron gran demanda implantando el desarrollo de maquinaria y avances en procedimientos constructivos.

En la historia se registra que en 1803 se inauguró el primer ferrocarril impulsado por caballos. El primer túnel de ferrocarril fue el de Terre Noir en Francia, impulsado por caballos construido en 1826. (Alonso, 2002)

Como mayor evidencia durante el periodo de la revolución industrial, la máquina de vapor y los ferrocarriles como la generación eléctrica marco un hito muy importante en la construcción de túneles con raíles de hierro se extendió al transporte de mercadería y viajeros. La máquina a combustión interna, incremento al desarrollo de carreteras y por lo tanto a la demanda de numerosos túneles para tránsito.

3.2 HISTORIA DE LA METODOLOGÍA CONSTRUCTIVA EN TÚNELES

El número de túneles construidos hasta la actualidad es incalculable, así como la evolución en las técnicas, metodología y elementos constructivos que han alcanzado continuamente en su eficiencia. Varios de los métodos antiguos son usados en la actualidad, como una opción más práctica para enfrentar aquellas dificultades insalvables que con las técnicas de la nueva era no sea posible trabajar en ciertos tipos de terrenos irregulares. Los sistemas utilizados hasta la actualidad como inglés, belga, alemán y austriaco.

En las diferentes secuencias de excavación, se encuentran diversos métodos que pueden ser de gran utilidad en casos extremos, como, por ejemplo:

El Método Inglés: Su nombre es debido a las múltiples construcciones de túneles realizadas en suelos de Inglaterra, como son las arcillas y areniscas. Su principal característica es realizar el proceso de la perforación a sección completa del

túnel, en una sola operación; todo es siguiendo el ejemplo señalado en la construcción del primer túnel bajo el Támesis.

El Método Belga: En 1828, fue construido el túnel de Charleroi, el cual conecta a Bruselas con Charleroi; sus principios son utilizados por millones de constructores como un notable modelo.

El Método Alemán: Este método fue usado por primera vez para construir el túnel en el Canal de San Quintín durante el año 1803, la técnica fue desarrollada por Wiebeking en 1814. Dicho método conlleva un sistema de núcleo central, el cual además es empleado en la construcción de las amplias bóvedas de cerveza de Baviera.

El Método Alemán Modificado: Este tipo de técnica es aplicable en casos específicos; surge por la necesidad de que durante la operación de perforación del túnel, se deba pasar a través de un terreno bastante firme y la presencia de agua imposibilite la utilización del Método Clásico Alemán en cuanto a las etapas sucesivas de ataque del frente. (Galleria di Base del Brennero - Brenner Basistunnel BBT, 2020)

El Método Austriaco: Es una técnica cuya implementación austriaca presentó el uso de puntales de madera formando un sistema de entibación; esta táctica fue aplicada en las minas de Friburgo por primera vez de la mano de Meisner en la construcción del túnel de Oberau, en el ferrocarril entre Leipzig y Dresden, en Sajonia en el año 1837. (Alonso, 2002)

3.3 EVOLUCIÓN EN OPERACIONES DE LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES

En materia de construcción de obras subterráneas, se puede afirmar que han sido grandes los alcances que se han generado gracias a las diversas técnicas mejoradas, empleadas para facilitar la extracción de tierra y la construcción de este tipo de obras de ingeniería. Sin embargo, aunque las técnicas puedan ser similares

en varias naciones, la evolución en las operaciones de la construcción de túneles, depende de diversos factores como el económico.

Los ejemplos de los túneles desarrollados a lo largo del tiempo han cambiado el desarrollo de los métodos de excavación bruscamente. El paso del tiempo y el avance tecnológico que se da día a día en el mundo han impulsado a mejorar e innovar las técnicas de construcción de manera radical, esto se ha facilitado también debido al estudio de métodos antiguos corrigiendo fallas e implementando opciones que faciliten el trabajo y optimicen el tiempo de construcción.

Los métodos de construcción de túneles han ido evolucionando comenzando con la perforación neumática y dinamita, perforación manual y pólvora negra, mecanización de la maquinaria, hasta terminar en lo que hoy en día se utiliza comúnmente que son las tuneladoras mecánicas.

Asimismo, muchas de las acciones que se ejecutan en la edificación de túneles han ido mejorando y evolucionando como son los sistemas de acarreo y transporte, alumbrado, ventilación, entre otros.

Tabla 2: Métodos de Perforaciones

MÉTODO ACTIVIDAD	PERFORACIÓN MANUAL Y PÓLVORA	PERFORACIÓN NEUMÁTICA Y DINAMITA	MECANIZACIÓN DE MAQUINARIA	TUNELAD ORAS MECÁNICA S
SISTEMA DE TRANSPORTE	Carretillas, mulas, caballos.	Carretillas, mulas, caballos.	Trenes activados por aire comprimido, baterías eléctricas o motores a diésel.	Banda transporta dora continua
ALUMBRA DO	Antorchas	Lámparas de acetileno	Lámparas de acetileno.	Lámparas eléctricas de larga duración.
VENTILAC IÓN	Inexistente	Inexistente	Escape de aire por locomotoras	Ventilación moderna

Múltiples han sido las mejoras que han resultado de la aplicación de diversos mecanismos en todos los otros aspectos de las obras de construcción. De forma particular se puede mencionar a los tipos de soportes llamados "provisionales", como en el caso del entibado cuyo material de madera pasó a ser de acero; otro de los aspectos considerados como cambios son el desarrollo de pernos y anclaje hasta pretensados y mallas de varios tipos, la implementación de hormigón proyectado, de las dovelas de hormigón armado y en ciertas ocasiones el uso de hierro fundido para la fabricación de tuneladoras y estructuras más complejas como cerchas maleables que facilitan importantes convergencias.

Para Pialarissi (2009), la construcción de túneles de autopistas pasó de ser considerada una simple excavación de hoyos en el suelo al diseño de mecanismos más complejos, desarrollados con sistemas de alumbrado, comunicación, alarmas, ventilación señalética, vías de escape, entre otros mecanismos que reflejan el arduo trabajo que conlleva el diseño y construcción de estas obras. (Pialarissi Cavalaro, 2009)

La consecuencia es que en un túnel de ferrocarril o de autopista la parte electromecánica tiende a aumentar continuamente respecto a la de ingeniería civil y eso especialmente en relación con los costos. Es de esperarse que la evolución de todos estos mecanismos continúe brindando más facilidades y optimización de los métodos constructivos.

4. DESCRIPCIÓN DE PASOS CONSTRUCTIVOS DE TÚNELES

Son múltiples los factores que intervienen para la resolución de dificultades en la ejecución de planes de edificación de túneles; dichos factores pueden ser: la forma del terreno, su firmeza y de la posible presencia de fuerzas hídricas. Las excavaciones

en la tierra podrán ser factibles de acuerdo con la naturaleza del suelo, así entonces las excavaciones podrán hacerse de mayor o menor diámetro. Cuando existe una buena calidad en los macizos rocosos, la excavación subterránea puede prosperar en su totalidad, inclusive en el caso de bóvedas con vanos mayores de 20 m. En los terrenos que carecen de firmeza terrestre, como por ejemplo los suelos arenosos, gravas, rocas trituradas, es imprescindible iniciar con la excavación mediante una galería básica de 4 o 5 m² e ir apuntalando conforme el avance de la obra. En aquellos suelos compuestos por arenas finas rebosadas de agua a presión, arcillas o superficies con gran fuerza de agua, la tendencia apunta al uso de procedimientos específicos con un progreso muy lento y a su vez, costoso.

Finalmente, los equipos utilizados para el avance de la obra, dependen además del tipo de terreno, el rendimiento esperado en el avance de la excavación subterránea. Este último viene determinado por consideraciones económicas y prácticas. Actualmente se realizan estudios en superficies de tierra, de manera anticipada a la perforación de un túnel, para así poder determinar cuáles podrían ser las posibles complicaciones que se pueda encontrar en el proceso de construcción y preparación del terreno, etc. (Soto, 2014). Destacamos los descritos a continuación ya que son los más efectivos a la hora de desarrollar un túnel.

4.1 ESTUDIOS PRELIMINARES

Para definir cómo empezar a construir una excavación subterránea es necesario todo tipo de información como datos geológicos anteriores, sondeos y túneles de reconocimiento para relacionarlos y analizar los métodos más efectivos. Una geología que nos permita conocer el comportamiento del presente y futuro del suelo que se alterara al excavarlo.

4.1.1 HISTORIAL ESTUDIO GEOLÓGICO

La información geológica de mapas e informes publicados se podrá recopilar como un historial que facilitará los procesos de planificación y edificación de obras. Con este tipo de información será posible que dicha planificación contemple los posibles depósitos aluviales, así como los tipos de piedra que se podrían hallar durante la excavación. Otro de los factores a determinar puede ser el hallazgo de fallas y otros accidentes geológicos que será de suma importancia estudiar detenidamente.

En adición, los informes detallarán si existe alguna posible presencia de cauces de agua subterránea; los reportes de datos que registren perforaciones anteriores, así como profundas cimentaciones, cenagales, galerías anteriores, minas y canteras, e inclusive la inspección de acantilados, lechos de ríos y cualquier otro tipo de excavación, serán de suma importancia para la definición de la factibilidad de una nueva construcción de túnel. Todos estos antecedentes son de carácter general y pueden ser insuficientes en determinadas zonas, por lo que se deben complementar con rastreos y galerías de reconocimiento con la recopilación de datos podremos detallar la litología de tipos de suelos encontrados para saber cómo y con qué metodología se podría excavar un túnel, en el caso de la ciudad de Quito después de una investigación de suelos se pudo determinar la litología descrita en la siguiente imagen.

Tabla 3: Litología de la ciudad de Quito

Tomado de: Memoria Técnica Metro de Quito (2012)

Unidad geotécnica (síntesis)		Descripción litológica general
R	Rellenos antrópicos	Limo arcillo-arenoso con fragmentos de ladrillos, bolsas, madera, plásticos, etc.
Tur	Depósitos lacustres	Turbas
Fl-Ca	Depósitos la carolina. Palustre-lacustre y aluvial	Cenizas, arcillas, limos y caídas de pómez
Cl	Cangahua limo-arcillosa	Limos y arcillas arenosos
Ca	Cangahua areno-limosa	Arenas limosas
Co	Cangahua coluvial	Arenas y gravas con algo de limos
C _{Tb}	Cangahua no alterada	Tobas
Tu	Unidad fluvio-lacustre el pintado	Tu: turbas, paleosuelos y tobas presencia de materia orgánica
CH B, A, a	Unidad fluvio-lacustre el pintado	Ch: arenas y arcillas verdes y cenizas b, a, a: brechas, arcillas y areniscas presencia de materia orgánica
Ce	Unidad volcanosedimentaria guamaní. Cenizas y oleadas piroclásticas	Ce: cenizas, limos y arcillas con gravas y bloques
Py	Unidad volcanosedimentaria guamaní. Flujo piroclástico block and ash.	Py: arenas gruesas grises no consolidadas con gravas y bloques de dacita
Fl	Unidad de basamento. Flujos de lodo (lahares)	Flujos de lodo con gravas y bloques con cierto grado de cementación
Ae	Unidad de basamento. Avalanchas de escombros	Bloques de andesita en matriz limo-arenosa de baja compactación
Bv	Unidad de basamento. Brechas volcánicas soldadas	Brechas rojizas asociadas a flujos de lava
VB	Unidad de basamento. Andesitas	Roca andesítica afanítica

4.1.2 SONDEOS

La excavación con barrenos es el procedimiento más utilizado por razones de variabilidad, prontitud y ahorro. El diámetro de los agujeros varía de 100 a 400 mm. y la depresión puede predominar considerablemente los 100 m (Herrera Herbert & Castilla Gómez, 2012). Se hace el orificio por métodos de choque, alzando y dejando desplomar la pieza adecuada según el tipo de zona terrenal, o haciendo tornear por medio de un taladro de diamante o un barrenador. Se entiba con tubos de acero que bajan por el boquete. Si bien la broca fragmenta la roca, ésta se puede identificar. Las muestras inalteradas requieren de la aplicación de una broca anular con la que se extrae un núcleo.

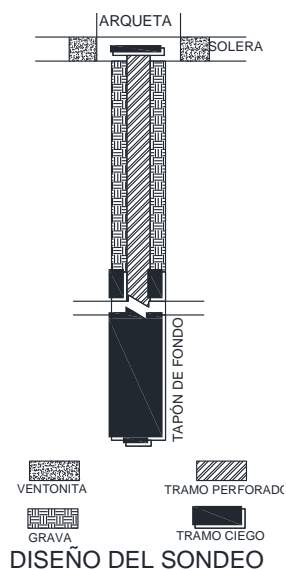


Figura 1: Esquema de perforación de sondeo

Tomado de: Oliveira J. A. (2013)

Los rastreos pueden aportar con información sobre la constitución de las diferentes capas, su firmeza y su grado de humedad. No obstante, cualquiera de los métodos usados, fragmentos excavados se extraen y se examinan en la superficie. Al momento en el que esto se consigue, deben sellarse prontamente para frenar cualquier cambio en el nivel de infiltración precedentemente de su arribo al recinto, en donde se obtendrán la mayor cantidad de las características necesarias para nuestros fines. (Oliveira, 2013)

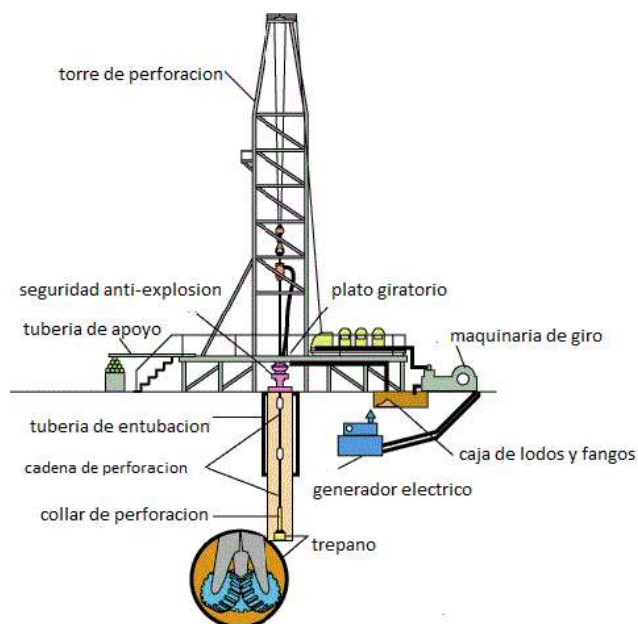


Figura 2: Esquema de una perforadora para sondeos geológicos

Tomado de: Oliveira J. A. (2013)

En terrenos permeables los pozos de sondeo no deben situarse encima del eje de túnel, aunque eso sea lo ideal para obtener información exacta, para Alonso E. (2002), quien menciona *ya que se pueden crear zonas de drenaje en las que el agua satura el terreno, lo que dificultaría enormemente la excavación del túnel en su momento.*

Los pozos de sondeo tienen la ventaja de que se pueden diseñar para su posterior utilización, bien durante la construcción del propio túnel con la finalidad de multiplicar los frentes de excavación o como tiros de ventilación provisionales o definitivos.

4.1.3. TÚNELES DE RECONOCIMIENTO

Para Alfredo Saavedra (2014), en su página de Constructores Mineros, menciona que los túneles de reconocimiento son un método por medio del cual es posible obtener la mayor cantidad de información real que permitirá determinar los

mecanismos necesarios para la construcción del túnel. Se perfora con barrenas a partir de las entradas del túnel; pueden implicar la orientación del eje como oquedad y a continuación ampliado o pueden ir en una orientación paralela y trecho conveniente para posterior utilización como corredor de servicios como conducto de vaciado o de ventilación, en terrenos rocosos son muy ventajosos para establecer el procedimiento de arranque más beneficioso de acuerdo con la dureza de la piedra, predecir la rapidez de progreso y la conducta de la roca.



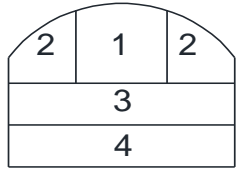
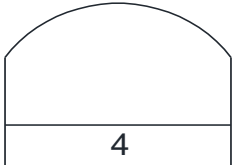




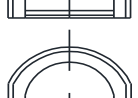
Figura 3: Perforaciones laterales de reconocimiento de suelos

Tomado de: Saavedra L. (2014) CODELCO

4.2. MÉTODOS DE PERFORACIÓN

De acuerdo a la forma del terreno, será posible empezar con los trabajos de excavación del túnel en secciones mayores o menores. El terreno determinara el ataque a sección completa de grandes avances y dimensiones, no obstante, los suelos movedizos como arenas o gravas, sólo admitirán el avance por medio de secciones cortas. Entre estos extremos existen otros tipos de terrenos en los cuales la perforación se puede realizar por varios métodos que a continuación se describen.

Tabla 4: Métodos de Perforación
Tomado de: Castanedo F. J. (2017)

MÉTODO DE ATAQUE A PLENA SECCIÓN O MÉTODO INGLÉS	MÉTODO DE LA GALERÍA EN CLAVE O MÉTODO BELGA	MÉTODO DE LAS TRES GALERÍAS O MÉTODO ALEMÁN	NUEVO MÉTODO AUSTRIACO (NMA)
<p>Suele utilizarse para túneles de pequeña sección (menos de 15 m²), o en muy buen terreno en secciones mayores y por supuesto en roca. Una solución para terrenos de inferior calidad es utilizar el ataque a plena sección pero con varios escalones de ataque. La excavación se realiza por franjas horizontales comenzando por la de la bóveda, con el inconveniente de que la evacuación del material requiere varias actuaciones hasta llegar al nivel donde se instala el sistema de transporte al exterior.</p>  <p>En su fase 1, con una galería central de sección pequeña y fácil de controlar, de unos 3 m² y una longitud de 3-4 m. La excavación se entiba con puntales y tablonos o con placas metálicas. Una vez asegurada la fase 1, se puede ampliar la excavación hacia los laterales.</p>  <p>En la fase 2. Este proceso es más rápido al atacar los laterales. Posteriormente se excavan en franjas horizontales.</p>  <p>En las fases 3 y 4. Una vez se ha excavado la sección completa del túnel, se procede al revestimiento, comenzando por la solera o contra-bóveda.</p>  	<p>Método más utilizado, tiene la característica de ejecutar primero la excavación de la bóveda (es lo que se llama avance en bóveda), incluido el sostenimiento que descansa directamente sobre el terreno, pues de esta manera se protege la obra por encima. Después se realiza la excavación de la parte inferior llamada destroza, comenzando por la zona central y siguiendo, en cortos tramos alternativos, por los hastiales, que una vez excavados se revisten de esta manera no se compromete la seguridad de la bóveda que descansa siempre sobre la destroza no excavada o sobre los pilares ya construidos, se termina por la construcción de la solera.</p> <p>Las fases serían las siguientes:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Excavación de la bóveda. Realmente se inicia con una galería de avance, entibada en la zona de clave, que va unos metros por delante de la bóveda, y desde la que se ensancha la excavación de esa zona. Esta excavación va unida a la debida entibación. 2. Colocación elementos estructural y hormigonado de la bóveda. Con inyección o gunita del trasdós para rellenar huecos y asegurar de filtración el contacto terreno-hormigón. 3. Excavación y entibación de hastiales por bataches. Previa excavación en destroza se perfila los hastiales para colocación de elementos estructurales. 4. Hormigonado de hastiales por bataches. Hormigonado de hastiales con su recubrimiento definitivo. 5. Excavación de Destroza y hormigonado de la contra bóveda. 6. Seguir en secuencia todos los pasos ya mencionados.      	<p>Se caracteriza por la conservación de la destroza hasta la finalización del sostenimiento de la bóveda y los hastiales. Se utiliza en secciones superiores a los 50 m². Se excavan dos galerías en la base y a derecha e izquierda del eje; se ensanchan y se construyen los hastiales. Más atrás se ataca una galería de coronación que a continuación se ensancha hasta construir la bóveda que descansa sobre los hastiales. Por último se excava la destroza, y si es necesario se excava y se reviste la solera.</p> <p>El sistema parecido al método belga, pero cambiando el orden las fases de ejecución y la propia ejecución de la bóveda.</p> <p>El procedimiento inicia la excavación con dos galerías de avance, fase 1 y 2 y se hormigonan los hastiales</p>  <p>Después se excava las fases 3 y 4, se procede al recubrimiento de la bóveda</p>  <p>Por último se excava la parte central, fase 5, con el fin de facilitar la entibación y el apuntalamiento de la parte superior.</p> 	<p>Cuando se empezó a aplicar el método austriaco, se vio pronto que no es un sistema sino una metodología de construcción que persigue un objetivo básico de ser el propio elemento resistente, para lo cual hay que alterarla lo menos posible, y su capacidad debe ser mejorada mediante la utilización de elementos de sostenimiento con aplicaciones sucesivas en función de las deformaciones que se vayan observando durante la construcción.</p> <p>El bulón trabaja unido al mortero, a la cercha o a ambos, como elementos de una estructura resistente añadida al anillo rocoso, para crearle o aumentarle una capacidad de auto sostenimiento en función de una deformación controlada.</p> <p>Ideas fundamentales del NMA:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Obligar al terreno a colaborar en su propia estabilidad, reduciendo al máximo la pérdida de sus características iniciales. - Permitir una cierta deformación controlada, con objeto de disminuir las necesidades de sostenimiento. - En terrenos con fuertes convergencias, la puesta en obra del sostenimiento debe ir orientada hacia la consecución de una rigidez progresiva. - En túneles urbanos con poca cobertura en los que no se pueden tolerar convergencias que ocasionarían asientos en la superficie, la tecnología del NMA sigue siendo aplicable, pero buscando la máxima rigidez en el menor plazo posible. - El NMA tiene la ventaja de su fácil adaptación a condiciones de terreno cambiantes o inciertas pues permite, si el terreno así lo aconseja, variar el sostenimiento sin mayores dificultades. - Por lo que respecta a las fases de excavación suele atacarse en sección dividida (media sección superior y destroza), aunque en terrenos de baja calidad, con convergencias importantes, la distancia entre ambos frentes debe reducirse al máximo, buscando en el menor plazo posible una sección lo más cercana a la circular. 

4.3 OPERACIONES DE LA CONSTRUCCIÓN



Figura 4: Descripción Gráfica de Métodos manuales

Tomado de: Martí J. V., et al (2012)

De acuerdo con Martí, Yepes, González & Alcalá (2012), Las cuatro operaciones básicas se deben tomar en cuanto al momento de plantearse la construcción de un sistema de túnel son: el arranque, la carga, el transporte y el revestimiento. (Martí, Yepes, González, & Alcalá, 2012)

El trabajo es obligatoriamente repetitivo en secciones de entre 3 a 15 m² debido a que el espacio disponible es escaso. Una vez seleccionado el sistema de construcción es muy complicado cambiarlo de darse el caso de que surjan accidentes, por lo que el procedimiento se torna riesgoso.

En caso de que surgiera una elección errónea de sistema, es posible modificar de forma parcial el ciclo en secciones medianas de 15 a 50 m².

En las secciones grandes, mayores de 50 m², la posibilidad de situaciones críticas es menor, sin embargo, por medidas de seguridad en el sostenimiento o debido a la gran dimensión de los equipos que se utilizan, la construcción se lleva a cabo en varias etapas, lo que genera una problemática de las secciones medias.

4.3.1. EL ARRANQUE

La excavación se puede realizar por tres métodos que son manual, con cartuchos y mecanizado dependiendo de la facilidad que se va dando en la excavación, se describirán los métodos más efectivos utilizados y evolucionados.

4.3.1.1. MÉTODO MANUAL

Este método usa herramientas neumáticas, con potencia ligera o media dependientes de los requerimientos, tienen picos para perfilar o romper según sea la dureza del terreno. Se utilizan para secciones pequeñas a medianas.

4.3.1.2. MÉTODO CON EXPLOSIVOS

Si el terreno a perforar es rocoso, se usa este método, ya que se adapta a cualquier tipo de dureza. Perforaciones y excavaciones con explosivos derivan en secuencias explosivas, los pasos para el proceso son:

- 1) Si se perfora de frente, a profundidad estándar, según el plan de voladura.
- 2) Uso del equipo perforador, colocación y retiro.
- 3) Se cargan los explosivos.
- 4) Despeje del personal.
- 5) Ciclo de detonación de las cargas.
- 6) Aireación de humo, polvo y vapores.
- 7) Reacomodar las rocas sueltas.
- 8) Entibación provisional.
- 9) Inyección de revestimiento.

10) Topografía.

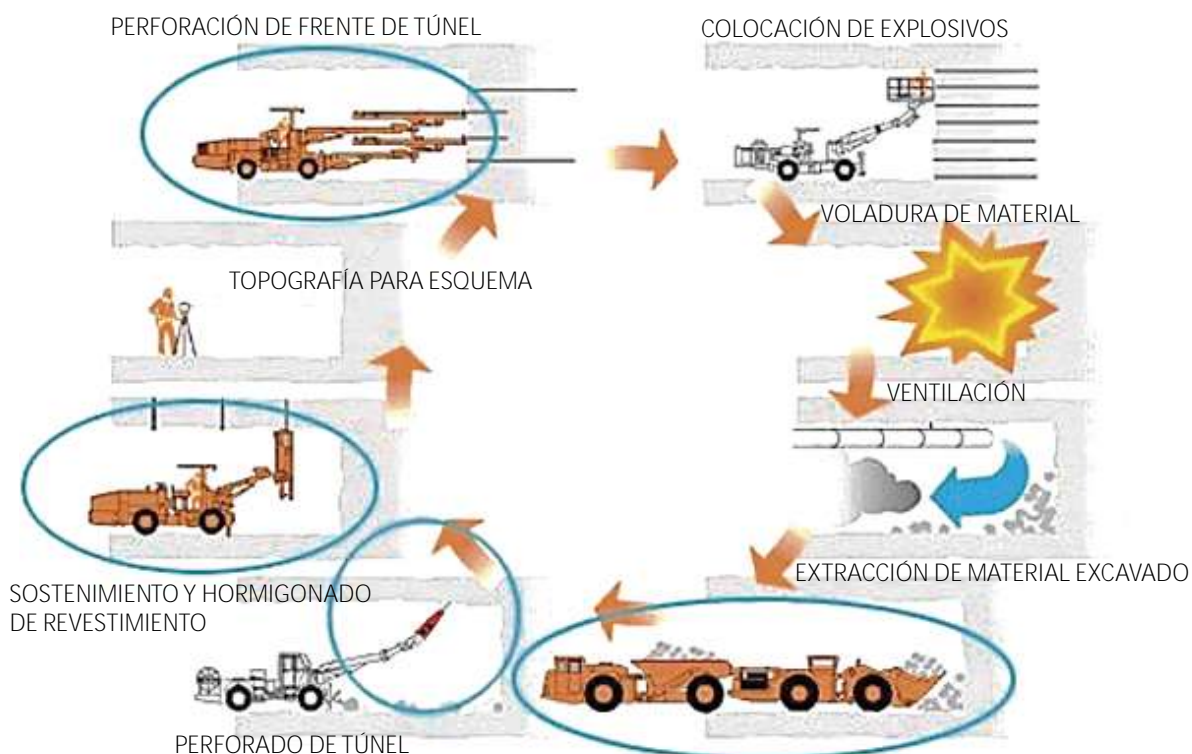


Figura 5: Ciclo Constructivo de Túneles

Tomado de: Soto S. (2014)

En el frente se utilizan perforadoras neumáticas con movimiento a aire o a presión o percusión, de rotación o combinación de ambas; El plan de voladura es el que mide las cantidades de explosivos (Soto Saavedra, 2014). En las imágenes se encuentran representadas el taladro cargado de explosivo y la numeración son ejemplos de secuencia de explosión, la detonación es eléctrica.

MÉTODOS DE EXCAVACIÓN MEDIANTE PERFORACIÓN Y VOLADURA

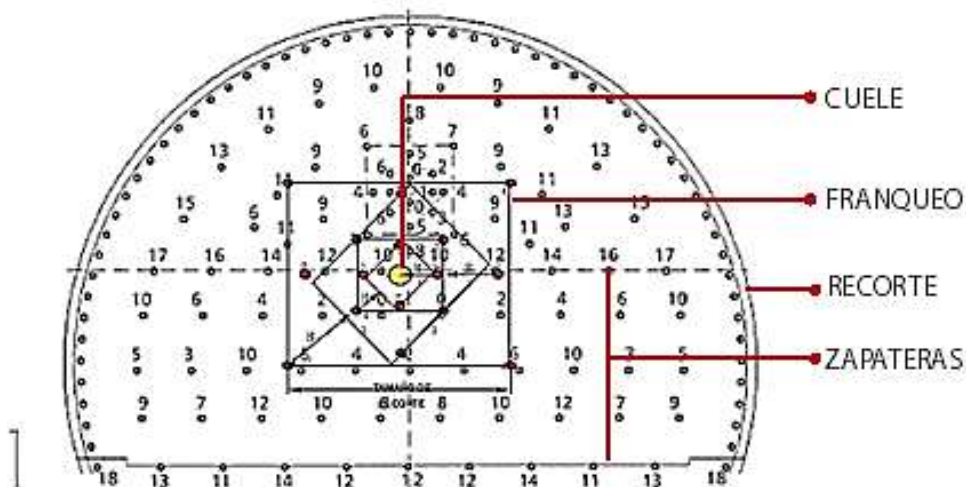


Figura 6: Esquema de disparo o malla de perforación frente completo

Tomado de: Bernaola J., et al. (2013)

Ejemplo de plan de voladura:

- La colocación del cuele debe ser central en el esquema de tiro es lo que primero se explosiona, para facilitar el resto del material. El taladro central de tener un mayor diámetro, que no se carga con explosivo, usado solo para desfogue.
- Después del cuele viene el franqueo posterior que destruye y despega la mayoría de las rocas.
- En la parte central y en los lados inferiores de la sección, debe colocarse las zapateras.
- La última fase de la pega es el recorte, en esta fase se recorta el terreno circundante. (Bernaola Alonso, Castilla Gómez, & Herrera Herbert, 2013)

Esta última fase adquiere hoy en día una mayor importancia debido a la utilización del Nuevo Método Austriaco (NMA), por ello, se debe cuidar no lastimar la

roca durante la voladura, pues dicho método se basa en la propia auto resistencia del terreno.

4.3.1.3. MÉTODOS MECANIZADOS

Es el método más desarrollados en la actualidad por su eficiencia en tiempo, seguridad y economía, utilizar maquinaria avanzada y evolucionada en tecnología mejoro todas las técnicas de obras civiles en túneles, clasificándolas en convencionales, las rozadoras y tuneladoras para todo tipo de suelos.

- **Máquinas convencionales:** Usados en terrenos de roca blanda, y en secciones medias, se llaman tractores (bulldozer) dotados de ripper, del otro modelo son para terrenos más hostiles son las palas cargadoras. Otras de gálibo o brazos cortos, para cavar espacios largos.



Figura 7: Bulldozer dotado de rippers

Tomado de: Huatai (2018)

- **Rozadoras:** Sirve para excavar con de un brazo articulado y dispone de herramientas de corte de metal duro llamadas picas destruyendo las rocas, su brazo hace reacción al motor de corte en balance a su peso.

Sirven también como máquinas de recogidas de escombros combinadas con excavadoras,

cargadas sobre llantas para su transporte. (Grupo Acciona, 2016)

Las rozadoras presentan importantes ventajas frente a otros sistemas mecanizados, debido a su facilidad en terrenos de mucho perfil o rocosas.

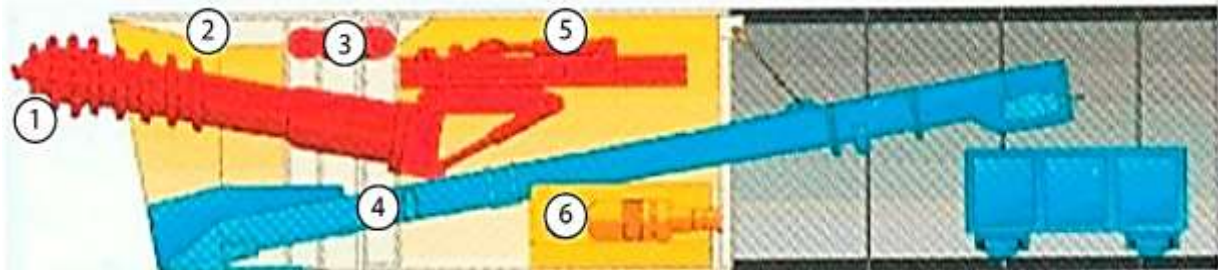


Figura 8: Esquema de partes de una rozadora

Tomado de: López C. (2014)

- 1) Rozadora.
 - 2) Escudo.
 - 3) Cilindros de mando.
 - 4) Cinta transportadora.
 - 5) Tubo de la máquina.
 - 6) Grupo hidráulico.
- **Tuneladoras:** Son excavadoras mediante la acción directa de herramientas de corte. *Vienen compuestas con el revestimiento para el ciclo de la inyección, a través de la implementación de la máquina desde atrás* (Junca Ubierna, 1997).
Se dividen en dos tipos:

- 1) **Tuneladora tipo tbm (tunnel boring machine):** Los suelos en los que se usan son duros a blandos, las excavaciones se realizan desde el frente de la sección usando rotación y empuje para la distribución de los cortes.



Figura 9: Rueda de Corte Maquina TBM

Tomado de: Metro de Quito (2018)

Las cabezas giran para la excavación en corte y destrozan de manera efectiva las rocas, retirándolas al mismo tiempo, las tuneladoras rinden con gran ventaja a los otros métodos de excavación, también hay desventajas cuando se trata de perfiles de terrenos con mucha humedad, pues su longitud, limita el radio de las curvas, por ello no se podría realizar un buen corte. Si se trata de pendientes, las condiciones pueden ser óptimas para su uso

- 2) **Los escudos o de roca:** Cortes de excavaciones de roca con mucha dureza, el escudo sirve para dar un área estable y segura contra el colapso de bóveda y hastiales.



Figura 10: Tuneladora de escudo doble Proyecto los Cóndores

El uso de esta maquinaria con escudos logra un empuje longitudinal para los anillos del revestimiento, usando gatos hidráulicos situados alrededor de la periferia de la parte trasera. Lo cual es necesario para obtener el ancho requerido en los anillos.

Como criterio general puede decirse que un escudo de determinado radio puede admitir radios del trazado iguales o menores a 80 veces el suyo propio.

4.3.2. EL TRANSPORTE

El sistema de transporte se define como uno de las principales operaciones en la construcción de túneles, estos son responsables del movimiento de material desescombro producto del proceso de avance. La normalidad y eficiencia involucra el rendimiento y progreso de la mayoría de los movimientos de excavación, el sistema de transporte se encarga de definir las zonas de carga y el destino de acuerdo a la clasificación y tonelaje conocida como escombreras. La interacción sincronizada es la clave para su debida operación ya que involucra en todos los procesos de realizar un

túnel, es importante mencionar los métodos más utilizados en la operación de túneles subterráneos

- **Palas rápidas:** El estricto gálibo son palas cargadoras utilizadas a grandes velocidades para el funcionamiento de transporte a largas distancias y al mismo tiempo, *“con capacidades de cuchara de 6 hasta 11 m³ y velocidades de hasta 50 km/h”* (Junca Ubierna, 1997)

Por ello, las palas de este tipo sirven para la aplicación en túneles de hasta 700 m. Para los proyectos grandes de capacidades de hasta 1500 m.



Figura 11: Pala de carga rápida

Tomado de: Huatai (2018)

- **El transporte sobre la vía:** Para los tramos pequeños y medianos, es útil esta opción. Para esto, la tracción es de eléctrica o gasóleo. Para esto, su uso debe ser en elevaciones de no más del 3%, variante hasta el 7% si las distancias son pequeñas.

“Como tal la carga y el transporte tienen un peso importante en todo el proceso de la excavación del túnel a menos que el método de socavación se con explosivos” (Soto Saavedra, 2014). Como tal el cambio de vagones es un proceso importante para elección en los proyectos de construcción de túneles.

- **Transportes realizados en caminos:** Para esto los vehículos usados son pesados tipo dumper, los cuales tienen rapidez en la carga y una buena



Figura 12: Dumper Cargadora

Tomado de: Huatai (2018)

maniobrabilidad de control.

Para este modelo de herramienta, hay varios otros tipos que son adaptables a las secciones y a los requerimientos del terreno.

4.3.3. REVESTIMIENTO

Una vez excavada la sección de túnel, con el correspondiente sostenimiento, y *estabilizadas* se necesita realizar un revestimiento teórico, ya que se sabe que las condiciones geomecánicas del suelo empeoran con el paso del tiempo en el entorno de la cavidad ejecutada, produciéndose descompresiones lentas, llegada de humedad y agua. Hay que considerar que el sostenimiento se deteriora con el paso del tiempo.

Finalmente, razones funcionales y estéticas indican la conveniencia de disponer un revestimiento definitivo, que implica unas condiciones mucho más favorables de funcionamiento del túnel desde perspectivas tan importantes como son la ventilación, la seguridad frente al fuego, etc. Por otra parte, para el mantenimiento, es importante que se lo disminuya a través del revestimiento de hormigón, pues

sostiene y conserva el túnel con el paso del tiempo, generalmente esta conservación tiene altos costos.

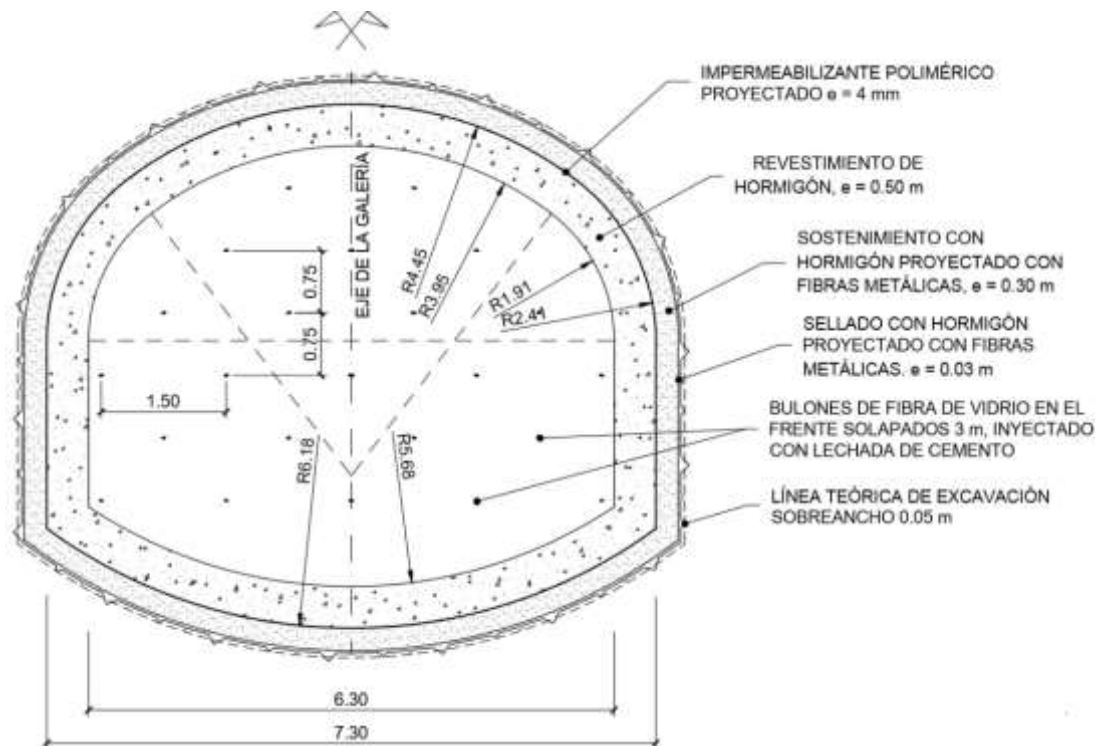


Figura 13: Revestimiento del Metro de Quito

Tomado de: Memoria Técnica Metro de Quito (2018)

Por ello, se coloca un revestimiento de hormigón en masa que puede ser prefabricados o proyectados en general suele tener un espesor mínimo de 30 cm por motivos de facilidad de ejecución con diferentes tipos de anclajes.

- **Bulones:** Es una forma de sostenimiento para construcciones temporales y definitivas. Los bulones que se usan son barras de acero de 25 a 33 mm. de diámetro y de 3 a 4,5 m. de longitud, su funcionalidad es converger los estratos

de la sección excavada a manera de una cueva con forma natural del terreno. Por efectos de la adherencia del mortero, los bulones se anclan.

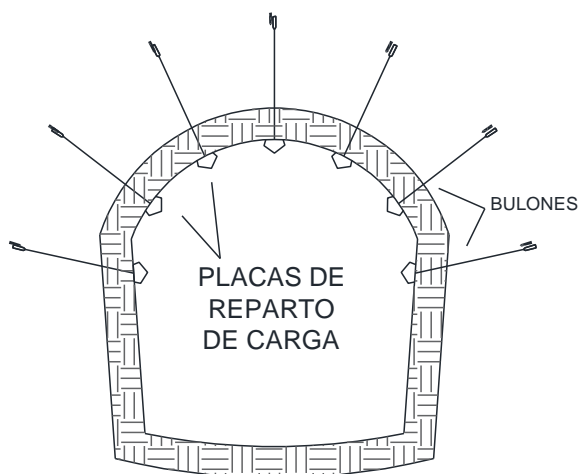


Figura 14: Bulonado Provisional

El bulonado usado en forma provisional son en su mayoría, los de agua, que son tubos de metal con paredes que se van deformando igual que el taladro, en el momento de la presión por la inyección del agua, lo cual es utilizado para terrenos poco estables, si existiera un bulonado previo, se dificulta el fraguado de morteros, así mismo, se usan los bulones de fibra el provisional en paredes inestables, se fabrican con plásticos fibrosos los cuales derivan en un simple armado que engrana perfectamente con la excavación.

- **Cerchas:** Llamadas así por ser viguetas de acero con sección en H y en la sección transversal tiene curvas, en un túnel se puede usar hasta tres cerchas, dos en los cobertizos y una en la bóveda o cueva, de esta manera se cubren todas las secciones. En los casos en que hay roca no compactada o suelta se pueden añadir tabloneros provisionales, así mismo, planchas de acero entre las rocas.

CERCHAS NORMALES

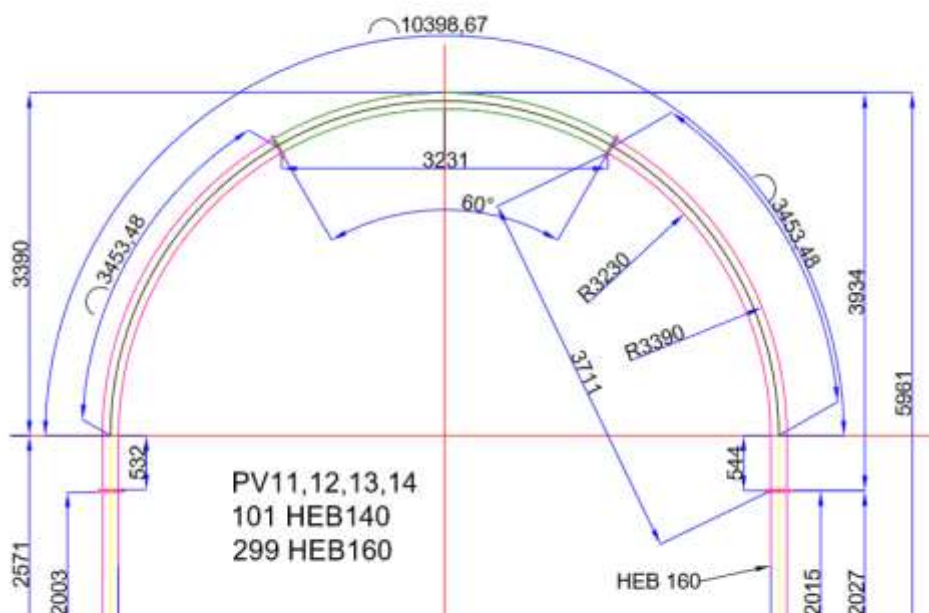


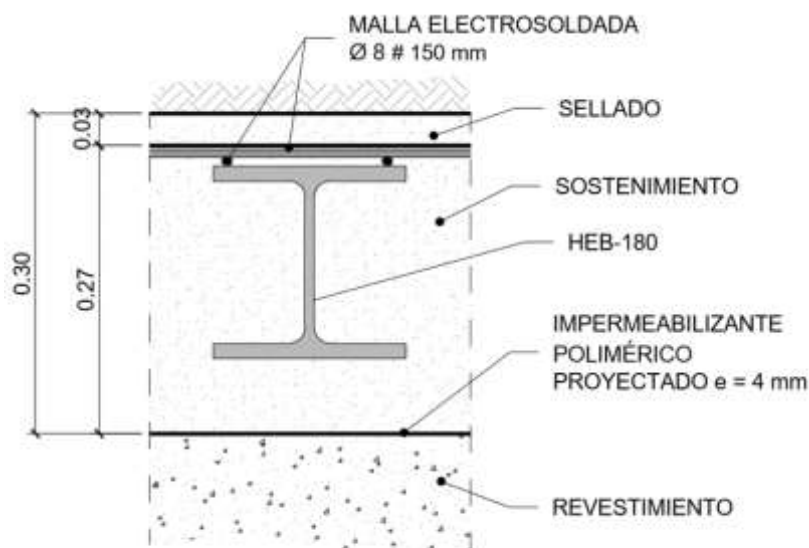
Figura 15: Cerchas Normales

Tomado de: Memoria Técnica Metro de Quito (2018)



Figura 16: Galera Montada en galería Método Austriaco

Tomado de: Memoria Técnica Metro de Quito (2018)



DETALLE DE SOSTENIMIENTO

Figura 17: Sostenimiento Cerchas

Tomado de: Memoria Técnica Metro de Quito (2018)

- **Tipo Hormigón proyectado:** Se usa en el sostenimiento del terreno durante la excavación, este método se combina con bulones, cerchas y a veces se usa mallas metálicas. Este tipo de hormigón se usa luego de que varias décadas se usara el mortero que es la mezcla de cemento, agua y arena, creando una especie de anillos que sostiene y protegen la roca suelta, igual si son susceptibles de meteorización rápida. El hormigón proyectado en la actualidad es una combinación de áridos. con aditivos que se emplean para la aceleración del fraguado.



Figura 18: Proyección de Gunita sobre un axial del túnel

Tomado de: Gunitas del Pirineo (2019)

En la imagen anterior se observa la forma como el árido, el agua y el cemento, se mezclan en distintos procesos. Se usa una manguera para dispersar la mezcla, el dispositivo de disparo tiene niveles de velocidad, de esta manera se asegura la mezcla fuertemente contra la roca. *“Con el hormigón proyectado se pueden obtener con rapidez espesores de 10 a 15 cm”* (Soto Saavedra, 2014), La anterior información se obtuvo de varios proveedores de este tipo de herramientas.

- **Pre anillos de hormigón**

- a. **Método Bernold**, usados sobre chapa desplegada, se las llaman también, acuchilladas. El encofrado es hormigonado, usando cerchas metálicas y placas acuchilladas quedando estas adheridas al hormigón, logrando un sostenimiento efectivo, así mismo la protección del encofrado contra la caída de piedras no adheridas y usado como arnés del hormigón que va por dentro.



Figura 19: Montaje de chapa desplegada en túnel de Galicia

Tomado de: Bulteck (2019)

b. Método de roca preserrado: consiste en forma anillos como sostenimiento provisional, por el propio terreno se puede encofrar y hormigonar por proyecciones. A través de sierras mecánicas, se fabrica un anillo de aproximadamente 15 y 20 cm de profundidad y 50 cm de ancho. Las dovelas sucesivas pueden reemplazar el anillo provisional y logra que en terrenos inestables la cueva queda abierta en el tiempo mínimo requerido.

Para las rocas duras se trata con explosivos y una parte de roca preserrada luego de las explosiones.

- **Método de las Dovelas:** Las dovelas son anillos de hormigón armado segmentado, logran un revestimiento que proveen de una estructura fuerte que sostiene la excavación, la inyección del hormigón se hace en trasdós,

significa entre el anillo y el terreno.

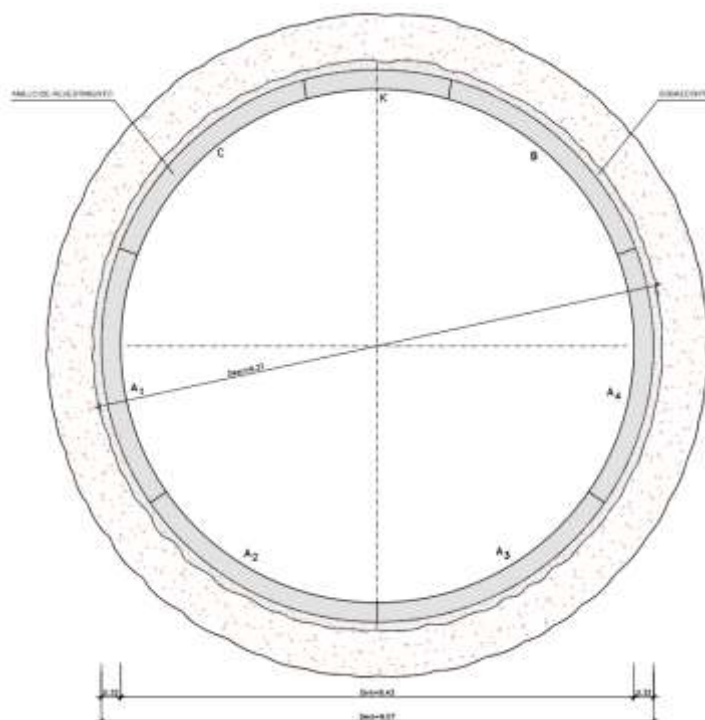


Figura 20: Esquema de dovelas utilizados en el túnel Metro de Quito

Tomado de: Memoria Técnica Metro de Quito (2018)

Tipos de dovelas:

- a) **Ordinarias inyectadas:** Se construyen con hormigón semiarmado, con llaves simples para su adhesión. La colocación es instantánea con el trasdós.
- b) **Expandidas:** Construidas en hormigón en masa, se colocan en forma de anillo y la dovela provoca una expansión que aumenta el diámetro hasta que se toquen con el terreno y con más trasdós inyectado.
- c) **Atornilladas:** Hechas con hormigón armado o de empleando acero fundición, el procedimiento es atornillarlos con el anillo previamente colocado. Se deriva en una excelente simetría del diámetro obtenido.

5. FACTORES GEOLÓGICOS Y DEFINICIÓN DE PATOLOGÍAS EN EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS DE TÚNELES

El comportamiento de las estructuras subterráneas durante su construcción y luego de su puesta en servicio depende de las condiciones geotécnicas del medio, diseño, procedimiento empleado en construcción, tipo y calidad de los materiales, acción del agua freática, del destino de la obra en la naturaleza de los materiales almacenados o transportados y de la edad de la obra.

El diagnóstico del estado de una obra subterránea terminada tiene características particulares que se derivan de tales factores. Así, la determinación de la integridad estructural se convierte en una tarea que reclama la colaboración de varias disciplinas de la ingeniería: geotecnia, ingeniería estructural y tecnología de los hormigones, como mínimo.

5.1. PROBLEMAS GEOLÓGICOS

Al momento de ejecutar un proyecto de túneles subterráneos, los requerimientos son los mínimos e importantes, ya que se pueden presentar diferentes problemas, factores a considerar es el conocimiento y estudio previo de las secciones que se atravesará para poder determinar zonas menos fragmentadas para el trazado y así proporcionar la información necesaria para el diseño. La selección de excavación y medición ayudan a determinar factores tales como:

- Descripción geológica de los materiales existentes.
- Localización de fallas, juntas y estratos.
- Identificar zonas menos fracturadas (zonas más adecuadas para la ejecución de túnel)
- Identificar zonas críticas.
- Propuestas de excavación, sostenimiento y procesos constructivos.

- Niveles freáticos y potenciales caudales o acuíferos.

Sin embargo, los estudios no determinan el 100% de su eficacia al momento de ejecutarlo por movimientos geológicos muy cambiantes de la naturaleza de los terrenos.

Para Martí J. V, et al. (2012), los problemas geotécnicos con mayor incidencia que se han presentado durante la excavación de túneles son los siguientes:

- *Presencia de material fracturado derivados de cuñas en trabajos tectónicos.*
- *Naturaleza complicada de la falla como calizas alteradas, granitos muy fracturados, rocas débiles sedimentarias, yesos con anhidritas.*
- *Heterogeneidad del material a excavar por la presencia de diques de falla como rocas de elevada dureza.*
- *Aumento de la alteración del material por la presencia de aguas de infiltración.*
- *Desmoronamiento o desprendimientos de material en pequeñas lascas en zonas secas y cizalladas que dan lugar a sobre excavaciones.*
- *Asentamientos en el sostenimiento del túnel, derivados de la movilización de rocas.*
- *Techos con sobre excavación o juntas de cizalla perpendiculares al trazado. (Martí, Yepes, González, & Alcalá, 2012)*

5.1.1 TÚNELES EN TERRENOS SALINOS Y EXPANSIVOS

El construir túneles en terrenos con rocas salinas, anhidritas y yesos, es un riesgo ya que los materiales que se utilizan tienen una evolución química que va a surgir en algún momento durante la vida útil del proyecto. Al realizar la perforación del túnel se generan nuevas condiciones que resultan en la modificación del equilibrio físico-químico de estos minerales. Estos cambios producidos pueden ser muy perjudiciales para la obra y hasta destructivos, debido a que se pueden presentar deformaciones de la geometría como una expansión o variación de propiedades mecánicas.

La anhidrita es un mineral de composición sulfato cálcico anhidro (CaSO_4) el cual combinado con el agua es el material denominado yeso ($\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$). Este proceso físico-químico se esquematiza. Como se indica, la reacción contempla la disolución y cristalización posterior.

Tabla 5: Tabla comparativa Anhidrita

	ANHIDRITA		AGUA		YESO
	1 mol	+	2mol	=	CaSO₄*2H₂O
	CaSO₄		H₂O		
G(g)	136.14		36.0		172.14
D(g/cm³)	2.95		1.0		2.32
V(cm³)	46.2		36.0		74.3
V (%)	100.0		77.9		160.8

Generalmente, los fenómenos que ocurren en el terreno que rodea el túnel son difíciles de controlar por la inestabilidad de este tipo de roca y su particular estructura que pueden variar con factores como la temperatura, tensión y humedad. Lo que podría llevar a una disolución y precipitación de estos minerales. *El período de reacción también es impredecible, lo que dificulta la detección del problema a tiempo* (Herrera Herbert & Castilla Gómez, 2012). Es por esto que es muy importante la decisión que se va tomar para la adaptación o estructuración de los hinchamientos.

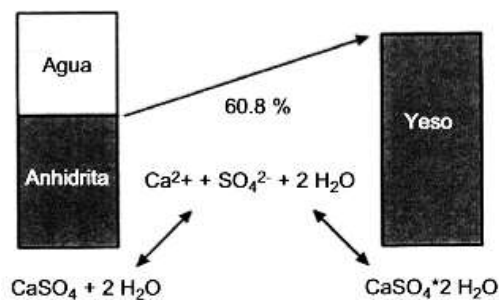


Figura 21: Proceso Químico de la Transformación de la Anhidrita

Tomado de: Soto P. (2019)

Al contrario de los túneles que se construyen en rocas y minerales, la mayoría de yesos y anhidritas se localizan en el transcurso del proyecto, varios autores coinciden que *al contacto con agua expanden 62% produciendo más patologías secuenciales* (Bernaola Alonso, Castilla Gómez, & Herrera Herbert, 2013). Estos terrenos son de tipo evolutivo, por lo que presentan problemas como:

- Disolución → (revestimiento)
- Efecto expansor
- El descaste y corrosión de los elementos que usan metal
- Las gunitas y hormigones cuando son violentados externamente
- La filtración y humedad que generan presiones constantes

Estos fenómenos afectan visiblemente al diseño y posible método de construcción del túnel, por lo que las limitaciones serían:

- Una condición importante es túneles hidráulicos deben estar herméticos.
- Estrategias de excavación sin uso del agua
- Los cementos a usarse deben ser anti sulfatos
- El revestimiento debe ser inmediato, se debe evitar perforaciones pues serán focos de humedad.

- No debería de usarse elementos metálicos, si entre los materiales hay cloruros como impermeabilizantes.

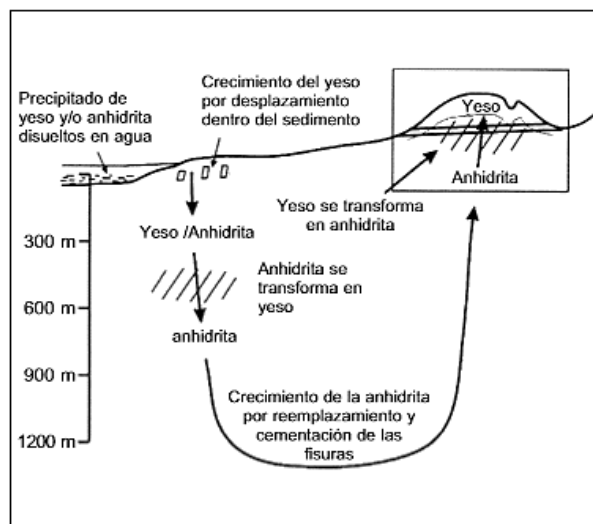


Figura 22: Ciclo del yeso-anhidrita-yeso

Tomado de: Murray M. (2006)

5.1.2 MOVIMIENTOS SÍSMICOS EN TÚNELES

Las estructuras que se encuentran bajo tierra tienen características geotécnicas muy diferentes a las que se encuentran en la superficie, por lo que las vuelven menos vulnerables a los movimientos sísmicos. El diseño de las estructuras subterráneas se priorizan las deformaciones presentes en el suelo de la estructura.

El tipo de diseño de estructuras subterráneas trata al túnel de manera independiente sin tomar en cuenta el suelo que lo rodea. Se realiza un estudio previo de las deformaciones del terreno en campo libre y después de diseña el túnel para acomodarse a estas condiciones. Este método es aconsejable en caso de que el túnel requiera ser más flexible que el terreno, sin embargo, de no ser el caso, sí se debe considerar la relación suelo-estructura ya que la rigidez del túnel puede afectar de manera grave las deformaciones del entorno.

Existen tres tipos de deformaciones que deben resistir los revestimientos de túneles para considerarse la seguridad sísmica de estos: axial, de curvatura y de ovalamiento. Las dos primeras son más comunes en túneles rectos y se presentan cuando las ondas sísmicas se propagan de manera oblicua o paralela a su eje. Ante este comportamiento el túnel responde al igual que una viga elástica dependiente de las deformaciones de su suelo.

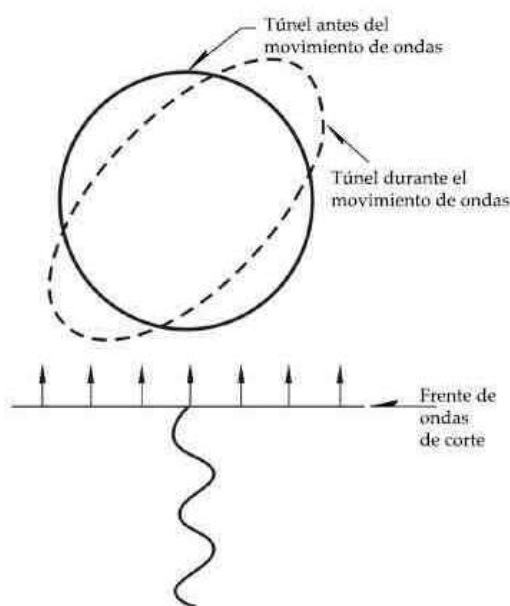


Figura 23: Deformaciones causadas por movimientos sísmicos

Tomado de: Soto P. (2019)

Los daños que este tipo de movimientos sísmicos pueden ocasionar son:

- Asentamientos de secciones.
- Fisuras de revestimiento.
- Filtración de agua.
- Movimiento de elementos estructurales.

5.1.3 NIVEL FREÁTICO Y CAMBIOS PERIÓDICOS DE HUMEDAD

Al realizar excavaciones debajo del nivel freático, existirá siempre el riesgo de que éstas se inunden o sean inestables. Estos riesgos deben ser obligatoriamente

evaluados antes de comenzar el proyecto. Además, existen otros posibles riesgos frecuentes que también deberían ser analizados para no tener inconvenientes durante el avance de la obra y considerar las consecuencias que éstos podrían provocar para poder tomar las medidas cautelares y de ser el caso, correctoras. *La humedad del túnel varía de acuerdo a diferentes factores como la presión hidrostática del agua o los movimientos de filtraciones que pueden ser naturales, mecánicas o químicas.* (Saavedra L., 2014)

Los problemas derivados de la influencia o presencia de agua en una falla son:

- Proceso al disminuir la resistencia del macizo y sus componentes.
- Elevadas presiones hidrostáticas en el entorno del sostenimiento que pueden dar lugar a roturas en el sostenimiento.
- Elevadas presiones de agua producidos por la proximidad del nivel freático contenido en un acuífero confinado que está atrapado en la roca de falla. Da lugar a taponazos de agua a presión.
- Deformaciones en las estructuras de arcilla.
- Pueden existir hendiduras en los materiales salinos.
- Conflictos para el desarrollo de la excavación.
- Flujo de mezclas de suelo y agua al interior de la excavación, inundación de la excavación.
- Pérdida de cohesión en juntas del macizo rellenas de agua.

- Si los suelos se llegan a saturar de agua, existirá asentamientos de las estructuras.

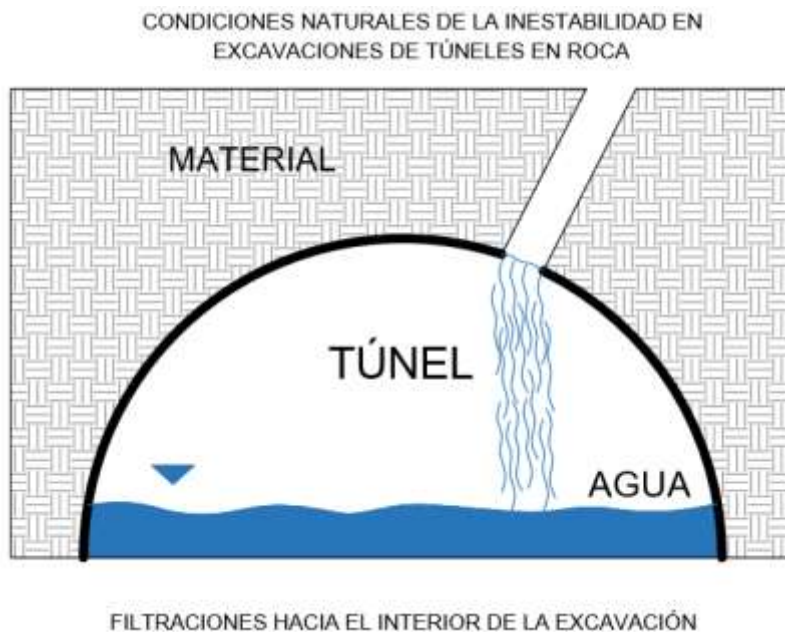


Figura 24: Condiciones Naturales de la Inestabilidad en Excavaciones de Túneles en Roca

Tomado de: Soto P. (2019)

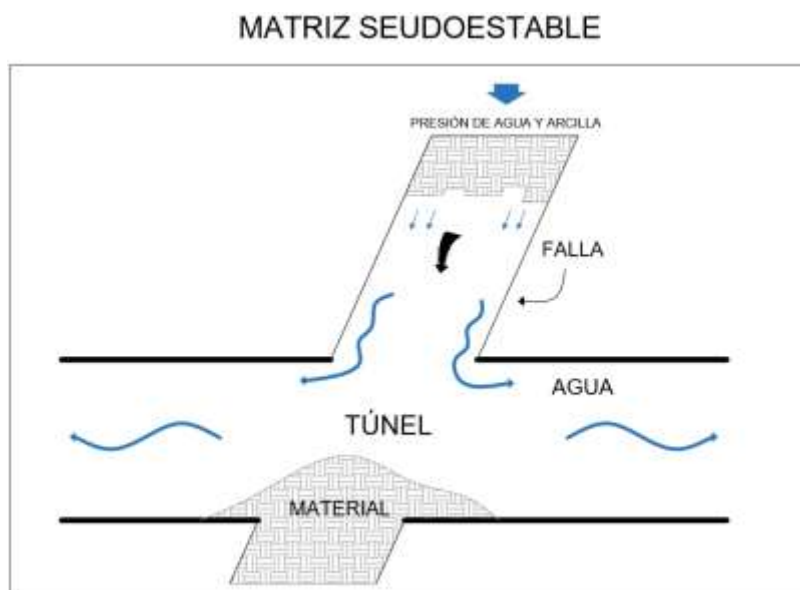


Figura 25: Matriz Seudoestable

Tomado de: Soto P. (2019)

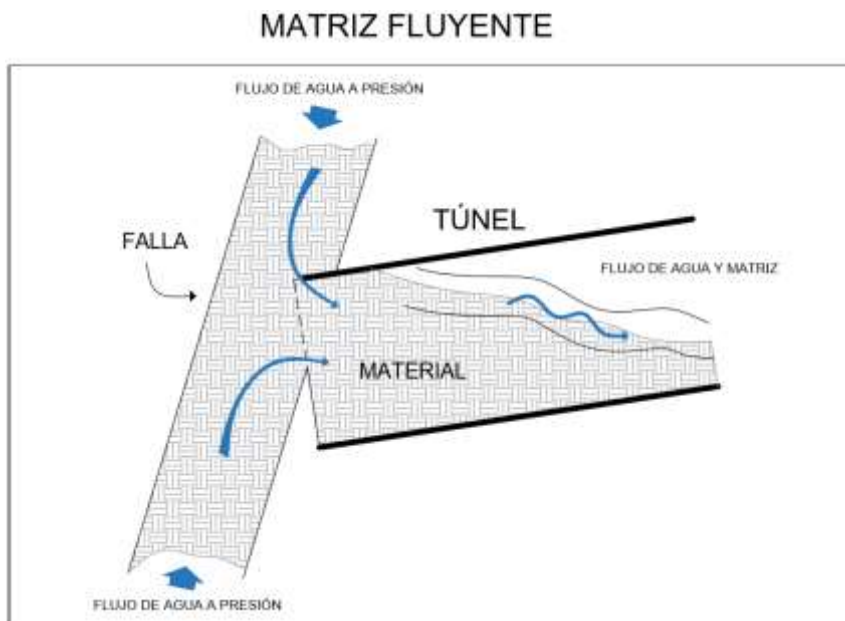


Figura 26: Problemas en el cruce de túnel en fallas

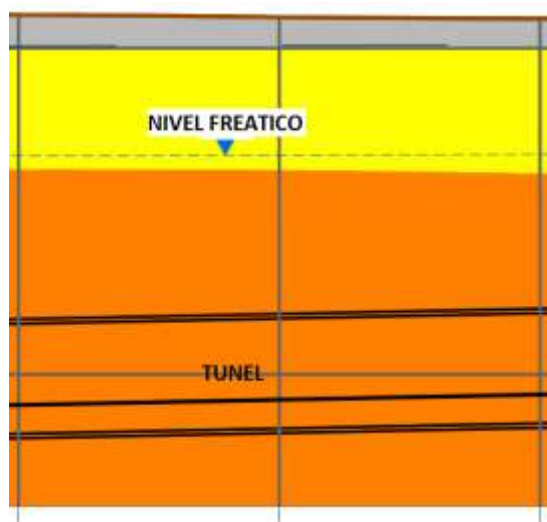


Figura 27: Sección de túnel por debajo del nivel freático

Tomado de: López C. (2014)

Los registros nos muestran que en la construcción de túneles, la mayoría de los problemas está directa o indirectamente relacionados con el agua. La parte de la ingeniería denominada como reconocimiento del proyecto y construcción debe ser una planificación muy bien estructurada, calculada y contar con prevención de las dificultades que se conoce, podría derivar del uso del agua. Las circunstancias

geológicas han generado polémica alrededor de su establecimiento por deberse a tantos factores climáticos, y variables de socavación. La interpretación e implementación de las recomendaciones del informe de reconocimiento, deben ser propuestas concretas y enfocadas a la estructuración del túnel a construir.

5.1.3.1 CONTROL DEL FLUJO DE AGUA EN UN TÚNEL

El drenaje en los túneles es muy importante de ser considerado desde el inicio de la construcción. Así coinciden varios autores, que son los datos que muestran la importancia de la filtración hacia túneles, tomando en cuenta claro está que en las redes viales y de ferrocarriles, como ejemplo la de Japón, no se manifiestan diferencias entre litologías (a excepción quizá de los terrenos volcánicos) lo cual permite a los expertos pronosticar que debido a la permeabilidad del suelo se producirán filtraciones futuras". (Bernaola Alonso, Castilla Gómez, & Herrera Herbert, 2013)

Según los expertos, la filtración tiende a disminuir con el tiempo, si se toma en cuenta que, como consecuencia de la disminución progresiva de los niveles piezométricos, esto ocurrirá de todas formas.

El incremento de los caudales de los ríos cercanos a las estructuras de los túneles, pueden estar asociadas al lavado de juntas y pérdida de finos alrededor de los túneles.

Tabla 6: Afectaciones de las excavaciones subterráneas

	Problemas derivados del uso del agua en las excavaciones.
--	--

	Inundación parcial o total de obras subterráneas	Pérdida de estabilidad	Aumento de humedad
Aspectos que guardan relación con las afectaciones que se producen en las excavaciones subterráneas.	<p>Depreciación de la elevación del nivel acuífero.</p> <p>Filtración de humedad meteórica y aluvial, está ligada a los factores:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Moderación de lluvia. • Coeficiente de filtración acuífera. • Consideraciones antrópicas y naturales de la superficie del terreno. • La profundidad del túnel en su ubicación. • Hidrografía de la zona del túnel. 	<p>Lavados de las hendeduras.</p> <p>Baja de la resistencia del macizo rocoso y roca aledaña.</p> <p>Desgaste de los materiales de las rocas.</p> <p>Baja en la tensión del macizo.</p>	<p>Aplicación de revestimiento inadecuado.</p> <p>Uso de técnicas de control acuíferas, que no son adaptables a los materiales de la estructura del túnel.</p>

5.1.3.2 CAÍDA DE RESISTENCIA POR AGUA SUBTERRÁNEA

En las perforaciones de un sustrato del terreno subterráneo la existencia de agua es un inconveniente, por los problemas continuos de deterioro del sistema de sostenimiento del túnel o galería, dichas aguas son en muchas ocasiones ácidas y por tanto con un potencial de corrosión y deterioro mucho mayor.

Las aguas ácidas provocan varias consecuencias como el *drenaje ácido de roca*. Para los investigadores como el Dr. Osvaldo Aduvire (2006): *Cuando las grandes cantidades de roca que contienen minerales sulfatados como la pirita y la arsenopirita son excavadas, los cuales reaccionan con el agua y el aire.* (Aduvire, 2006). Si el agua tiene un nivel previo de acidez, se produce la proliferación de una bacteria común llamada *Tiobacillus Ferroxidante*, ésta colabora con los procesos de oxidación y acidificación. La presencia de aguas ácidas es casi imposible que no se produzca, puesto que la pirita va siempre asociada al oro y al cobre.



Figura 28: Deterioro de revestimiento por aguas ácidas

Tomado de: Aduvire O. (2006)

Por tanto, la utilización de mallas metálicas o fibras de acero como elemento que le da ductilidad al hormigón, provoca a largo tiempo un problema de deterioro y

por consiguiente, la pérdida o caída de tenacidad en la gunita. Es por ello que se hace necesario el uso de materiales no ferrosos en la capa de hormigón de sostenimiento, que permitan mantener las propiedades resistentes del sostenimiento en el tiempo.

5.1.4 ASENTAMIENTOS

Cuando se realizan excavaciones de túneles con máquinas tuneladoras, se produce una fuerte presión de la tierra lo cual trae como consecuencia fallos geológicos y una sobre excavación que deberá ser tratada oportunamente mediante la técnica de inyección de diferentes materiales como bicomponente, hormigón, morteros o grava. En casos de túneles con mucha generación de agua también se emplean materiales impermeables.

Si esta sobre excavación no es controlada en su totalidad se produce un asentamiento ya sea de túnel o de la parte urbana como casas o edificios produciendo daños en el diseño estructural de elementos.

“Existen dos métodos que se utilizan para estimar aproximadamente los asentamientos durante la construcción de túneles. Especialmente cuando son construidos en áreas urbanas, para así determinar el nivel de afectación que tendrá la obra en las estructuras superficiales como casas o edificios. Éstos son los analíticos o teóricos que se basan en la observación de campo y los métodos numéricos.” (Saavedra L., 2014)

Para comprobar los asentamientos producidos por un túnel se realiza previamente estudios preliminares para poder determinar la gravedad del asentamiento en superficie.

Se ha comprobado que la profundidad de excavación del túnel es inversamente proporcional a los asentamientos. Es decir, a mayor profundidad, menor será la tasa de asentamientos. Sin embargo, al aumentar la longitud, se ve el incremento del área de incidencia.

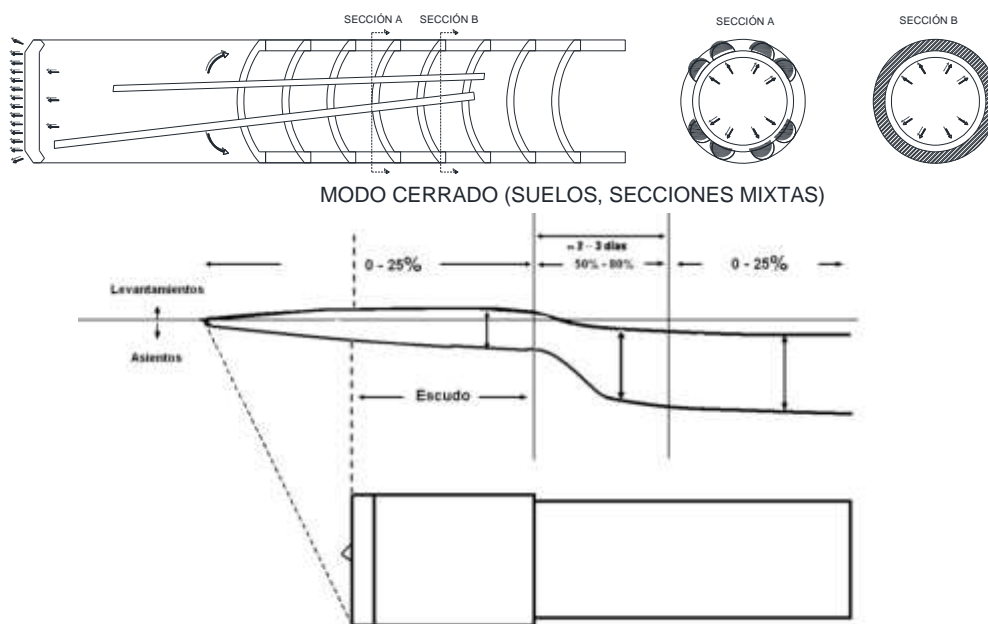


Figura 29: Esquema de asentamientos de túnel por geología

Dentro de los tres factores de incidencia pudimos notar que solo el diámetro y la profundidad de la clave presentaron notorias variaciones. Es así por lo cual se consideró el diámetro como la variable con mayor incidencia en el asentamiento.

5.1.5 FACTORES QUE AFECTAN A LA EFICACIA DE LOS SOSTENIMIENTOS

Según Alfredo Saavedra (2014), la eficacia estabilizadora del sostenimiento depende de varios factores como:

- El tiempo transcurrido desde la excavación hasta el momento en que comienza a interaccionar el sostenimiento colocado con el terreno circundante.
- La distancia al frente y la rapidez con la que se coloca.

- Los espesores y cuantías de los elementos constitutivos (hormigón proyectado, bulones, cerchas).
- La calidad de los materiales (resistencias iniciales, curva de endurecimiento del hormigón proyectado, bulones activos, bulones pasivos).
- En los túneles de sección grande, en rocas blandas y suelos, la estabilidad definitiva, únicamente se consigue, cuando el sostenimiento forma una estructura cerrada que aporte continuidad estructural transmitiendo y repartiendo adecuadamente los esfuerzos, principalmente, de compresión.
- Esta continuidad estructural del sostenimiento se consigue construyendo una contra bóveda provisional en la fase de avance y/o una contra bóveda definitiva en la fase final de la destroza.
- En túneles profundos en rocas blandas, en los que se generan importantes deformaciones (squeezing), el sostenimiento colocado tiene que ser lo suficientemente flexible para permitir importantes deformaciones iniciales a la vez que posterior sean suficientemente rígido para limitar estas a los valores máximos admisibles.

5.2 PRINCIPALES PATOLOGÍAS TÉCNICO CONSTRUCTIVAS

Es muy importante llegar a identificar las principales causas que producen unas patologías al realizar excavaciones de túneles durante el proceso y posterior a su vida útil para saber cómo tratarlo y darle el mantenimiento adecuado.

5.2.1 PROBLEMAS EN REVESTIMIENTO

Para poder garantizar una adecuada funcionalidad durante su vida útil y la estabilidad a corto y a largo plazo del terreno circundante del túnel se necesita de un

excelente refuerzo de revestimiento. El tipo de hormigón y fibra a escoger, terreno a excavar, niveles de agua, esfuerzos del terreno, etc., condicionará la calidad del revestimiento de un túnel. Por ello, es importante denominar las patologías más importantes para tomarlas en cuenta al realizar proyectos de túneles.

5.2.1.1 FISURAS O AGRIETAMIENTO DE REVESTIMIENTO DE TÚNEL

Las fisuras o agrietamiento de revestimientos son fracturas lineales causadas por tensiones que exceden la resistencia a tracción del hormigón. Pueden aparecer durante el curado (de retracción) o posteriormente por cargas externas (estructurales). Según la separación de sus labios pueden clasificarse de la forma siguiente:

- Menores: separación $< 0,8$ mm.
- Moderadas: separación entre $0,8$ y $3,2$ mm.
- Severas: separación $>3,2$ mm.



Figura 30: Detalle de grietas en hormigón

Tomado de: UMACON (2017)

5.2.1.2 FILTRACIONES

Las filtraciones se producen por el empuje de agua sobre en túnel. Pueden distinguirse las siguientes categorías según el caudal de flujo:

- Menores: la superficie del revestimiento esta húmeda pero no gotea.

- Moderadas: flujo menor de 30 gotas/minuto.
- Severas: flujo mayor de 30 gotas/minuto.



Figura 31: Filtraciones de dovelas en túnel Metro de Quito

Tomado de: Memoria Técnica Metro de Quito (2018)

5.2.1.3 DESCANTILLADURA

La depresión en el paramento de forma sensiblemente circular u ovalada; es la cicatriz resultante del despegue y caída de un trozo de hormigón. *La causa más frecuente es el aumento de volumen de las armaduras al corroerse que, a veces, quedan a la vista* (Martí, Yepes, González, & Alcalá, 2012). Pueden clasificarse como:

- Menores: profundidad < 12 mm; diámetro entre 75 y 150 mm.
- Moderadas: profundidad entre 12 y 25 mm; diámetro aproximado 150 mm.
- Severas: profundidad >25 mm; diámetro mayor de 150 mm.

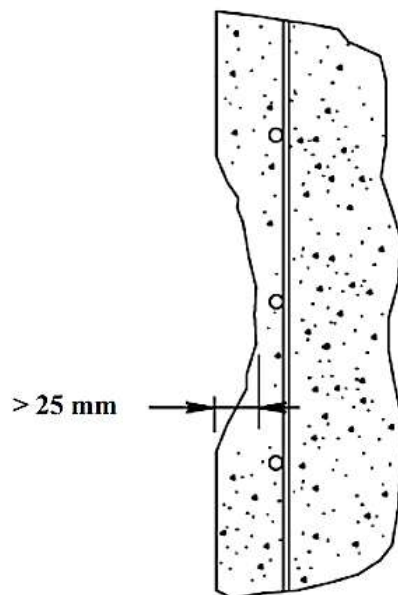


Figura 32: Detalle constructivo de descantillada de hormigón en revestimiento

5.2.1.4 FLORESCENCIA

Este desgaste se genera por el depósito de sales que se forma en la corteza; la sustancia emerge en suspensión del hormigón y precipita por evaporación.

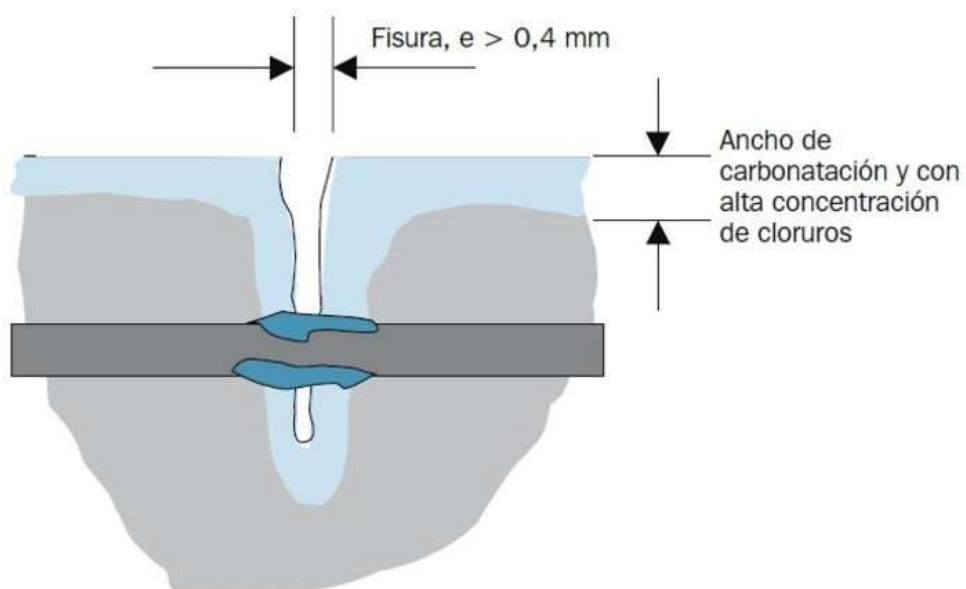


Figura 33: Esquema de eflorescencia de mineralización

Tomado de: López C. (2012)

5.2.1.5 DECOLORACIÓN

Se da por la formación de manchas en la superficie por la precipitación de sustancias disueltas, que traspasan el hormigón por grietas. Pueden tener diferentes colores; las marrones suelen indicar corrosión de las armaduras.



Figura 34: Decoloración de dovelas en túnel del Metro de Quito

Tomado de: Memoria Técnica Metro de Quito (2018)

6. TRATAMIENTOS DE TERRENO PREVENTIVOS Y SOLUCIONES A PATOLOGÍAS A LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES

Para que se logre estabilizar la excavación en el terreno es necesario utilizar los sostenimientos y tratamientos a priori para prevenir problemas en la ejecución. No obstante, existen casos en los cuales se deban aplicar técnicas diferentes dado a la calidad geológica del suelo. Estas técnicas son un refuerzo complementario y se las conoce comúnmente como “tratamientos especiales”.

A continuación, se describen los tratamientos especiales más frecuente utilizados en la mayoría de los túneles que se excavan.

6.1 TRATAMIENTOS DE TERRENO PREVIOS USADOS EN TÚNELES

Las inyecciones en los exteriores del túnel como método de tratamiento del terreno, se denominan “*paraguas*” de “*jet grouting*” así mismo desde su interior. En la actualidad los procedimientos de drenaje e inyección se combinan de varias fuentes de ingeniería, especialmente en suelos difíciles, considerados desde el propio túnel todo dependiendo de las condiciones y afectaciones a enfrentar en la región.

Para Alonso (2002), *es muy frecuente el uso de taladros de gran longitud en condiciones de dureza del suelo, tales perforaciones realizadas desde el frente, y por alrededor del terreno, logran una mejor simetría y ayuda al asentamiento de las rocas* (Alonso, 2002), de esta forma también se pueden localizar aguas subterráneas y permitir su drenaje inmediato y a corto plazo. Los clasificaremos en tratamientos por exterior e interior.

Los detalles más sobresalientes se describen a continuación:

6.1.1 TRATAMIENTOS DEL TERRENO POR INTERIOR DE TÚNEL

La mayoría de problemas en situaciones de excavación de los controla por el tratamiento del terreno dentro del túnel para garantizar su avance dependiendo del tipo del terreno y la inestabilidad se utilizan los siguientes:

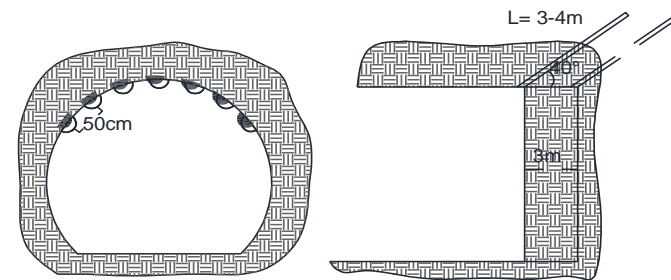
TRATAMIENTOS DEL TERRENO POR EL INTERIOR DEL TÚNEL

La mayoría de problemas en situaciones de excavación de los controla por el tratamiento del terreno dentro del túnel para garantizar su avance dependiendo del tipo del terreno y la inestabilidad se utilizan los siguientes:

ESTABILIZACIÓN DE CLAVE

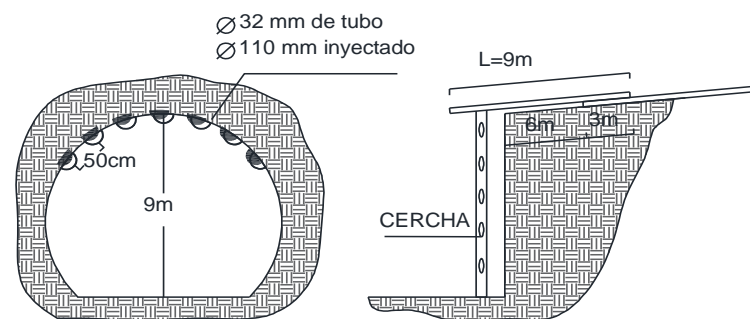
1. ENFILAJE O FOREPILING

El enfilaje se refiere al posicionar bulones que cosen por delante del frente las cuñas que puedan producirse en la zona de clave en avances posteriores. Estos bulones deben ser colocados en la parte alta del frente, inclinados unos 40° - 45° hacia adelante.



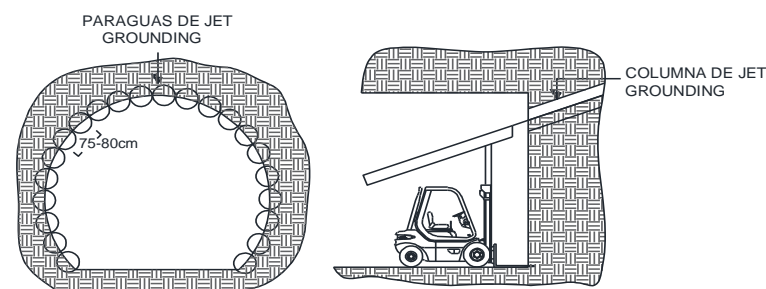
2. PARAGUAS DE MICROPILOTES

Se trata de la colocación de micro pilotes a modo de paraguas como su nombre lo indica en los extremos paralelos al túnel en toda la bóveda. Es necesario replicar este paraguas a manera de cerchas conforme va avanzando la excavación de esta manera actuará como viga. Cuando la zona a atravesar es muy amplia el solape mínimo entre cada uno deberá ser de 2 a 4 metros. Este sistema se utiliza cuando zona de roca está muy fracturada o con alto grado de alteración.



3. PARAGUAS O CORONA DE JET GROUNDING

El paraguas o corona de Jet Grounding se ve conformado por perforaciones inyectadas a presión, lo cual brinda una consolidación al suelo en una zona amplia que rodea el futuro perímetro del túnel. Son apropiados para atravesar zonas de material suelto o roca descompuesta.

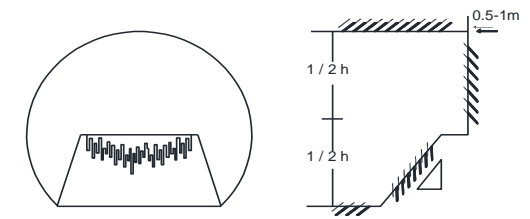


ESTABILIZACIÓN DEL FRENTE

1. MACHÓN CENTRAL

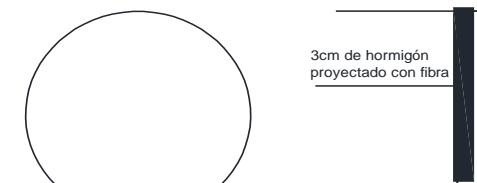
Se trata de dejar en el centro del túnel un contrafuerte o machón que pueda resistir los posibles empujes del terreno del frente, mediante la técnica de no excavar en su totalidad el frente.

Hay que tomar en cuenta que el contrafuerte o machón sirve como soporte para los empujes del frente. Y que no se escava en su totalidad.



2. GUTINADO O SELLADO DEL FRENTE

Consiste en prever la estabilización del túnel proyectando 3cm de espesor en el frente en caso de que se produzcan inestabilidades, con el fin de evitar rápidamente la alteración de la roca y al mismo tiempo reforzar el frente. Se realiza el sellado del frente con gunita con un espesor del concreto de 3 a 5 cm, lo cual evita el lavado de las juntas o arrastrar roca suelta. Se debe tomar en cuenta que el agua del frente deb estar bien drenada.



3. BULONES DE GRAN LONGITUD

En zonas de falla o geotécnicamente problemáticas, puede ser necesario aplicar bulones de gran longitud ($L=12$ m). Se cose el frente con bulonado de 9m de longitud aproximadamente. De preferencia estos deben ser de fibra de vidrio ya que son más fáciles de excavar.

y un bulón por m^2 .

Proporciona buena estabilidad del frente tanto en suelos como en rocas alteradas y fracturadas.

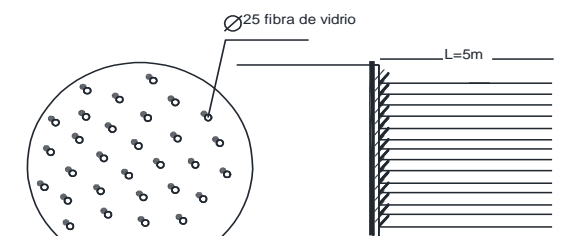


Figura 35: Tratamientos del Terreno por el Interior del Túnel

Tomado de: Castanedo F. J. (2017)

6.2. TRATAMIENTO DEL TERRENO POR EXTERIORES DE TÚNEL

Para reducir las consecuencias de subsidencia, asientos y desplazamientos horizontales, como parte de las estructuras aledañas al túnel, se realizan estrategias de prevención, protección o corrección como medida de mejora del terreno, técnicas basadas en estudios y registros de experiencias estructurales anteriores.

La subsidencia en la planificación de la obra, es la que puede determinar las futuras fases de una construcción de túnel. Entre los sistemas de protección que se tienen en cuenta en proyectos suelen ser los siguientes:

- Develamiento de conducciones empleadas en tuberías de gas, de abastecimiento de agua y colectores, para desvío y refuerzo provisional.
- Uso de barreras de protección para lograr disminución en la progresión de asientos, desplazamientos y distorsiones horizontales del terreno. Las barreras son de dos tipos:
 - Barreras rígidas mediante pilotes o muros-pantalla de hormigón armado o en masa
 - Barreras semirígidas mediante micropilotes o jet-grouting
- Tratamientos de consolidación en masa, mediante jet-grouting en general este tratamiento se ha aplicado en las zonas de cruce de quebradas en las que los espesores de relleno han superado los 10 m.
- Tratamiento de consolidación en masa, mediante jet-grouting (tapón de fondo) en general, este tratamiento se efectúa en el fondo de las excavaciones con objeto de mejorar, entre otros, los siguientes aspectos:

- Reducir la permeabilidad en el túnel, en las fases de construcción y explotación, lo que permite que los caudales de filtración puedan ser extraídos con bombas de dimensiones razonables
- Mejorar las características mecánicas del terreno, incrementando su resistencia o disminuyendo su deformabilidad.
- Actuar como un arriostramiento en la base de las pantallas, que permite disminuir la deformación de las mismas o Limitar los movimientos que se pueden originar en los edificios del entorno de los recintos excavados, por rebajamiento del nivel freático

El criterio general para la elección del tratamiento en cada caso presentado anteriormente, se puede describir:

- Disponer pantallas rígidas, combinadas o no con tratamientos de mejora del terreno, en el entorno de zonas muy singulares que requieran la máxima protección y que sea posible realizarlas por geometría.
- Pantallas semirrígidas combinadas o no con tratamientos de mejora del terreno, en el entorno de zonas singulares que requieren la máxima protección y no es posible realizar el caso anterior por geometría.
- Tratamientos en masa cuando se prevean zonas saturadas inestables de excavación en mina con métodos convencionales.
- Tratamientos cuando existan suelos flojos, con permeabilidad elevada y un nivel freático elevado, que genere caudales de filtración.

Estos criterios generales pueden tener excepciones en función de la naturaleza del terreno a tratar, de la magnitud de la subsidencia a mitigar, y de la simetría entre el túnel y el elemento considerado para protección, así mismo, la forma de las estructuras se conservan, los tratamientos que se describen a continuación:

- *Tratamientos de jet-grouting de consolidación, para reducir la permeabilidad del terreno en excavaciones bajo el nivel freático.* (Junca Ubierna, 1997)
- Tratamientos o actuaciones singulares en cruces de quebradas o con bajo recubrimiento, para prevenir riesgos de flotación o de socavación.
- *Tratamientos en el tramo de túnel en mina (enfilajes o paraguas, bulones de fibra en el frente combinado con drenajes)* (Junca Ubierna, 1997)
- Tratamientos en zonas de conexión pozo-galería-túnel.

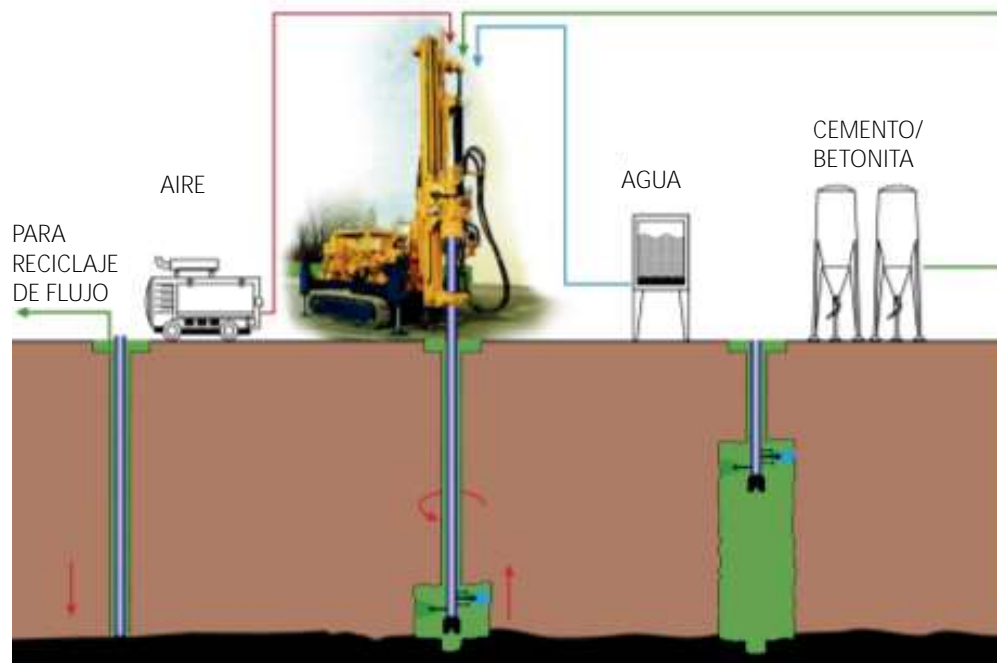


Figura 36: Esquema para Tratamientos en base a la naturaleza

Tomado de: Castanedo F. J. (2017)

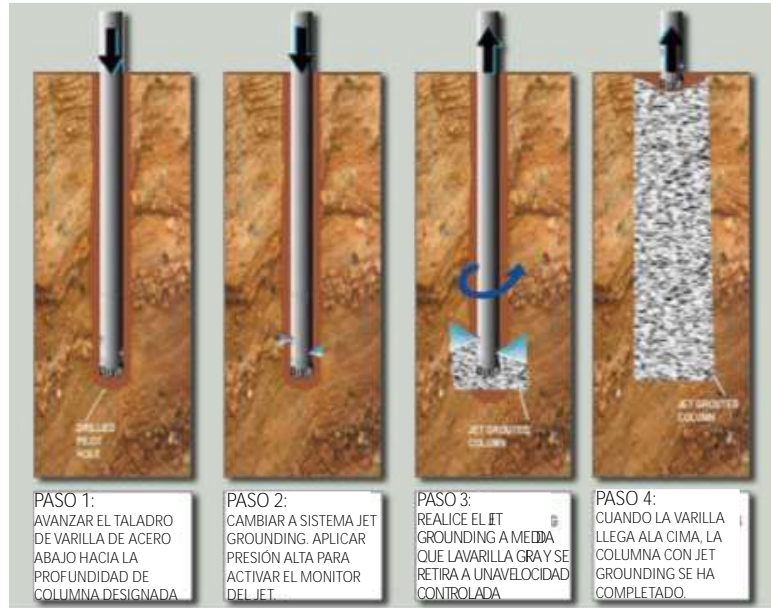


Figura 37: Esquema de perforación para tratamiento Jet – Grouting

Tomado de: Castanedo F. J. (2017)

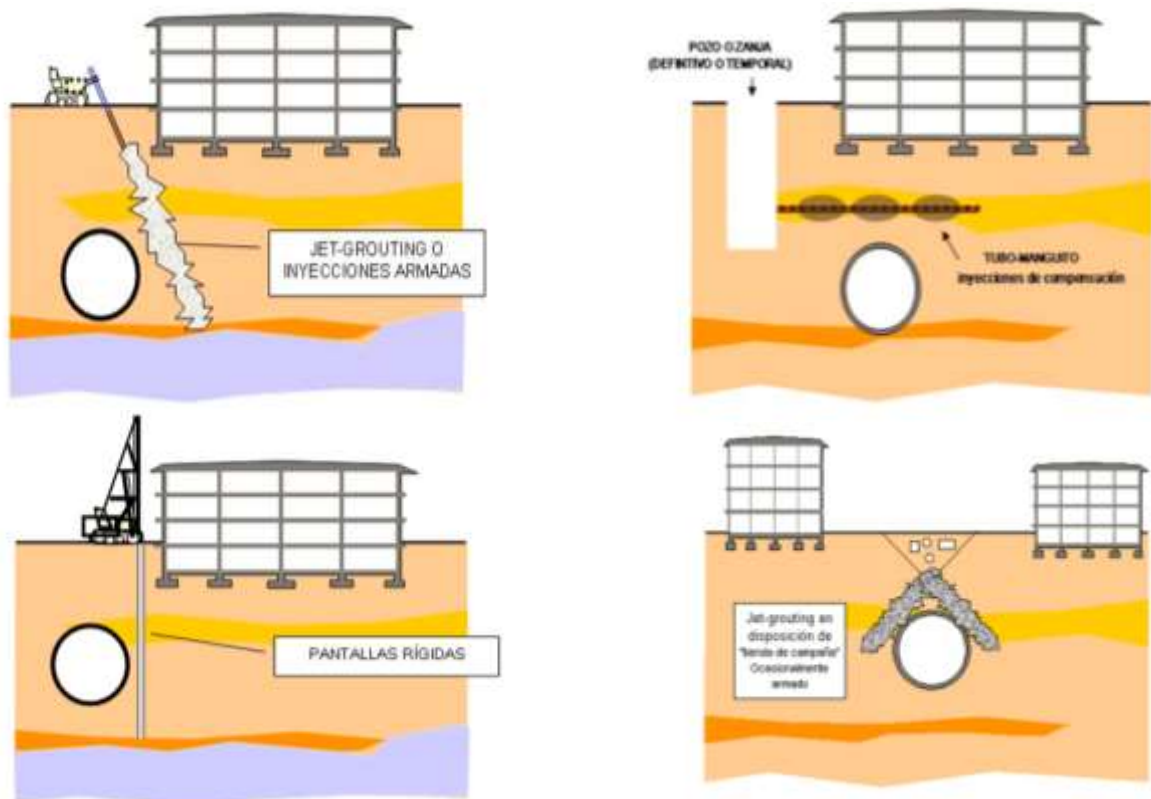


Figura 38: Esquema Tratamiento Jet – Grouting

Tomado de: Castanedo F. J. (2017)

6.3 TRATAMIENTOS PARA PATOLOGIAS TECNICO CONSTRUCTIVAS

Las patologías se han ido resolviendo según la evolución de experiencia extraída, pero existen factores geológicos en la naturaleza de mayor o menor gravedad no esperados durante la ejecución de un túnel.

6.3.1 TRATAMIENTO DE ZONAS DE ANHIDRITA

La experiencia al excavar estos túneles se ha determinado como fuente de información a corto plazo. Las dificultades se desarrollan con el paso del tiempo a mediano y largo plazo generalmente.

Se ha confirmado que la expansión del terreno se da todas formas, aunque se tenga un buen sostenimiento para evitarlas, sobre todo si se deja espacio adicional en la construcción y sus alrededores como medida de prevención.

De igual manera, al utilizar anclajes, se pierde carga y el revestimiento aguanta la presión de la expansión del terreno aledaño. En cuanto a los sostenimientos flexibles se deforman según los registros, debido a las filtraciones que no son atendidas con eficacia.

En el caso de revestimientos rígidos de hormigón armado y que tienen una contra bóveda son de las soluciones que han dado mejores resultados para la solución de zonas anhidritas. (Herrera Herbert & Castilla Gómez, 2012). Estos revestimientos están diseñados para soportar unas cargas notables adquiridas.

En general la planificación y diseño de secciones con capacidad de resistir el empuje de la anhidrita, según Soto P. (2014), son:

- Construcción de secciones circulares
- Procesos de implemento de contra-bóveda robusta.

- Para disminuir el empuje sobre los sostenimientos, se puede inducir un cierto nivel de hinchamiento del terreno.
- Implementación de un sostenimiento-revestimiento que este muy cercanos del frente de excavación.
- Poner canales alrededor para limitar la entrada de agua.

La principal ventaja del diseño de sostenimiento-revestimiento en su forma rígida, para la construcción de túneles en rocas sulfatadas, es el auto sellado inducido por el propio hinchamiento alrededor de la estructura.

Para permitir los hinchamientos en el terreno, los expertos del Manual de Diseño y Construcción de Túneles Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México, (2009), mencionan al respecto:

- El proceso es dejar zonas huecas debajo de la solera, a través de colocar gravas o materiales de poca densidad para que se compriman con el paso del tiempo. Se usa poco pues se registran problemas de deformaciones asimétricas, por ello no impide la entrada de fluidos, sino que la incrementa.
- El segundo proceso es Impedir cualquier hinchamiento a través de prestar resistencia a las presiones externas, para ello se refuerza la cueva con una contra bóveda circular. Al ser redondas los métodos de calculo son mejores, de esta manera su uso es mas amplio.

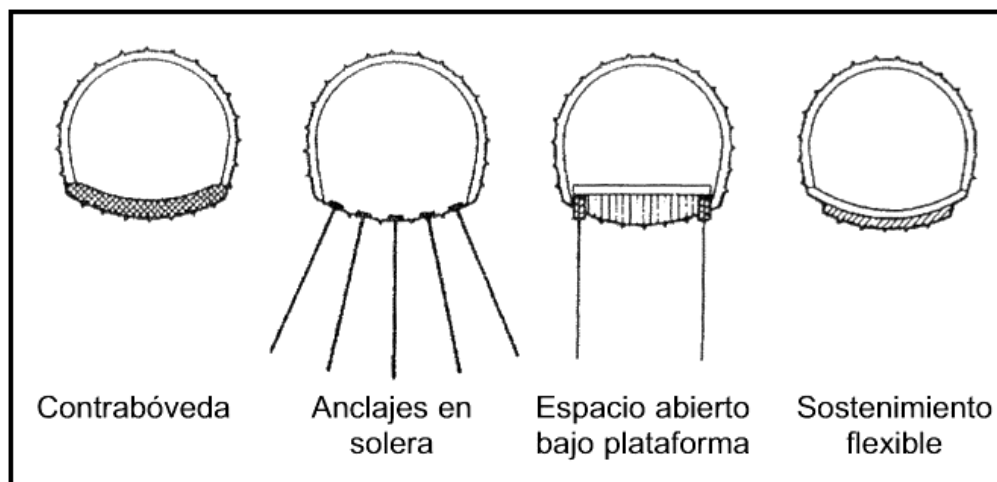


Figura 39: Soluciones Constructivas en Contra bóveda de túnel

Tomado de: Castanedo F. J. (2017)

En la figura anterior se puede observar el tratamiento que se da a construcciones de túneles que tienen incidencia de expansividad por anhidritas.

- *Contrabóveda gruesa aplicada, basada en hormigón rígido.*
- *Anclajes en solera.*
- *Aplicación de cámara de expansión libre, evitando la presión del revestimiento, el método es colocar un espacio abierto.*
- *Técnica del sostenimiento flexible.* (Saavedra L., 2014)

6.3.2 REPARACIÓN DE GRIETAS Y FILTRACIONES

Las grietas y filtraciones son el defecto más frecuente en los revestimientos de hormigón. Pueden comprometer la integridad estructural del túnel y/o permitir la filtración de agua que afecte negativamente al revestimiento, las instalaciones y la calidad del servicio.

6.3.2.1 SELLADO GRIETAS ESTRUCTURALES

Este método puede tener su origen en la retracción del hormigón o en deformaciones debidas a asentos o empujes del terreno. *Para recuperar el carácter de la estructura original, hay que rellenarlas con un material que restablezca la continuidad mecánica del hormigón* (De Rivaz, 2011)

Con este fin, se han desarrollado sistemas de inyección de epoxi rígido, utilizables en el caso de que la grieta este seca o simplemente húmeda. En caso de saturación deben usarse resinas de poliéster especiales.

La reparación se realiza de la siguiente forma:

- *Se extiende una pasta de gel sobre la superficie del túnel a lo largo de la grieta con objeto de sellarla e impedir que salga la inyección.*
- *Se realizan taladros de inyección sobre la grieta a una distancia igual al espesor del revestimiento, no superando nunca los 60 mm.*
- *Se homogeneizan los 2 componentes por separado utilizando una batidora eléctrica de baja velocidad, mezclándolos a continuación y batiéndolos hasta conseguir una pasta totalmente homogénea.*
- *A continuación, se procede a la inyección a presión constante, en sentido ascendente. Cuando la resina fluye por el taladro inmediatamente superior, la boquilla de inyección se cambia a este último y se tapona el inferior. La presión de inyección no debe superar los 0,7 MPa y es recomendable una presión de trabajo de 0,3 MPa. (De Rivaz, 2011)*

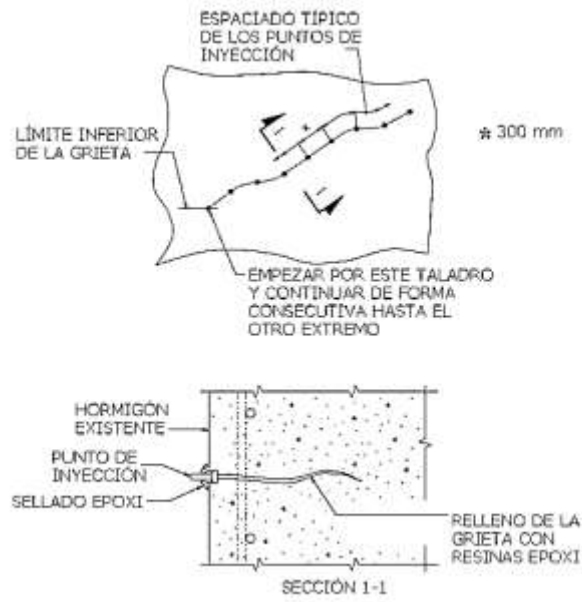


Figura 40: Detalle de grieta en el revestimiento de un túnel

Tomado de: Castanedo F. J. (2017)

Si las dimensiones de la grieta o el empuje del terreno, hiciesen pensar que el tratamiento anterior es insuficiente para garantizar la unión de sus caras, puede recurrirse, al cosido mediante taladros armados e inyectados.

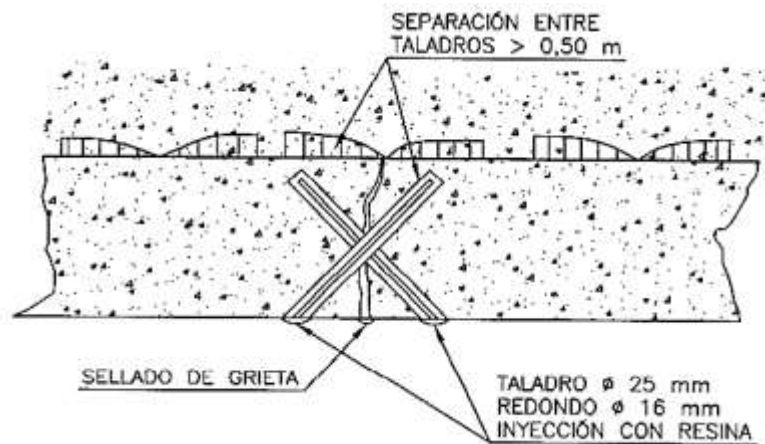


Figura 41: Detalle de talados para sellados de grieta

Tomado de: SÁNCHEZ DOMÍNGUEZ, F. Y RIBES PANTOJA, J. (1998)

6.3.2.2 SELLADO DE FILTRACIONES

Existen filtraciones que, en principio, no comprometen la integridad de la estructura pero que pueden causar corrosión en la armadura y el deterioro del hormigón a largo plazo, además de producir afectar al servicio y producir daños en el interior del túnel con los costes de mantenimiento consiguientes.

Para Estébanez E., (2011), las resinas de epoxi no son inyectables cuando existe flujo de agua, por lo que es necesario el uso de otros productos; dos son los principales:

- *Lechada de micro cementos puede penetrar en grietas y cavidades más pequeñas que el tamaño de sus propios granos. El límite de penetración del cemento normal es una fractura de 0,2-0,3 mm de espesor. El micro cemento o polvo de cemento microfino (PCM) Las suspensiones diluidas de este tipo de cemento precisan un agente dispersante para que las partículas y los flóculos se mantengan entre 1 y 20 micrómetros. Estas lechadas tienen baja toxicidad y no son flexibles después del fraguado; esta falta de flexibilidad las hace poco adecuadas para reparaciones a largo plazo ya que en el futuro pueden rezumar si se producen movimientos estructurales.*
- *Lechadas químicas. Son soluciones puras sin partículas en suspensión y, por lo tanto, y debido a su baja viscosidad, a veces cercana a la del agua, pueden penetrar en fisuras de hasta 0,01 mm de apertura. Los productos empleados, pueden ser acrilamidas, acrilatos, silicato sódico, lignosulfitos, aminoplastos y poliuretano, obteniéndose grandes variaciones en su aspecto, viscosidad y toxicidad. Las más usadas son las resinas de poliuretano acuareactivas, que se polimerizan y expanden en contacto con el agua. (Estébanez Sánchez, 2011)*

La inyección de lechada química se realiza de forma similar a la de resinas epoxi; la mayor diferencia está en el tipo y la posición de los taladros de inyección. Los taladros de realizan diagonalmente desde los bordes de la grieta y la interceptan dentro de la pared. En los taladros se colocan los manguitos mecánicos que proporcionan una unión

estanca y evitan el derrame de la inyección. La superficie de la grieta también debe ser sellada.

Los manguitos se dejan en el sitio y, si es posible, se reinyectan durante aproximadamente 7 días. Se ha comprobado que se consiguen mejores resultados inyectando a baja presión durante periodos largos de tiempo que a alta presión durante periodos cortos; además, esto último puede dañar el hormigón.

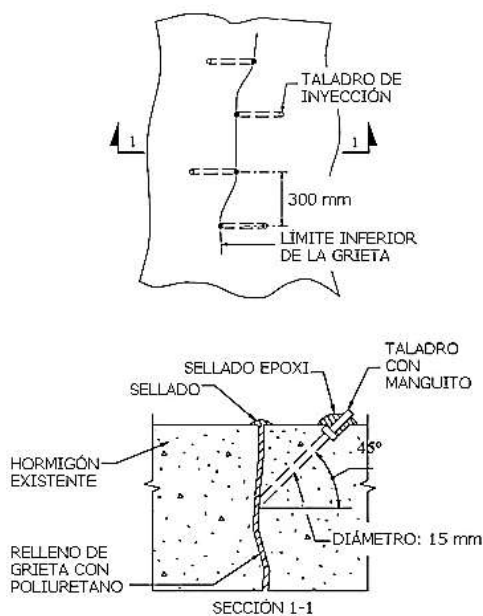


Figura 42: Detalle constructivo de sellado Epoxi de grieta

Tomado de: Estébanez E. (2011)

La eficacia de las inyecciones químicas en el sellado de grietas es muy superior a las de partículas. Es importante señalar que si estas inyecciones se resecan pierden eficacia; esto puede ocurrir por el desvío del flujo de agua o por descenso del nivel freático por debajo de la cota de la fisura. En estos casos pueden emplearse esteres acrílicos que no se resecan.

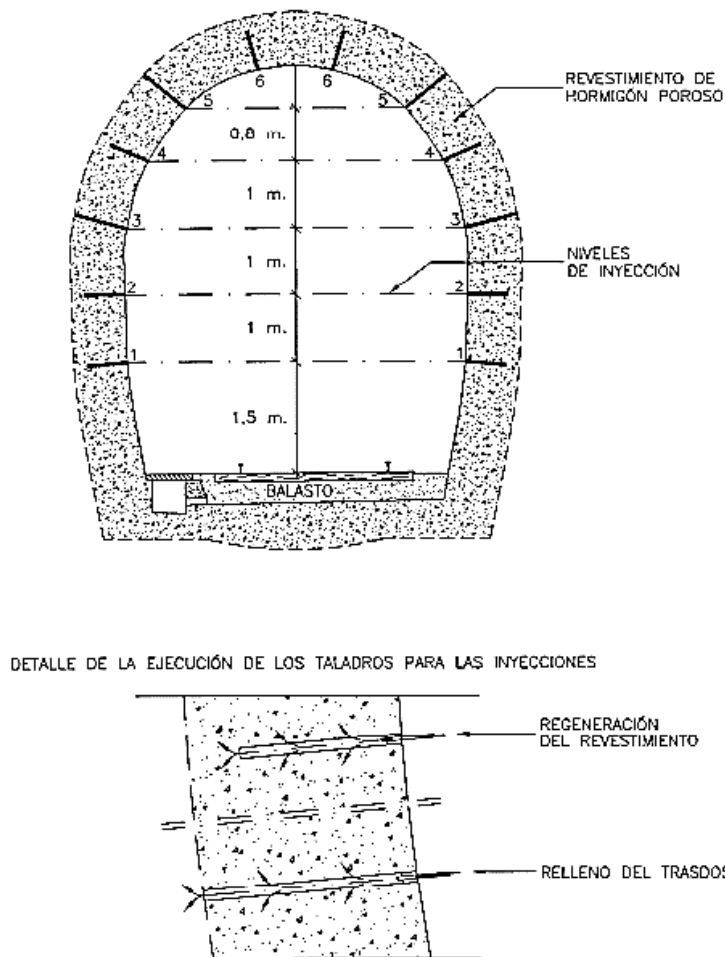


Figura 43: Detalle constructivo de ejecución de los taladros del túnel

Tomado de: Estébanez E. (2011)

6.3.3. IMPERMEABILIZACIÓN Y DRENAJE

El agua que se genera durante la construcción de túneles puede provenir de las siguientes opciones a ser consideradas:

- Filtración desde el macizo rocoso
- Agua suministrada al túnel desde el exterior, para su empleo en trabajos de ejecución (perforación, etc.)

- Agua procedente de fugas en el sistema de suministro y bombeo.

Toda esta generación de agua da como resultado lodo, lo cual dificulta el trabajo de excavación y limpieza dentro del túnel, entre otros problemas. Por lo que se deberá realizar un proceso de bombeo hacia el exterior a través de sistemas adecuados. Una vez extraído este material (lodo), se somete a un tratamiento de clarificación para poder ser vertido a la red general de aguas pluviales. Contando con los permisos pertinentes.

Estas aguas se captarán mediante un sistema de impermeabilización y drenaje para evitar goteos y proteger al túnel de la acción de las aguas subterráneas.

La excavación en el macizo rocoso del túnel origina una canalización de las aguas subterráneas existentes, por lo que el túnel ha de desaguar el agua procedente del terreno.

El sistema de drenaje se sitúa entre el sostenimiento y el revestimiento, se coloca una banda drenante de polietileno preformada con cavidades a lo largo del perímetro del túnel y medias cañas de PCV de 70 mm cada 12 m que desaguarán en la parte inferior de los hastiales, al sistema de drenaje general de túnel. *Este drenaje general del túnel está formado por un tubo central de PVC de 200 mm con arquetas cada 25 m al que se conecta las aguas de infiltración mediante 2 tubos de PVC de 75 mm embebidos en el hormigón de la vía placa en forma de espina de pez* (Estébanez Sánchez, 2011). Las arquetas se proyectan prefabricadas de hormigón de 70 x 70 cm de dimensiones interiores.

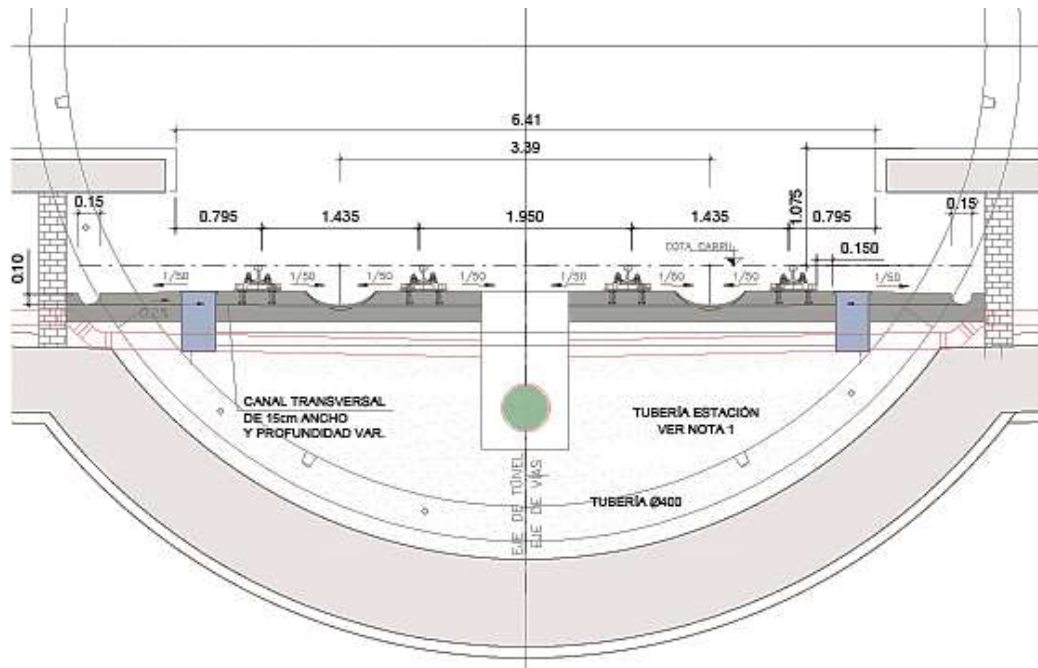


Figura 44: Modelo de Filtración

Tomado de: Estébanez E. (2011)

6.4 NUEVOS TIPOS DE HORMIGONES Y FIBRAS UTILIZADOS PARA RESOLVER PATOLOGÍAS POR TIPO DEL MATERIAL

Para el sostenimiento y revestimiento de las obras subterráneas, como los túneles, se usa mezclas de hormigones aún más tecnificados, esto a corto plazo, consentirá una mejora en la seguridad y durabilidad de las estructuras, por ello los costes bajaran en un buen porcentaje, ya que el mantenimiento de las construcciones de este tipo es muy alto, se puede aumentar su durabilidad a varias décadas.

6.4.1 NUEVOS HORMIGONES PROYECTADOS ECOLÓGICOS

El programa europeo Brite-Euram, ha desarrollado un nuevo hormigón proyectado omitiendo el clásico acelerante de fraguado.

Tiene alta calidad y es económico, para los entendidos del tema, *este tipo de hormigón proyectado se ha utilizado, satisfactoriamente en los más importantes proyectos de túneles en Alemania y Austria (Alonso, 2002).*

a) Elementos que lo componen:

- Cemento con poco yeso y sulfatos.
- Contiene aditivo no alcalino
- No contiene acelerante de fraguado.
- Contiene superplastificantes que disminuyen la relación agua-cemento.
- Aditivos lavados y medidos
- Puzolanas: cenizas volantes muy reactivas con el agua y el carbonato cálcico del cemento que incrementa su poder cementante (microsilíce),
- Materia en fibras y agua simple

b) Características de ventaja

- Mejores resistencias iniciales y finales
- Son más densos.
- El fraguado es rápido.
- Tiene un mejor nivel de adherencia con la roca.
- Su estructura es más impermeable.
- Mejor nivel de la durabilidad.
- Sin acelerante, es ecológico.

- Adquiere las características durables de las fibras.
- Bajos costos.
- Calidad semejante al hormigón encofrado para revestimientos.

c) Aplicaciones

- Se usan para hormigones proyectados empleados en construcciones que requieren sostenimientos del terreno, los espesores son de gran utilidad para los revestimientos, evitando la contaminación del medio.
- Aplicable en refuerzos y reparaciones de otros tipos de hormigones más frágiles.

6.4.2 HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES (AUTO-NIVELANTES)

Estos hormigones son de uso clásico en la construcción de puentes y elementos prefabricados en ciudades, así mismo en revestimiento de túneles desde hace más de dos décadas.

Las ventajas son: *una mejor calidad, fiabilidad y durabilidad del hormigón con menores costes de colocación*, (Pialarissi Cavalaro, 2009). En este tipo se elimina el problema de la vibración.

6.4.3 HORMIGONES CEMENTICOS (ECC)

Desde el año 1993 (V.C. Li, Universidad de Michigan) se ha potenciado el uso de este tipo de hormigones, diseñados micro mecánicamente (Saavedra L., 2014), sus características son de mejor calidad que la de los morteros y hormigones clásicos. Se

convertirán en la vanguardia de la tecnología en hormigones de edificación, cambiando la forma de emplear materiales en las construcciones de tipo socavación.

6.4.4 HORMIGONES POLIMÉRICOS

Son aquellos que casi no usan entre sus componentes el cemento Pórtland como un polímero elemental. *Este último es parcialmente usado en los hormigones proyectados, a diferencia de los hormigones poliméricos, se utilizan en prefabricados de hormigón.* (Bernaola Alonso, Castilla Gómez, & Herrera Herbert, 2013), por el uso de este polímero, el fraguado es instantáneo y dúctil, además son muy durable. La técnica es el control micro mecánico, lo cual posibilita manufacturar hormigones con características particulares y específicas para cada requerimiento.

6.4.5 HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA

Son hormigones con resistencia a compresión simple a 28 días comprendida entre 50 y 100MPa. *Se fabrican con cementos tipo I 42,5-52,5 (con más de 400kg/m³), áridos con resistencias por encima de 100MPa y tamaño máximo de 20mm procedentes de machaqueo* (De Rivaz, 2011). Estas relaciones agua/cemento deben ser menores que 0,4, y alta dosificación de superfluidificantes.

Se usa en revestimientos especiales y en revestimientos prefabricados de dovelas. Sus principales características son:

- Permite reducir los tiempos de descimbrado
- Aumenta la rigidez del conjunto matriz-árido

- Ofrece un mayor rendimiento de los materiales, lo que contribuye a un mayor ahorro económico.
- Ofrece una mayor compacidad (24kN/m^2), y por tanto mayor durabilidad en ambientes agresivos.
- Sufre menor retracción y fluencia, con una menor abertura de fisuras antes y después de entrar en carga.
- Tiene un mejor comportamiento a fatiga, aunque sufre una importante pérdida de resistencia por exposición al fuego (mejora con la adición de fibras de polipropileno).

6.4.6 NUEVOS TIPOS FIBRAS PARA PATOLOGÍAS DE REVESTIMIENTO DE HORMIGÓN

El uso de las fibras en el refuerzo de hormigones, logra mejoramiento en su calidad, propiedades y aplicaciones en terrenos con deformaciones, la capacidad de refuerzo es alta, especialmente en construcciones subterráneas. (Martí, Yepes, González, & Alcalá, 2012)

Las fibras permiten dar propiedades de dureza y durabilidad a los materiales de construcción, en la industria de los hormigones se utilizan como soluciones de la ingeniería de las resistencias y tracción de materiales. La siguiente es una clasificación generalmente aceptada en los tipos de fibras del mercado:

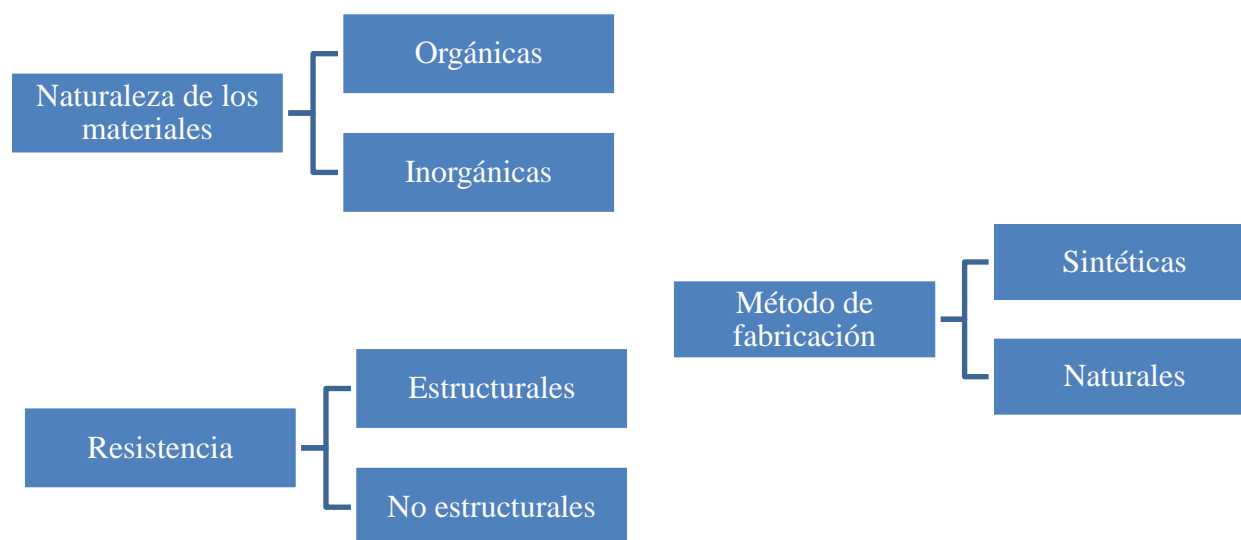


Figura 45: Tipos de fibras

6.4.7 TIPOS DE FIBRAS MODERNAS UTILIZADAS EN REVESTIMIENTOS DE TÚNEL

Tabla 7: Fibras orgánicas

ORGÁNICAS					
	#	MATERIAL	TIPO DE FIBRA	NOMBRE	PROPIEDADES
ORGÁNICAS	1	CARBONO (Producto sintético, orgánico, se produce por pirolisis del (PAN)(2))	Alta resistencia (HS) Alto módulo (HM)	MITSUI (J) MBrace CF130 MBrace CF530 PAN (J) PITCH (J)	Muy duro, ligero, resistente y rígido (alto límite elástico. Alta durabilidad, resistente a la corrosión, inerte, más estable químicamente que el vidrio.
	2	ARAMIDA (Fibra orgánica sintética avanzada)	Paratipo (Alta tenacidad y elasticidad) Melatipo (Resistente al calor)	KEVLAR 49 TWARON 2200 TECHNORA ARAPREE	Resistente, ligero y durable Dúctil y flexible Alta resistencia contra sismos Material no conductor de electricidad

	3	POLIPROPILENO (Producto sintético orgánico plástico)	MACROFIBRAS SINTÉTICAS	TUF-STRAND ENDURO 600 S ENDURO 300 STRUX 90/40	Ligera, muy versátil, coste moderado Resiste a la humedad y a los productos químicos. De fácil manipulación Resiste a la corrosión
			POLIOLEFINA	BARCHIP	Ligera Resistencia a flexión similar al acero Reduce desgastes No sujeta a la corrosión
	4	ALCOHOL POLIVINILO (Fibra orgánica sintética)		PVA	Gran ductilidad. Crean una unión molecular el cemento durante su hidratación. Más económica que la fibra de vidrio Muy resistente y durable, muy estable químicamente La fibra se destruye con el calor en un incendio, produciendo vapor de agua y CO2

Tabla 8: Tipos de fibras inorgánicas

INORGÁNICAS				
	MATERIAL	TIPO DE FIBRA	NOMBRE	PROPIEDADES
INORGÁNICAS	5	VIDRIO (Producto sintético inorgánico)	AR GLASS (HD) (de alta prestación)	Estructura amorfa, tiene las mismas propiedades a lo largo y a lo ancho de la fibra. Absorbe la humedad.
			AR GLASS (HP) (de alta prestación)	Alta resistencia a largo plazo y durabilidad. Sustituye a los asbestos.
			ID FIBER-Fe FOSFATO	Resistente a los álcalis y más barata de fabricación que la fibra AR.
				Fuerte resistencia al calor. De uso en ventiladores y sistemas de ventilación. Aislante térmico y aislante acústico No contraindicación medio ambiental.

6	BASALTO (Fibra mineral)			Resistente a la tracción. Más resistente que la fibra de vidrio. Alta resistencia al electromagnetismo. Mediana conductividad térmica Tiene un módulo de elasticidad muy alto.
7	ACERO (Producto sintético inorgánico)	Tradicionales	DRAMIX NOVOCO M	
		Nuevas	TOREX (U Michigan)	Mejores propiedades mecánicas que las fibras tradicionales, utiliza acero de alta calidad y optimiza su forma y tamaño. Gran trabazón con la matriz de cemento. Utiliza fibras mecánicamente deformadas que incrementan la fricción entre estas y el cemento. Fibras de forma triangular con una eficacia 200 veces mayor que las fibras tradicionales.
8	ASBESTOS (Producto inorgánico natural)			Incombustible Químicamente estable

Como ya se ha dicho, la utilización de estas fibras tiene una influencia notable en las propiedades de los hormigones como: buena resistencia a la tracción, su módulo de elasticidad es de alta calidad, tipo Young y la elongación máxima hasta rotura (ductilidad).

Los hormigones en general, y los hormigones usados en sostenimientos y revestimientos de túneles, en particular se exige:

a) En cuanto a su resistencia

- Resistencia a compresión simple.
- Resistencia a tracción.
- Resistencia a flexión.

b) propiedades de tensiones

- Tenacidad en contra de compresión.
- Tenacidad a esfuerzos de tracción.
- Tenacidad a esfuerzo de flexión.
- Ductilidad.

c) En cuanto a su durabilidad

- Resistencia a la acción corrosiva.
- A los álcalis.
- Resistencia a los ácidos.
- A la figuración.
- Impermeabilidad.
- Buena resistencia a los sismos y vibraciones.
- Al fuego.
- Resistencia a las explosiones.

7. TRATAMIENTOS Y SOLUCIONES A PROBLEMAS CONSTRUCTIVOS EN EXCAVACIÓN SUBTERRÁNEA CON TUNELADORA EN TERRENOS MIXTOS EN PROYECTO METRO DE QUITO ENTRE LOS TRAMO EL LABRADOR – LA CAROLINA

En la Ciudad de Quito se realizó la construcción del proyecto Metro subterráneo línea 1 para transporte público. Hasta el presente se ha construido 22.5 kilómetros de túnel, 15 estaciones y 35 pozos de bombeo, ventilación y emergencia.

Durante las etapas del proyecto se fue diseñado diferentes tipos de procedimientos de excavación según la tipología del terreno. Para la ejecución del túnel se utilizó una tuneladora TBM-EPB con un diámetro de 9.49 metros y una longitud de 120 metros aproximadamente por la tipología geológica de los suelos mixtos, por la dificultad de su terreno se fueron dando problemas ocasionando tratamientos y soluciones que se fueron dando para finalizar la ejecución de este proyecto.

En este capítulo se analizará los tratamientos previos y posteriores tomados por ingeniería y producción de la excavación subterránea con tuneladoras, el tramo norte comprendido entre las estaciones de El Labrador –La Carolina con una longitud de 4.5 km atravesando 4 estaciones. El tramo subterráneo atravesó depósitos de suelos blandos, con alto contenido de humedad, cangaguas limosas secas, donde se encuentre un estrato de arenas y gravas a la profundidad de las estaciones; mientras que en la zona de túnel se tienen depósitos más profundos de arcillas blandas, por lo cual se expuso a comportamientos no considerados de acuíferos que influenciaron al diseño del revestimiento del túnel.

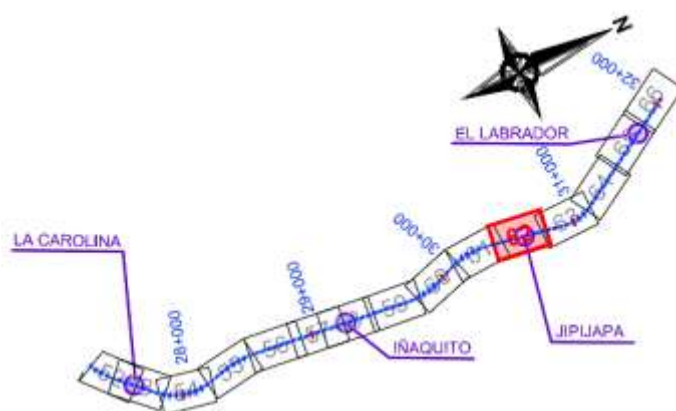


Figura 46: detalle trazado del Túnel Norte Metro de Quito

Tomado de: Estudios de Diseño de Ingeniería de la Primera Línea del Metro de Quito (2012)

7.1 DESCRIPCIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS APLICADOS EN LA EXCAVACION DEL TUNEL TRAMO LABRADOR – CAROLINA

Los grandes proyectos de obras subterráneas ejecutados en los últimos años, han permitido en la actualidad de una enorme experiencia sobre los sistemas y procedimientos constructivos. Estas actuaciones han favorecido el desarrollo tecnológico de equipos, maquinaria y procesos constructivos adaptados al comportamiento de terrenos de muy variada naturaleza. Dicha evolución de los procedimientos constructivos, consideración que se realizó para la construcción de la primera línea de metro de la ciudad de Quito.

Tabla 9: Tipología del terreno general encontrada en tramo Norte del Túnel del Metro de Quito

Fuente: Zabala, Sánchez, & Matallana (2012)

	UNIDAD GEOTÉCNICA (SÍNTESIS)		DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA GENERAL
RELLENOS	R	RELLENOS ANTRÓPICOS	LIMO ARCILLO-ARENOSO CON FRAGMENTOS DE LADRILLOS, BOLSAS, MADERA, PLÁSTICOS, ETC
TURBAS MORÁN VALVERDE	T _{vf}	DEPÓSITOS LACUSTRES	TURBAS
DEPÓSITOS LA CAROLINA	Fl Ca	DEPÓSITOS LA CAROLINA PALUSTRE-LACUSTRE Y ALUVIAL	CENIZAS, ARCILLAS, LIMOS Y CAÍDAS DE PÓMEZ
FORMACIÓN CANGAHUA	Ca	CANGAHUA LIMO-ARCILLOSA	LIMOS Y ARCILLAS ARENOSOS
	Ca _e	CANGAHUA ARENO-LIMOSA	ARENAS LIMOSAS
	Ca _g	CANGAHUA COLUMAL	ARENAS Y GRAVAS CON ALGO DE LIMOS
	Ca _n	CANGAHUA NO ALTERADA	TOBAS

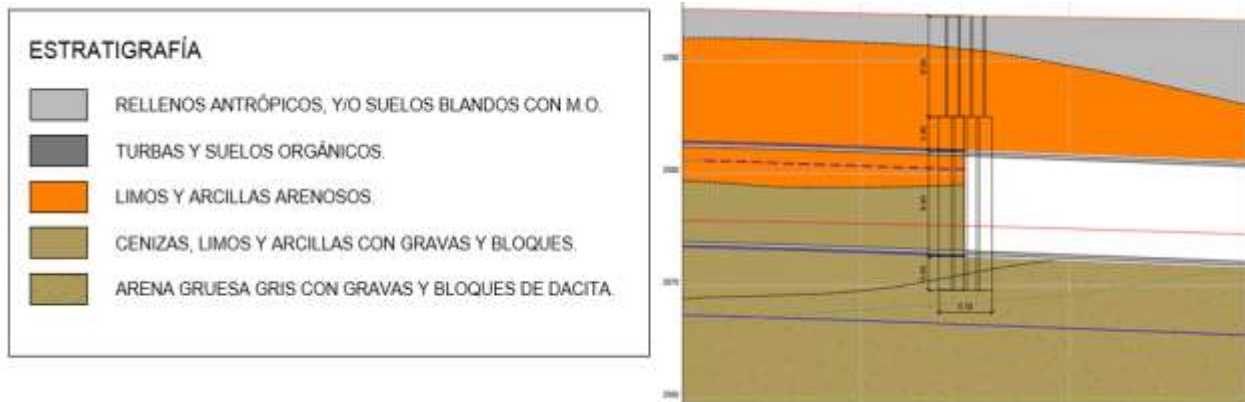


Figura 47: Corte de una Sección de Túnel con suelos mixtos

Tomado de: Zabala, Sánchez, & Matallana (2012)

Para la selección del método utilizado con tuneladora TBM se consideró como prioridades las siguientes:

- Excelente seguridad en el interior del túnel para los obreros.
- Alta seguridad para las edificaciones en la superficie del terreno.
- El frente abierto del túnel es muy poco, tomando en cuenta la estabilidad del terreno.
- La seguridad y calidad son prioridad sobre los factores de costo y plazo.

Así mismo, se considera para la elección del sistema constructivo de excavaciones subterráneas lo puntos siguientes:

- Seguridad de la obra durante la construcción y después de ella.
- Revisión de edificios e instalaciones
- Consideración del tráfico circundante.
- Infraestructuras existentes en el entorno de la obra.
- Condiciones de la propia estructura del terreno.
- Medidas del túnel. Uso de recubrimientos.

- Diámetros de excavación.
- Planificación con sistemas acuíferos.
- Revisión de geometría del trazado en planta
- Revisión de características tenso-deformacionales del terreno.
- Adaptación a: niveles freáticos, rellenos antrópicos, suelos o rocas de dureza variable, etc.

Durante la ejecución de las grandes obras subterráneas realizadas en España (Madrid, Barcelona, Sevilla, Valencia) donde surgieron patologías que, con diversas ideas y procesos, la seguridad mejoró, el rendimiento para el plazo de ejecución no es bueno y los costos son más bajos que sus respectivas referencias (Metro de Londres, Atenas, Lisboa, y otros). (Zabala, Sánchez, & Matallana, 2012)

Teniendo en cuenta aspectos recogidos en diversos aspectos en la ciudad de Quito, entre las que se pueden destacar:

- En general el trazado discurre por áreas urbanas con presencia de edificaciones.
- Presencia de suelos en la práctica totalidad del trazado.
- Presencia de suelos poco cohesivos, principalmente en el tramo a evaluar con cargas de agua considerables.
- Actividad sísmica.

La excavación mediante tuneladora fue utilizada trabajando en modo cerrado (presión en el frente) y debido a la heterogeneidad de los materiales mediante una tuneladora presión de tierras (E.P.B.). El uso en modo EPB con inyección de bentonita por la coraza, para evitar que el gap existente (hueco entre el escudo y el terreno) se rellene por el suelo (debido a su reducida cohesión), y de esta forma, lograr que el asiento en superficie sea inferior.

7.1.1 TÚNEL CON TUNELADORA TBM

Para la mayor parte del trazado del túnel de línea se ha previsto el empleo de la tuneladora tipo EPB (trabajo con frente cerrado y presión de tierras mantenida en la cámara por medio de un tornillo sinfín de evacuación de los productos excavados).

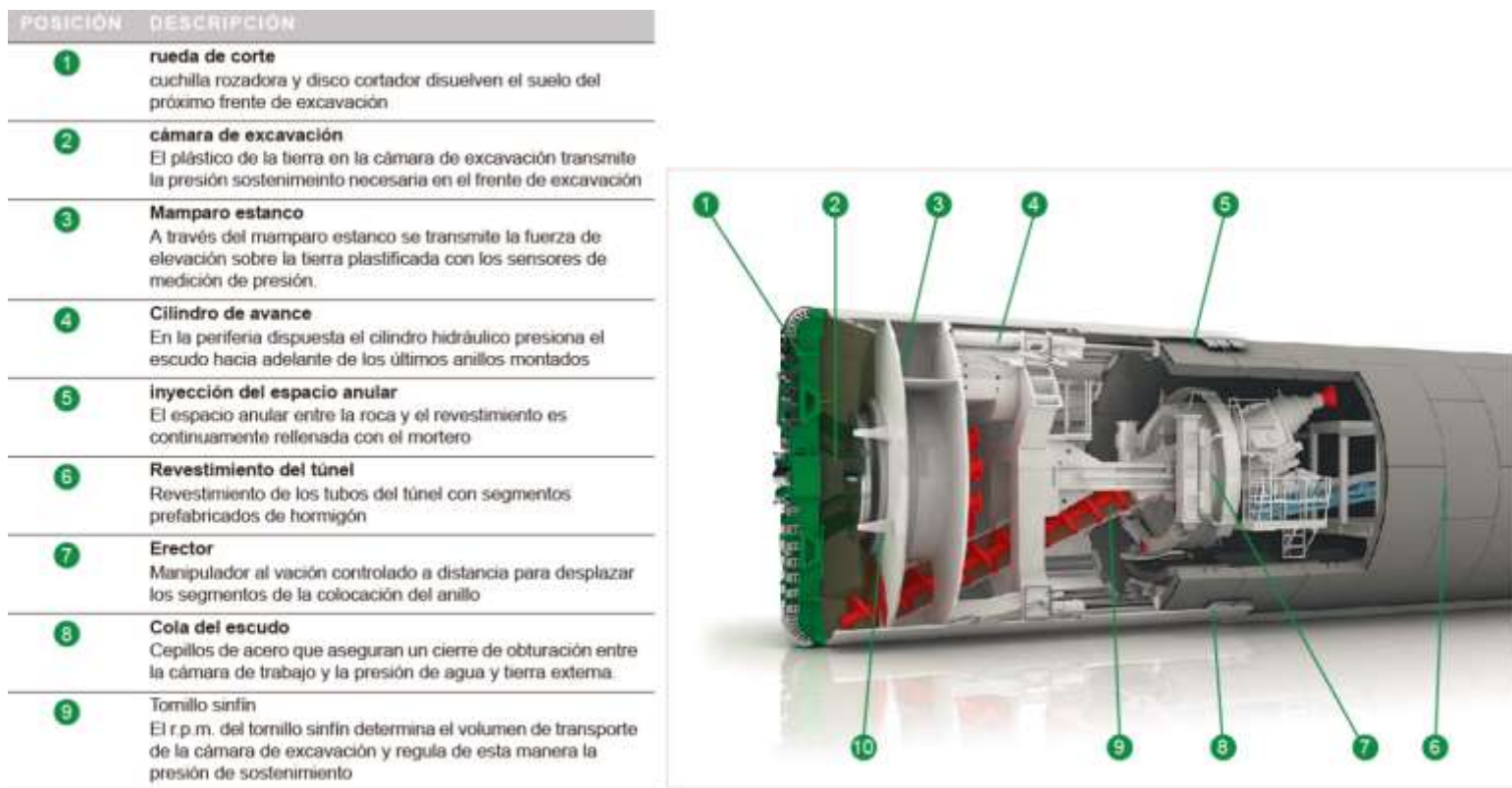


Figura 48: Tuneladora Presiones de tierras

Tomado de: Zabala, Sánchez, & Matallana (2012)

Este método de gran seguridad, buen rendimiento y costos de ejecución bajos. La consideración en experiencias acumuladas, la mecanización y los rendimientos hacen que este método constructivo de perforación con escudo, fueron acertados en la mayoría del trazado.

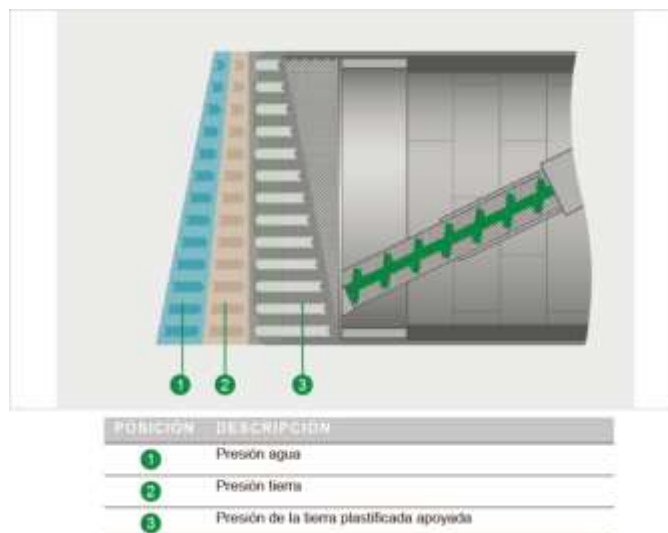


Figura 49: Esquema tuneladora utilizada en excavación Túnel Metro de Quito

Tomado de: Zabala, Sánchez, & Matallana (2012)

Tabla 10: Resumen de las especificaciones técnicas de la máquina tuneladora

Tomado de: Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México (2009)

• Tipo de máquina:	EPB (Escudo simple)
• Diámetro nominal de la cabeza de corte:	9.370 mm \pm 10 a 30 mm
• Abertura de la cabeza de corte:	20 – 30%
• Espesor de dovelas:	32 cm
• Número de gatos:	26 (3.770 kN/gato)
• Par máximo:	21.000 kN·m
• Par de desbloqueo:	25.000 kN·m
• Erector:	Hidráulico, sencillo o doble

El proceso de transporte por las estaciones, trasladando la tuneladora por sus propios medios a lo largo del recinto de estación, acción sobre la solera, se va formando en posición y simetría a la tuneladora, formando una *cuna* con el diámetro casi igual a la del disco de corte.



Figura 50: Detalle Cuna de Estación La Carolina

En la imagen se observa que el revestimiento se ha formado mediante anillos hechos por dovelas prefabricadas de hormigón armado. Las medidas son 8.43 m de diámetro interior, 32,5 cm de espesor, y 1.51 m de longitud, el anillo es estándar.

Las dovelas irán armadas con armadura convencional y adicionalmente de fibras de acero en proporción de 25 kg/m³ de hormigón, cuyo principal objetivo es evitar las roturas de la dovela en el montaje por esfuerzos de corte y asegurar el comportamiento estructural del anillo en el caso de fuego en el interior del túnel.

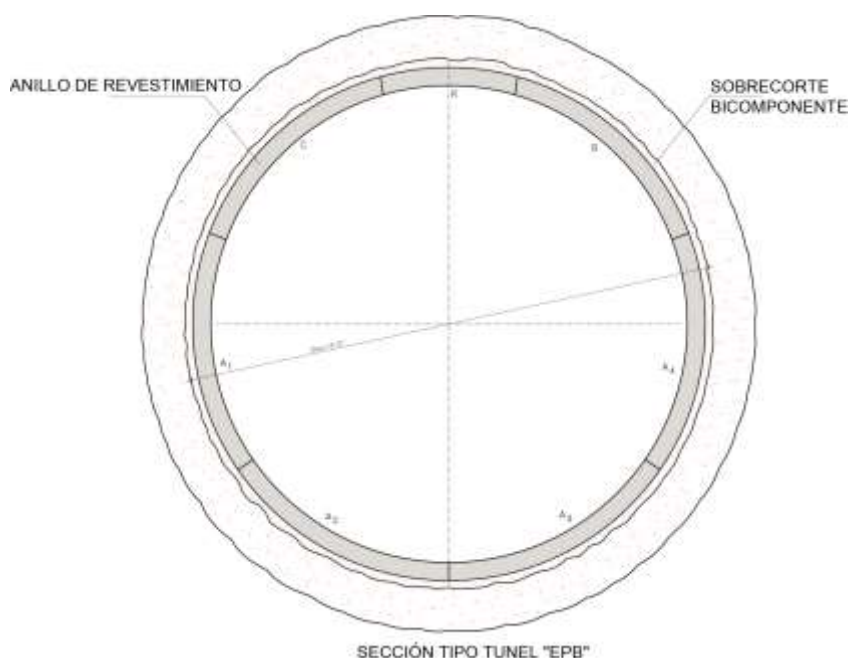


Figura 51: Sección Tipo Túnel EPB

Tomado de: De Rivaz, (2011)

La máquina tuneladora, permitió ejecutar un túnel de diámetro interior de 8.43 m. Esta máquina está provista para niveles más duros los cuales fueron utilizados a su tiempo.

Por medio de un sistema de inyección concurrente de mortero de cemento (de unas características especiales en cuanto al inicio y fin del fraguado las cuales se ubican en el espacio entre el anillo de dovelas y la excavación que realizó la máquina *gap*. Además, deberán estar provistas de las instalaciones necesarias para la inyección de bentonita o lodos por la coraza del escudo, minimiza el asiento que pueda producirse entre la excavación del terreno y la disposición del anillo de dovelas con el correspondiente relleno anular de mortero.

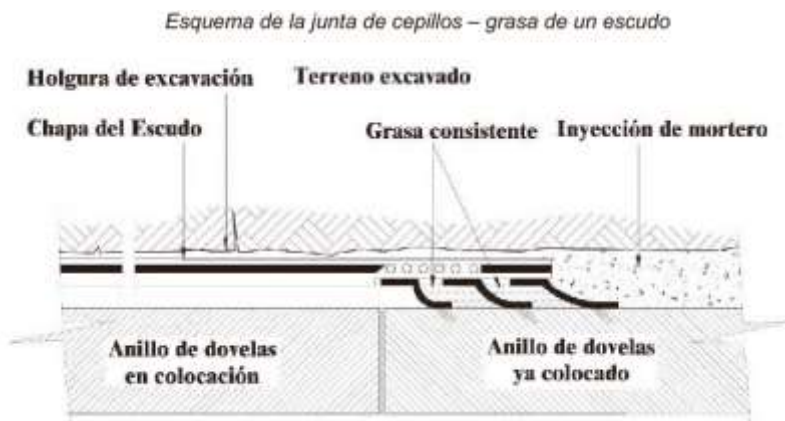


Figura 52: Detalle de Inyección de componente en el trasdós de Túnel

Tomado de: Zabala, Sánchez, & Matallana (2012)

Para este proceso, la inyección a base de mortero se realiza simultáneamente con la excavación, usando la máquina de sobrecorte, utilizando el umbral mismo, reduciendo la distancia del frente, si se necesitare una inyección posterior, se lo hace mediante la manipulación e inyección por dentro y centro de cada dovela.

Se debe usar biconos para las juntas radiales, tornillos verticales y barras de guiado para emplearlas en las juntas longitudinales, de esta manera se minimiza la entrada de agua al túnel, se dispondrá de juntas de doveles hidroexpansivas.

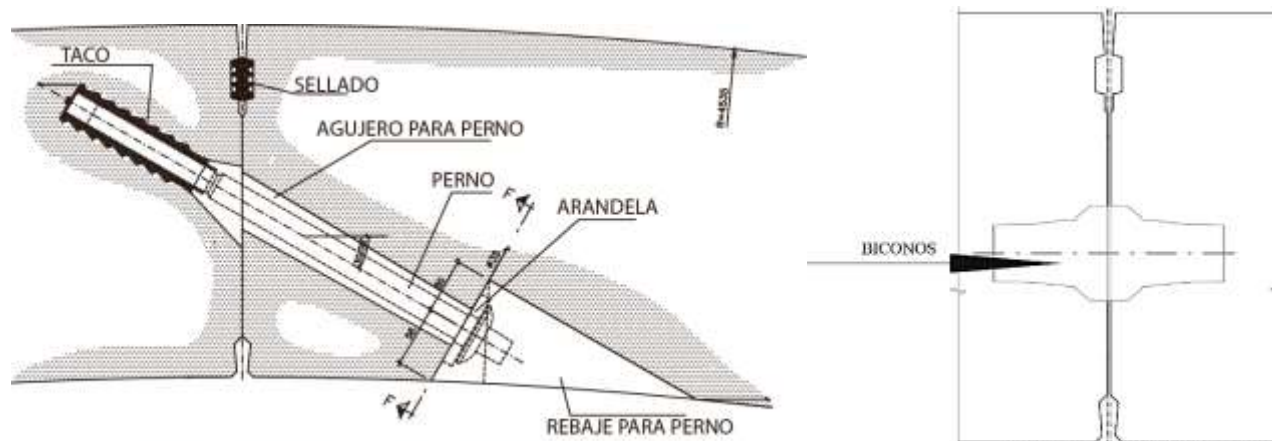


Figura 53: Detalle de sellado de junta de dovela

Tomado de: Zabala, Sánchez, & Matallana (2012)

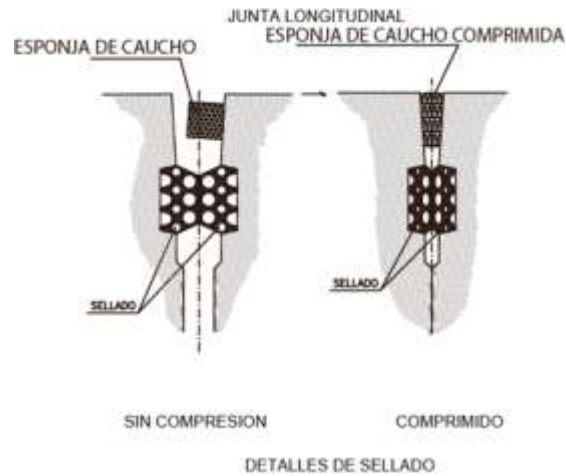


Figura 54: Detalles de sellado Junta Longitudinal

Tomado de: Zabala, Sánchez, & Matallana (2012)

Para la curvatura simétrica interior, el diámetro debe ser medido según las necesidades de del ferrocarril o medio de transporte que se usara en este túnel, por ejemplo, para el ferrocarril de doble vía, se usa el gálibo del material móvil de 1,54 m de

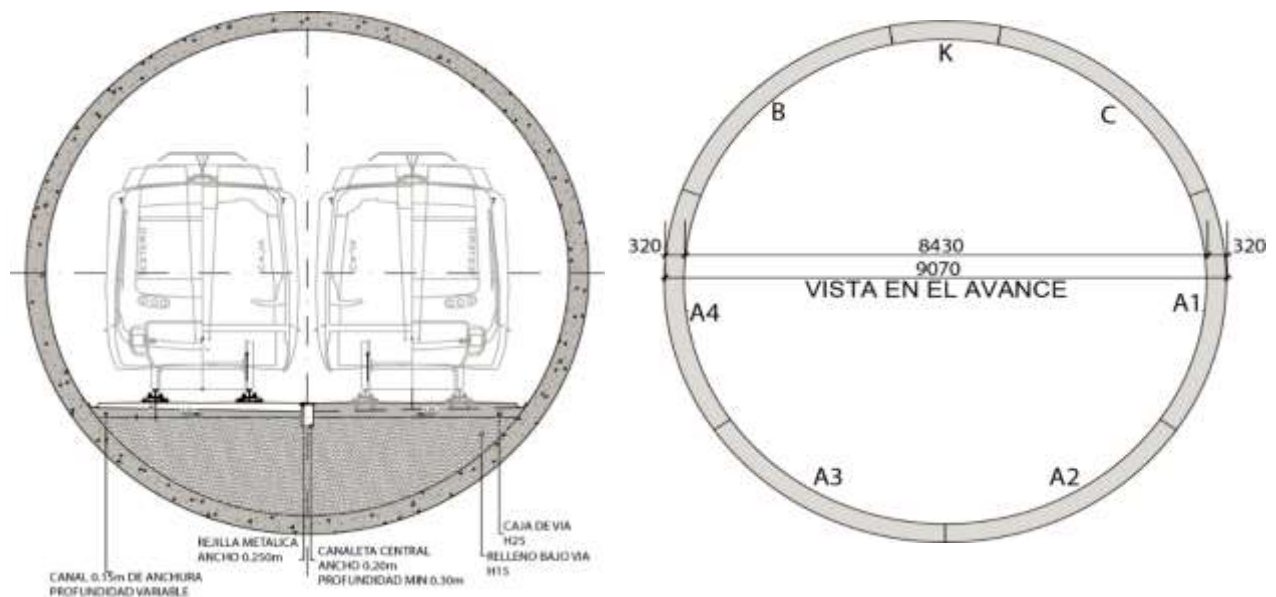


Figura 55: Sección de Túnel del Metro de Quito

Tomado de: Zabala, Sánchez, & Matallana (2012)

anchura, el factor eléctrico también debe ser tomado en cuenta para trenes modernos, para ello el diámetro interior de es de 8.432 m.

El análisis estructural para los diseños de revestimiento de túneles, es dependiente de los avances en la construcción de dovelas, desde sus proceso de construcción y transporte, el siguiente factor en incidencia es el montaje del anillo, pues las fuerzas que sobre este ejerce, depende de las tuneladoras, los accidentes geográficos, clima, agua y tipo de terreno, son de planificación primordial.



Figura 56: Tuneladora TBM La Guaragua en Pozo de extracción

7.2 TRATAMIENTOS Y SOLUCIONES PREVIAS A PROBLEMAS GEOLOGICOS ANTES DE REALIZAR EXCAVACIONES DEL TRAMO LABRADOR - CAROLINA CON TUNELADORA TBM-EPB - PLANO DE IDENTIFICACIÓN DE TRAZADOS DEL TRAMO ANALIZADO.

Existen movimientos de los materiales del terreno que influyen directamente en los edificios y estructuras circundantes a las excavaciones, se deben realizar distintos tipos de tratamiento para mejorar el terreno en cuestión, así entonces, existen medidas supeditadas a la subsidencia en el tiempo de la obra.

Entre los sistemas de protección que se han tenido en cuenta en proyecto, cabe señalar, entre otros, los siguientes:

- Tratamientos de jet-grouting de consolidación, para reducir la permeabilidad del terreno en excavaciones bajo el nivel freático.
- Tratamientos o actuaciones singulares en cruces de acuíferos o con bajo recubrimiento, para prevenir riesgos de flotación o de socavación.
- Descubrimiento de conducciones (especialmente tuberías de gas, de abastecimiento de agua y colectores) para desvío y/o refuerzo provisional.
- Utilización de barreras de protección por corte en el aumento de asientos, distorsiones y desplazamientos horizontales.

Entre estas se distinguen los siguientes tipos:

- Barreras rígidas mediante pilotes o muros-pantalla de hormigón armado o en masa.
- Barreras semirígidas mediante micro pilotes o jet-grouting.
- Tratamiento de consolidación en masa, mediante jet-grouting (tapón de fondo) en general, este tratamiento se efectúa en el fondo de las excavaciones con objeto de mejorar, entre otros, los siguientes aspectos:
 - Reducir la permeabilidad en el interior del recinto, en la construcción del túnel y en su excavación permitiendo que los caudales de

filtración puedan ser extraídos con bombas de dimensiones razonables.

- Mejorar las características mecánicas del terreno, incrementando su resistencia o disminuyendo su deformabilidad.
- Limitar los movimientos que se pueden originar en los edificios del entorno de los recintos excavados, por rebajamiento del nivel freático.

Disposiciones técnicas generales:

- Disponer pantallas rígidas, combinadas o no con tratamientos de mejora del terreno, en el entorno de zonas muy singulares que requieren la máxima protección y que sea posible realizarlas por geometría.
- Tratamientos en masa cuando se prevean zonas saturadas inestables de excavación con métodos con tuneladora.
- Tratamientos cuando existan suelos flojos, con permeabilidad elevada y un nivel freático elevado, que genere caudales de filtración en el revestimiento del túnel.

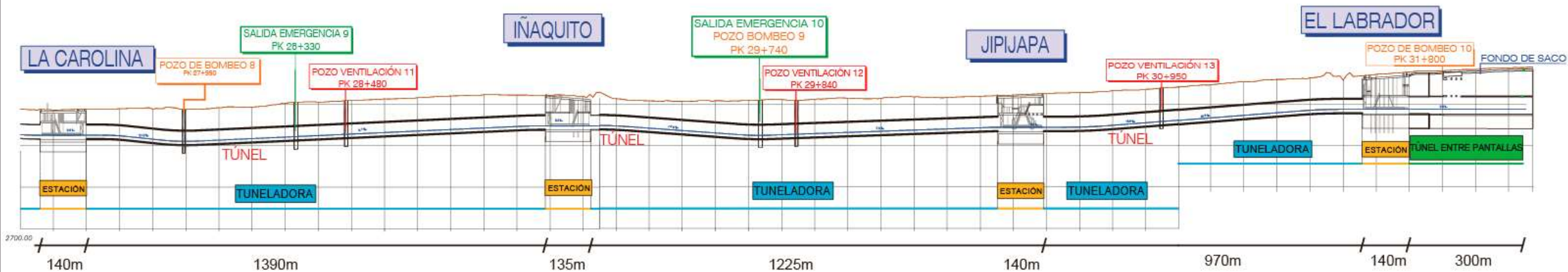
Estos criterios generales pueden tener excepciones en función de la naturaleza del terreno a tratar, de la magnitud de la subsidencia a mitigar, medidas relativas, protección de la estructura de edificaciones cercanas, protección de la tipología, prevención de desplazamientos.

7.2.1 PLANOS SUBTRAMOS A IDENTIFICAR TRATAMIENTOS Y SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS PARA EL PASO DE LA TUNELADORA



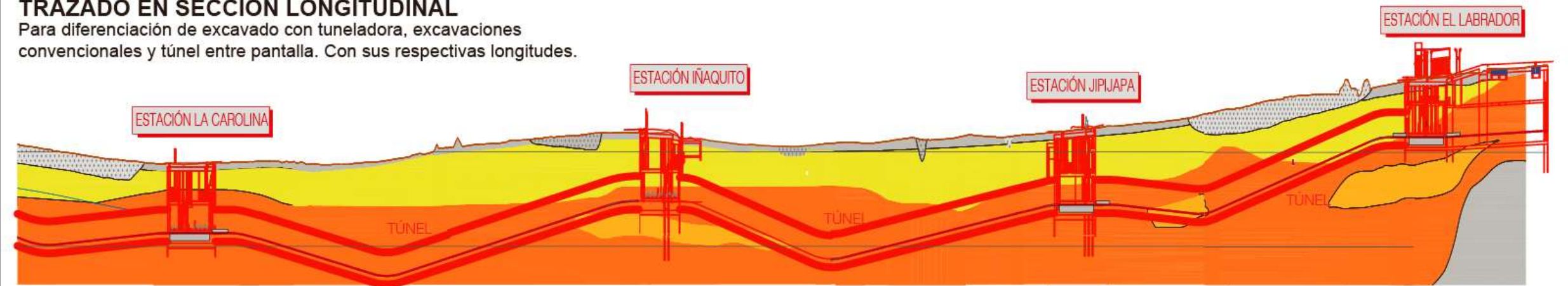
TRAZADO DE UBICACIÓN GEOGRÁFICA

De toda la extensión del túnel, se ha seleccionado como modelo de estudio el tramo desde la estación El Labrador hasta la estación La Carolina, señalado en rojo.



TRAZADO EN SECCIÓN LONGITUDINAL

Para diferenciación de excavado con tuneladora, excavaciones convencionales y túnel entre pantalla. Con sus respectivas longitudes.



TRAZADO DE DETALLE GEOLÓGICO

Para identificación de tipología del terreno por donde ha ido excavando la tuneladora.

		UNIDAD GEOTÉCNICA (SÍNTESIS)	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA GENERAL
RELLENOS	R	RELLENOS ANTRÓPICOS	LIMO ARCILLO-ARENOSO CON FRAGMENTOS DE LADRILLOS, BOLSAS, MADERA, PLÁSTICOS, ETC.
TURBAS MORAN VALVERDE	S.O	DEPÓSITOS LACUSTRES	SUELOS ORGANICOS
DEPÓSITOS LA CAROLINA	Fl, Ca	DEPÓSITOS LA CAROLINA, PALUSTRE-LACUSTRE Y ALUVIAL	CENIZAS, ARCILLAS, LIMOS Y CAÍDAS DE POMEZ

		FORMACIÓN CANGAHUA	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA GENERAL
	Ca	CANGAHUA LIMO-ARCILLOSA	LIMOS Y ARCILLAS ARENOSOS
	Ca	CANGAHUA ARENO-LIMOSA	ARENAS LIMOSAS
	Ca	CANGAHUA COLUVIAL	ARENAS Y GRAVAS CON ALGO DE LIMOS
	Ca	CANGAHUA NO ALTERADA	TOBAS

UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS
Escuela de Tecnología en Construcciones y Domótica

PROYECTO DE TITULACIÓN
TRATAMIENTO Y SOLUCIÓN DE PROBLEMAS CONSTRUCTIVOS EN EXCAVACIÓN SUBTERRÁNEA

Autor:
HECTOR ANDRÉS MORA CARPIO

Contenido:
TRAZADOS GENERALES

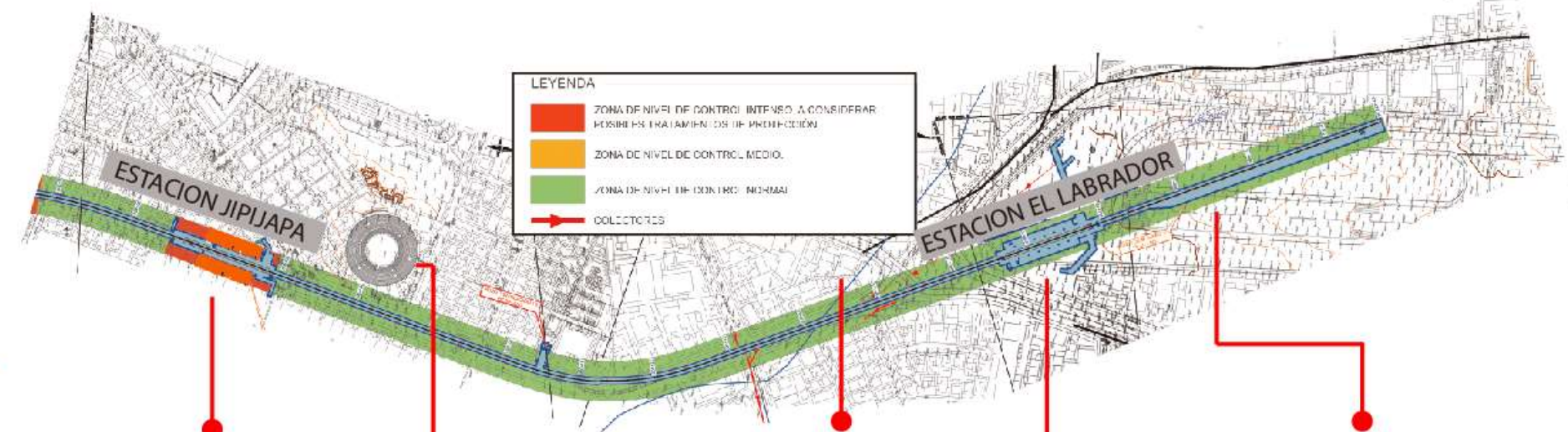
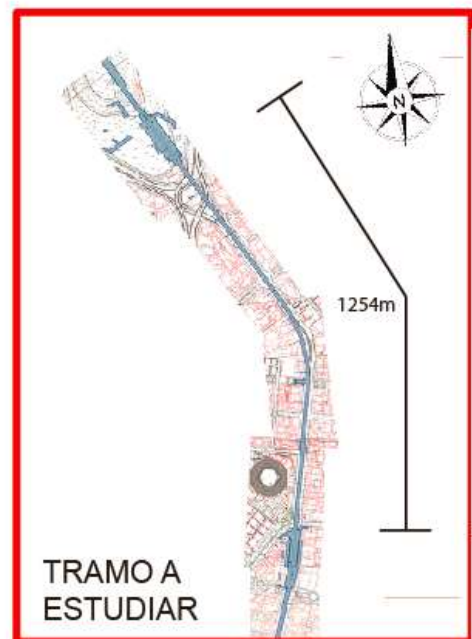
Proyecto:

Profesor guía:
Arq. Francisco Zaldumbide

Fecha:

Lámina:

TRAMO ESTACIÓN EL LABRADOR-JIPIJAPA



ESTACIÓN JIPIJAPA (AV. AMAZONAS E ISLA FLOREANA)



IGLESIA "EL CARMELO" AV. EL INCA



CENTRO DE CONVENCIONES BICENTENARIO



EX PLAZA DE TOROS



ESTACIÓN EL LABRADOR (ISAAC ALBÉNIZ Y AV. AMAZONAS)

TRAZADO GENERAL

Este tramo se desarrolló entre los PK. 31+520 y 30+600, con una longitud total de 1.254 metros, que corresponde al avance de 720 anillos desde la salida de la estación Labrador hasta la llegada estación de Iñaquito.

La tuneladora salió de la estación Labrador siguiendo avenida Amazonas, hace una curva con radio 300m a la derecha, y metiéndose por debajo de casas cruza la avenida Ascaray realizando hasta llegar a la estación de Jipijapa. En este tramo se tuvo en cuenta los pasos debajo de edificaciones, instalaciones deportivas, parkings, museos y otras instalaciones públicas.

La litología en este subtramo se corresponde principalmente a la Fm. Cangahua, (Cl, limo-arcillosa y de nuevo un pequeño lentejón más granular de Ca). Los depósitos de Cangahua (Fl, Ca) aparecen a techo de la sección puntualmente, siendo la litología predominante de la cobertera del subtramo. Seguidos de suelos fundamentalmente arcillo-limosos de relativa alta permeabilidad.

Al inicio del subtramo, entre los PP.KK 31+320 y 30+900 y a la entrada en la estación del Labrador es cuando apareció en la clave de la sección de excavación los depósitos de Cangahua, siendo el 80-90% restante de la sección los materiales limo-arcillosos de la Fm. Cangahua. El resto del subtramo se excavó principalmente en Fm. Canhagua limo-arcillosa. En este subtramo la cobertera por encima de la clave del túnel varió desde los 12m en la estación Jipijapa, ascendió hasta los casi 22m en la zona central para descender y acabar en los 11m en la estación de Iñaquito. En el tramo no se registró muchos inconvenientes por lo que no se realizó tratamientos en el tramo, solo en la estación Jipijapa donde el suelo era muy inestable y su paso podría haber dejado asentamientos graves por lo que se realizó tratamiento con micropilotes.



UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS
 ESCUELA DE TECNOLOGIA
 EN CONSTRUCCIONES Y
 DOMÓTICA

PROYECTO DE TITULACIÓN
**TRATAMIENTO Y
 SOLUCIÓN DE PROBLEMAS
 CONSTRUCTIVOS EN
 EXCAVACIÓN
 SUBTERRÁNEA**

Autor:
 HECTOR ANDRÉS
 MORA CARPIO

Contenido:
 TRAZADOS GENERALES

Proyecto:



Profesor guía:
 Arq. Francisco Zaldumbide

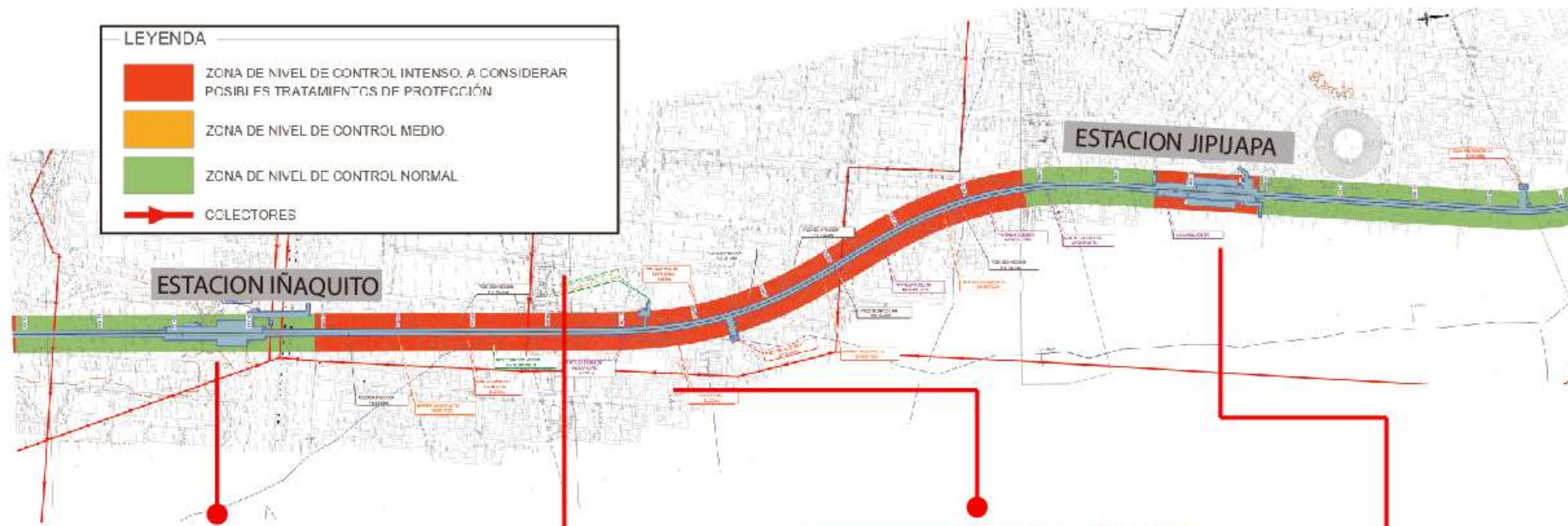
Fecha:

Lámina:

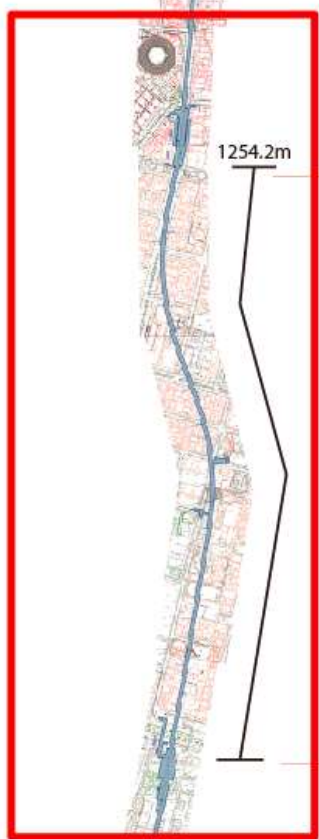
TRAMO ESTACIÓN JIPIJAPA-IÑAQUITO

LEYENDA

- ZONA DE NIVEL DE CONTROL INTENSO. A CONSIDERAR POSIBLES TRATAMIENTOS DE PROTECCIÓN
- ZONA DE NIVEL DE CONTROL MEDIO
- ZONA DE NIVEL DE CONTROL NORMAL
- COLECTORES



TRAMO A ESTUDIAR



TRAZADO GENERAL



ESTACIÓN IÑAQUITO (AV. NACIONES UNIDAS Y JAPÓN)



MERCADO IÑAQUITO



PLATAFORMA GUBERNAMENTAL



ESTACIÓN JIPIJAPA (AV. AMAZONAS E ISLA FLOREANA)

Este tramo se desarrolló entre los PK. 30+494,980 y 29+240,720, con una longitud total de 1.254,26 metros, que corresponde al avance de 836,2 anillos desde la salida de la estación de Jipijapa hasta la llegada a la estación de Iñaquito. La tuneladora salió de la estación de Jipijapa siguiendo el curso de la avenida Amazonas, pero enseguida, a la altura de la calle Isla Floriana, hace una curva con radio 300m a la izquierda, y metiéndose por debajo de edificaciones cruza la avenida Gaspar Villaroel realizando otra curva a derechas con también radio 300m. Desde ahí siguió el curso por la calle Japón, y antes de llegar a la estación de Iñaquito, volvió a girar a la izquierda con radio 600m. En esta tramo se tuvo en cuenta los pasos debajo de edificaciones.

La litología en este subtramo corresponde principalmente a la Fm. Cangahua, (Cl, limo-arcillosa y de nuevo un pequeño lentejón más granular de Ca). Los depósitos La Carolina (Fl, Ca) apareció a techo de la sección puntualmente, siendo la litología predominante de la cobertera del subtramo. Seguidos de suelos fundamentalmente arcillo-limosos de relativa muy alta permeabilidad.

Al inicio del subtramo, entre los PP.KK 30+320 y 30+140 y a la entrada en la estación de Iñaquito es cuando aparece en la clave de la sección de excavación los depósitos Canguahua, siendo el 80-90% restante de la sección los materiales limo-arcillosos de la Fm. Cangahua. El resto del subtramo se excava principalmente en Fm. Canhagua limo-arcillosa.

En este subtramo la cobertera por encima de la clave del túnel varío desde los 13m en la estación Jipijapa, asciende hasta los casi 24m en la zona central para descender y acabar en los 11m en la estación de Iñaquito.

El nivel freático se encuentra desde la estación de Jipijapa hasta el P.K 29+340 por encima de la sección del túnel, entrando dentro de la sección a partir de aquí hasta el final del subtramo con mucha agua freática cambiante por ello la necesidad de realizar diferentes tratamientos para el mejoramiento del terreno para el paso de la tuneladora.

TRAZADO GENERAL

TRAMO A ESTUDIAR

1401.07m

TRAMO ESTACIÓN IÑAQUITO-LA CAROLINA



ESTACIÓN LA CAROLINA (AV. ELOY ALFARO Y REPÚBLICA)



PISTA DE ATLETISMO, PARQUE LA CAROLINA



ESTACIÓN IÑAQUITO (AV. NACIONES UNIDAS Y JAPÓN)



CENTRO COMERCIAL MALL EL JARDÍN



CENTRO COMERCIAL IÑAQUITO

Este tramo se desarrolló entre los PK. 29+104,62 y 27+703,55, con una longitud total de 1.401,07 metros, que corresponde al avance de 934,05 anillos desde la salida de la estación de Iñaquito hasta la llegada a la estación de La Carolina. Se desarrolló en su totalidad dentro del parque La Carolina, donde se encuentran numerosas instalaciones deportivas, parkings, museos y otras instalaciones públicas. La litología en este subtramo correspondió principalmente a la Fm. Cangahua, (Cl, limo-arcillosa, apareció de nuevo un pequeño lentejón más granular de Ca), y los depósitos de La Carolina vuelven a tener más representación en el techo de la sección de excavación a la salida de la estación Iñaquito. También formación Cangahua, Cag, en la segunda parte del subtramo a partir del PK 28+200 aproximadamente. Los depósitos de Cangahua (Fl, Ca) aparecen a techo hasta el PK 28+780 aproximadamente, siendo también la litología predominante de la cobertera del subtramo. Seguimos en suelos fundamentalmente arcillo-limosos de baja permeabilidad. En este subtramo la cobertera por encima de la clave del túnel fue desde los 11m en la estación Iñaquito, asciende hasta los 24m en el PK 28+260, y vuelve a descender y acabar en los 12m entrando en la estación de la Carolina. El nivel freático se encuentra desde la estación de Iñaquito hasta el PK 28+890 dentro de la sección de excavación del túnel, para a partir de ahí mantenerse por encima de la clave hasta el final del subtramo, alcanza los 11m en la zona central del subtramo, y volvió a entrar en sección en el PK 27+880, antes de entrar en la estación de la Carolina. En este tramo no se registró ningún problema para excavarlo, solo se realizó un tratamiento de Jet Grouting para el paso del tramo.

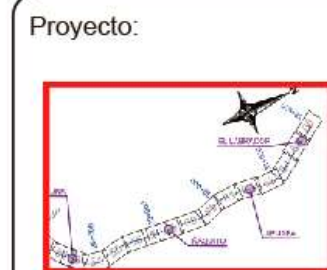


UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS
Escuela de Tecnología en Construcciones y Domótica

PROYECTO DE TITULACIÓN
TRATAMIENTO Y SOLUCIÓN DE PROBLEMAS CONSTRUCTIVOS EN EXCAVACIÓN SUBTERRÁNEA

Autor:
HECTOR ANDRÉS MORA CARPIO

Contenido:
INFORMACIÓN TRAMO 3



Profesor guía:
Arq. Francisco Zaldumbide

Fecha:

Lámina:

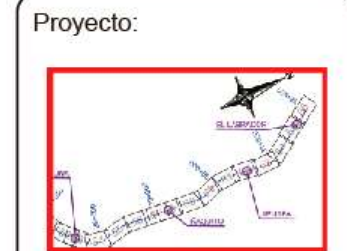


UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS
Escuela de Tecnología en Construcciones y Domótica

PROYECTO DE TITULACIÓN
TRATAMIENTO Y SOLUCIÓN DE PROBLEMAS CONSTRUCTIVOS EN EXCAVACIÓN SUBTERRÁNEA

Autor:
HECTOR ANDRÉS MORA CARPIO

Contenido:
TRAZADOS GENERALES



Profesor guía:
Arq. Francisco Zaldumbide

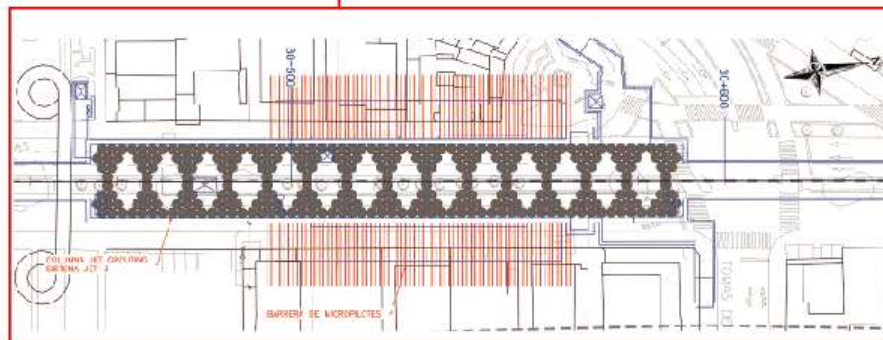
Fecha:

Lámina:

TRATAMIENTOS EN SUBTRAMO 1 ESTACIÓN EL LABRADOR-JIPIJAPA

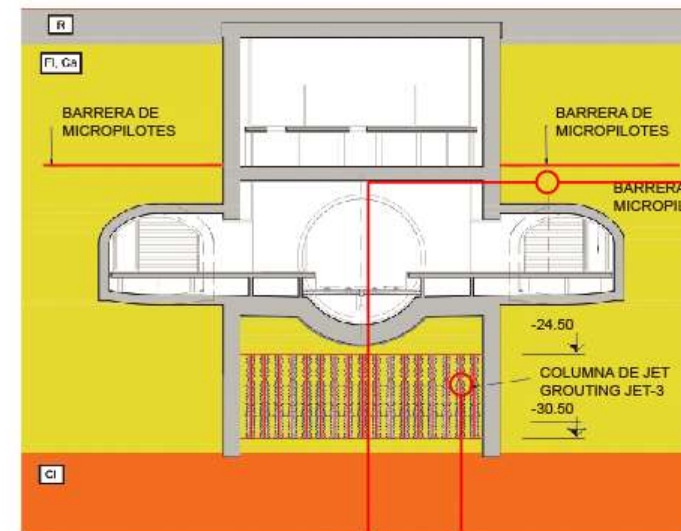


SECCIÓN EN PLANTA

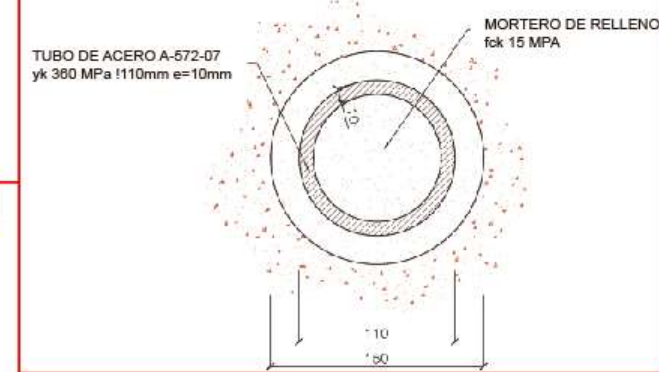


Se realizó tratamiento de jet gouting y micropilotes para evitar daños estructurales en estación jipijapa por el paso de la tuneladora a consecuencia del peso de la misma y el alto nivel freático.

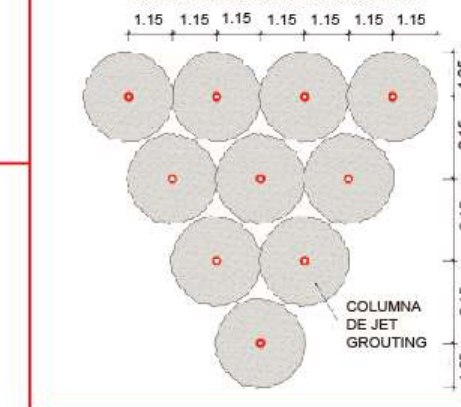
SECCIÓN TRANSVERSAL DE ESTACIÓN



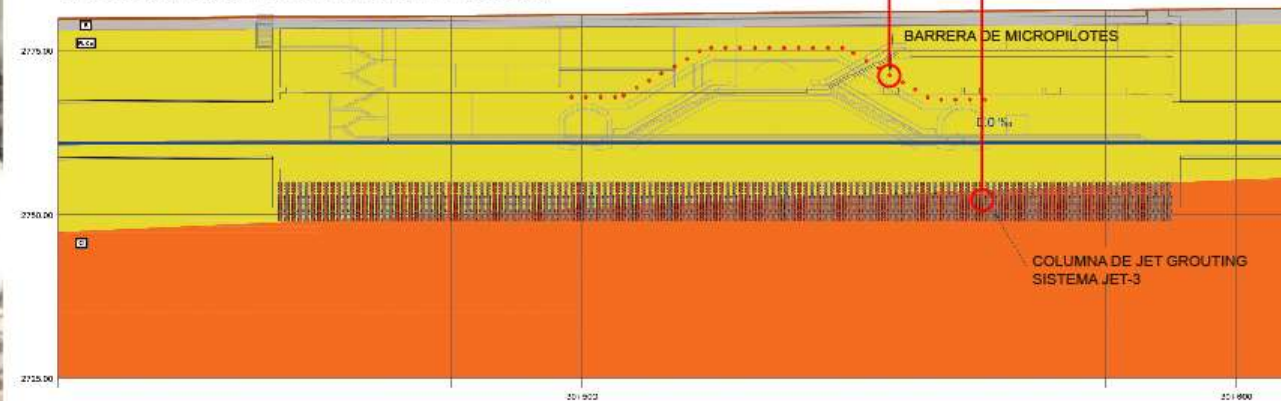
DETALLE DE MICROPILOTE



DETALLE DE JET GROUTING

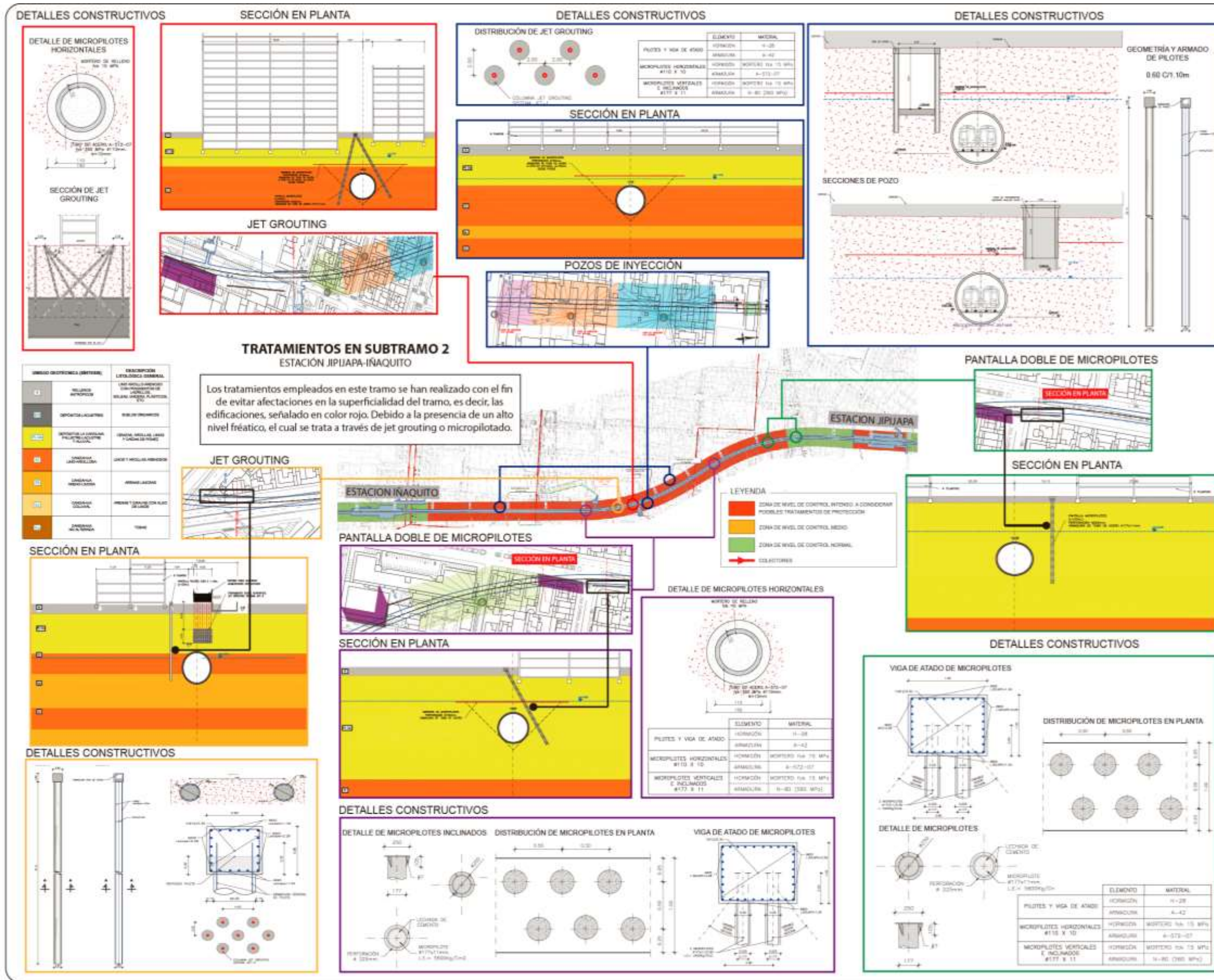


SECCIÓN LONGITUDINAL EN ESTACIÓN



FOTOGRAFÍA DE TUNELADORA EN ESTACIÓN JIPIJAPA

	ELEMENTO	MATERIAL
PILOTES Y VIGA DE ATADO	HORMIGÓN	H-28
	ARMADURA	A-42
MICROPILOTES HORIZONTALES #110 X 10	HORMIGÓN	MORTERO f'ck 15 MPa
	ARMADURA	A-572-07
MICROPILOTES VERTICALES E INCLINADOS #177 X 11	HORMIGÓN	MORTERO f'ck 15 MPa
	ARMADURA	N-80 (560 MPa)



PROYECTO DE TITULACIÓN
TRATAMIENTO Y SOLUCIÓN DE PROBLEMAS CONSTRUCTIVOS EN EXCAVACIÓN SUBTERRÁNEA

Autor:
HECTOR ANDRÉS MORA CARPIO

Contenido:
TRATAMIENTOS EN SUBTRAMO 2



Profesor guía:
Arq. Francisco Zaldumbide

Fecha:

Lámina:

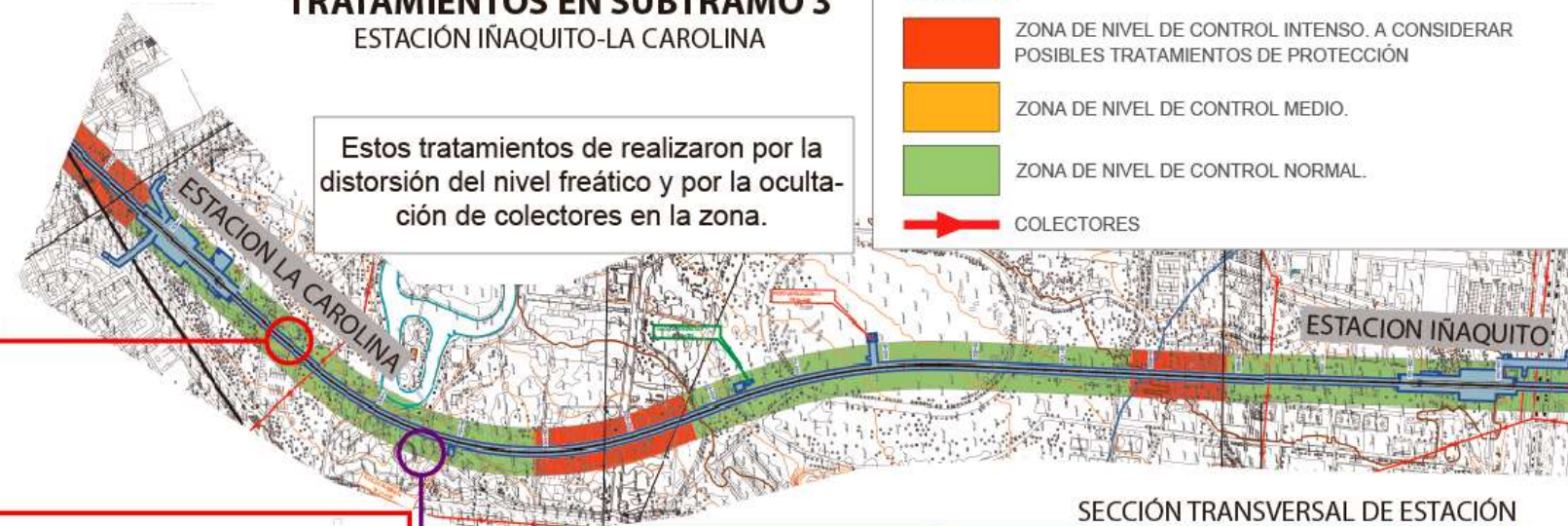
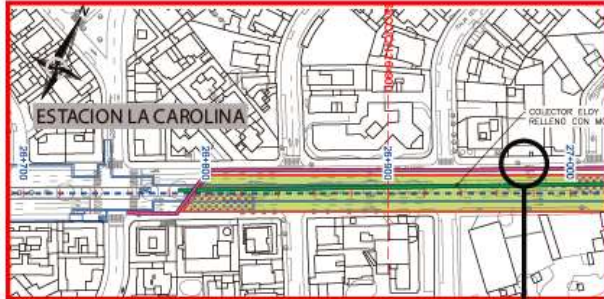
TRATAMIENTOS EN SUBTRAMO 3 ESTACION IÑAQUITO-LA CAROLINA

LEYENDA

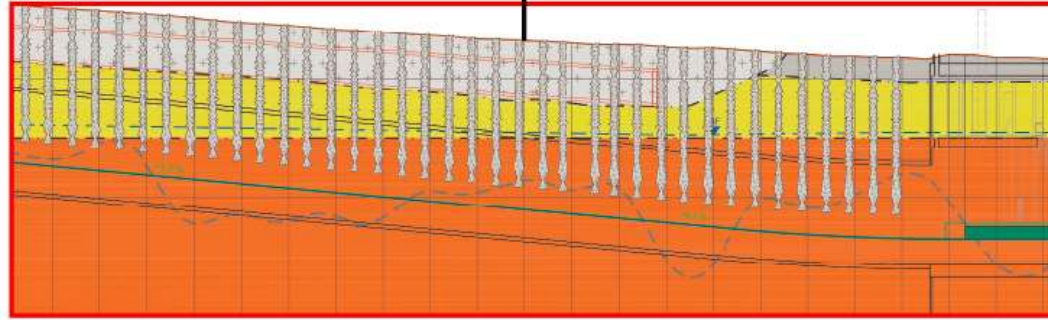
- ZONA DE NIVEL DE CONTROL INTENSO. A CONSIDERAR POSIBLES TRATAMIENTOS DE PROTECCIÓN
- ZONA DE NIVEL DE CONTROL MEDIO.
- ZONA DE NIVEL DE CONTROL NORMAL.
- COLECTORES

Estos tratamientos se realizaron por la distorsión del nivel freático y por la ocultación de colectores en la zona.

JET GROUTING



PERFIL LONGITUDINAL

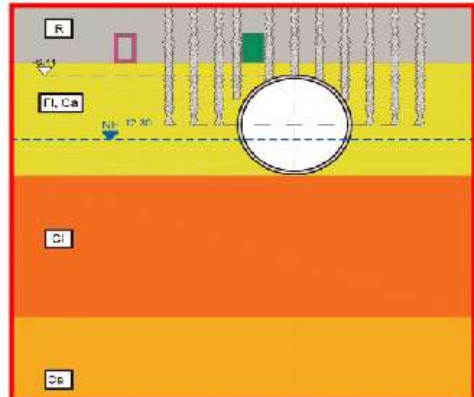


SECCIÓN TRANSVERSAL DE ESTACIÓN

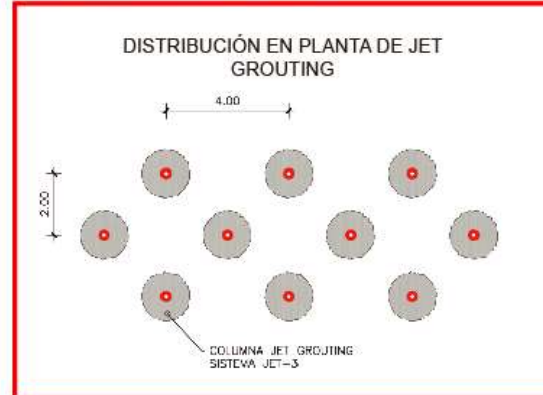


UNIDAD GEOTÉCNICA (SÍNTESIS)	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA GENERAL
RELLENOS ANTROPICOS	LIMO ARCILLO-ARENOSO CON FRAGMENTOS DE LADRILLOS, BOLSAS, MADERA, PLÁSTICOS, ETC.
DEPOSITOS LACUSTRES	SUELOS ORGANICOS
DEPOSITOS LA CAROLINA PALUSTRE-LACUSTRE Y ALUVIAL	CENIZAS, ARCILLAS, LIMOS Y CADAS DE POMEZ
CANGAHUA LIMO-ARCILLOSA	LIMOS Y ARCILLAS ARENOSOS
CANGAHUA ARENO-LIMOSA	ARENAS LIMOSAS

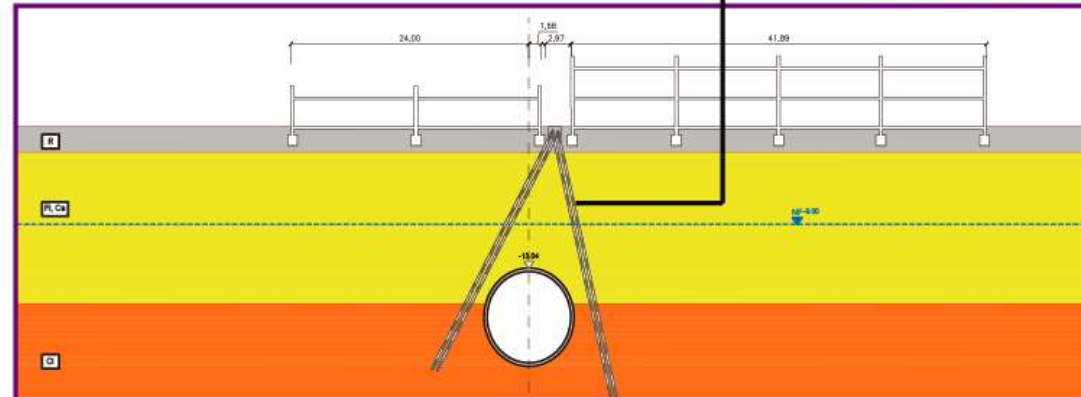
SECCIÓN EN TÚNEL



DETALLES CONSTRUCTIVOS



SECCIÓN EN TÚNEL



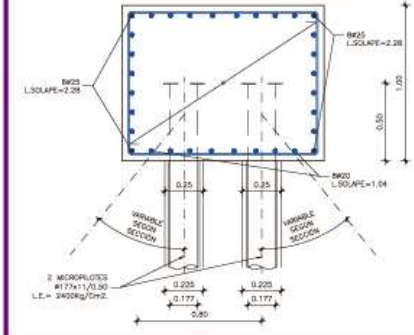
TRATAMIENTO EN PANTALLA DE JET GROUTING



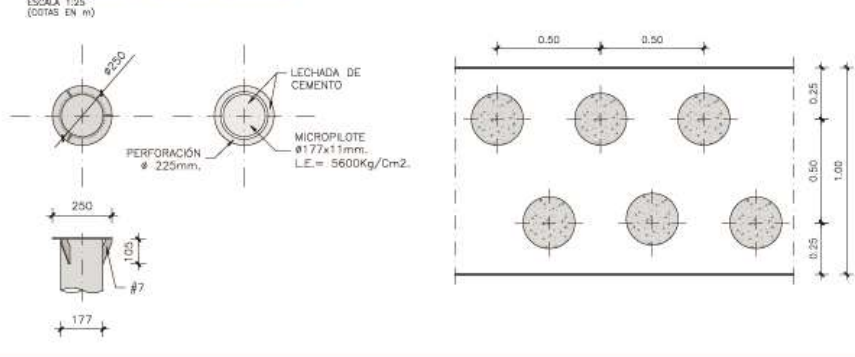
MICROPILOTE PARA EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA



VIGA DE ATADO DE MICROPILOTES
DEFINICIÓN DE ARMADO



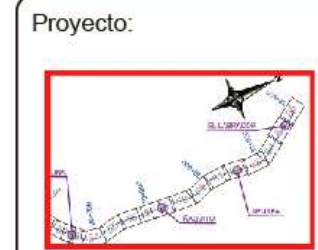
DETALLE MICROPILOTES



PROYECTO DE TITULACIÓN
TRATAMIENTO Y SOLUCIÓN DE PROBLEMAS CONSTRUCTIVOS EN EXCAVACIÓN SUBTERRÁNEA

Autor:
HECTOR ANDRÉS MORA CARPIO

Contenido:
TRAZADOS GENERALES



Profesor guía:
Arq. Francisco Zaldumbide

Fecha:

Lámina:

7.3 PATOLOGÍAS Y SOLUCIONES A PROBLEMAS POR LA EJECUCIÓN DE TUNEL CON TUNELADORA TBM EN EL TRAMO LABRADOR– CAROLINA

En la excavación del túnel de estos subtramos la ejecución se lleve a cabo bajo condiciones normales, es decir, que los parámetros característicos se ubiquen dentro del rango de valores admisibles. Sin embargo, al trabajar en condiciones de frentes mixtos es muy probable que se presenten situaciones anómalas en las distintas etapas de la excavación del túnel, las cuales impactaron en un retraso general de la obra y en dificultades económicas, además de que comúnmente conducen a trabajos complementarios para afrontarlos. Algunas dificultades están asociadas a aspectos como la inestabilidad en el frente y a la presencia abundante de agua en el terreno.

Otros problemas de carácter técnico y operacional de la tuneladora están asociados al desgaste excesivo de las herramientas de corte, dificultades diversas en la cabeza de corte, desgaste de los cepillos y dificultad en el sistema de transporte de la rezaga. Igual de importantes resultan problemas relacionados al comportamiento del entorno excavado atrapamiento de la tuneladora, desviaciones, así como asentamientos.

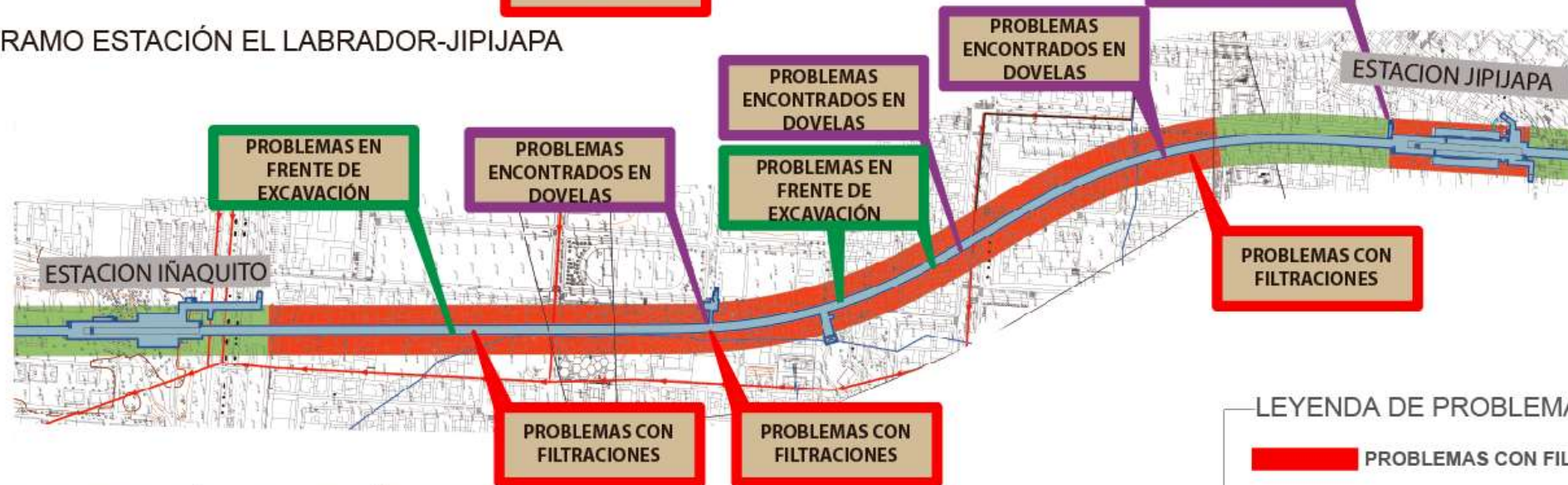
En las siguientes subsecciones se detallan las causas de algunos de estos problemas y se describen aspectos importantes a considerar para su prevención y corrección.

7.3.1 PLANO DE IDENTIFICACIÓN DE PATOLOGÍAS Y SOLUCIONES POR SUBTRAMOS

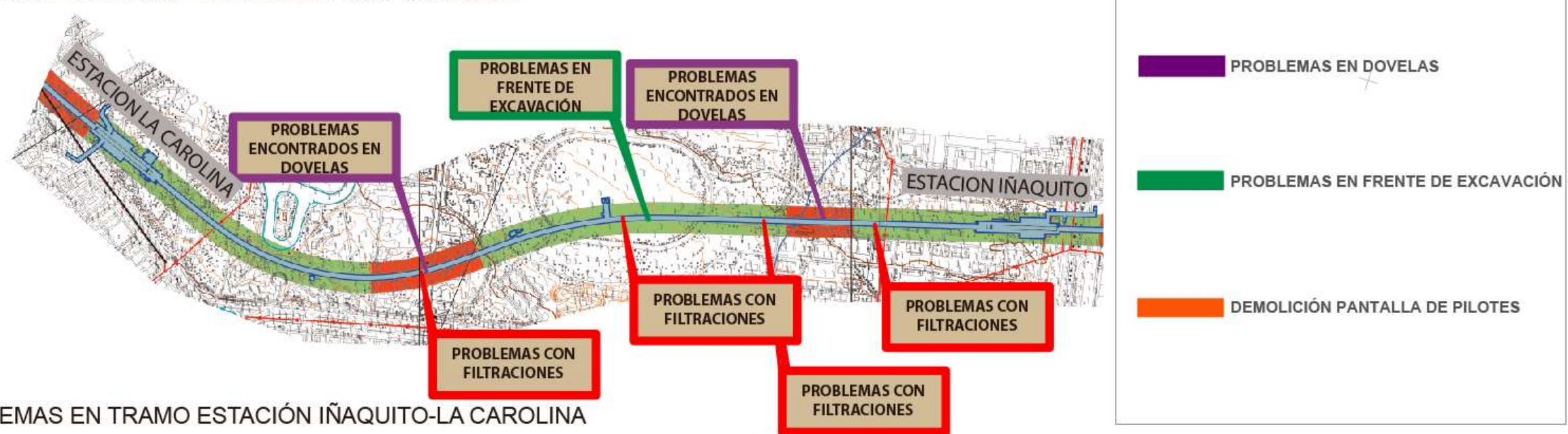
LOCALIZACIÓN DE PROBLEMAS EN MODELO DE ESTUDIO POR TRAMOS



PROBLEMAS EN TRAMO ESTACIÓN EL LABRADOR-JIPIJAPA



PROBLEMAS EN TRAMO ESTACIÓN JIPIJAPA-IÑAQUITO



PROBLEMAS EN TRAMO ESTACIÓN IÑAQUITO-LA CAROLINA



ESCUELA DE TECNOLOGIA EN CONSTRUCCIONES Y DOMÓTICA

PROYECTO DE TITULACIÓN
TRATAMIENTO Y SOLUCIÓN DE PROBLEMAS CONSTRUCTIVOS EN EXCAVACIÓN SUBTERRÁNEA

Autor:
HECTOR ANDRÉS MORA CARPIO

Contenido:
TRAZADOS GENERALES



Profesor guía:
Arq. Francisco Zaldumbide

Fecha:

Lámina:

7.3.2.1 PANTALLAS Y PILOTE CON ESFUERZO A TRACCION Y COMPRESION CON HORMIGON ARMADO

Al empezar la excavación con tuneladora tipo EPB donde maneja presión de tierra, el primer procedimiento es demoler una pantalla de pilotes, esta pantalla en el caso de la estación El Labrador fue diseñada de hormigón armado la cual la tuneladora no puede pasar por el desgaste masivo de herramienta de corte por la fuerza de tracción y compresión que caracteriza a este elemento.



Figura 57: Emboquille de tuneladora en pantalla

PILOTE: Considerado un elemento resistente a los esfuerzos de tracción y compresión; usado para las cimentaciones, con componentes como acero de 32 mm en el interior del taladro, usado para la inyección del cemento.

Actualmente la Tuneladora se encuentra parada en el primer anillo, donde se ha detenido la perforación en el interior de una zona estabilizada con pilotes que permite el acceso a la rueda en condiciones atmosféricas y seguras. Para el avance y aseguramiento de las condiciones físicas de la rueda de corte se requiere la demolición

previa de un pilote con armadura de acero que se encuentra a 1,6 m del hastial izquierdo de la tuneladora.



Figura 58: Corralito de pilotes salida de tuneladora

Tomado de: Zabala, Sánchez, & Matallana (2012)

Mediante la ayuda de ingeniería se definió los pasos a seguir para la demolición de la pantalla de pilotes en estación de un espesor de 60cm con hierro de 32mm. El procedimiento no podría ser tan agresivo ya que podría fisurar el frente de excavación por lo que se determinó el siguiente proceso.

Para la demolición tuvimos una máquina de corte de hormigón con características suficientes para permitir mejorar los trabajos, lo primero que necesitamos es delimitar el área que se va a demoler.



Figuras 59: Máquinas de Corte Husqvarna para corte de hormigón con disco e hilo diamantado

Tomado de: Galleria di Base del Brennero - Brenner Basistunnel BBT (2020)

PROCEDIMIENTO: El primer paso es realizar un surco de guía. A través de incidir con un disco de 3-7 cm de diámetro, luego se realiza el corte el surco de guía. La aceleración de la herramienta no debe ser alto y muy cuidadoso para conseguir un corte recto y facilitar la secuencia de los cortes.



Figura 60: Corte guía de pantalla de pilotes

Los discos para los cortes pueden ser de 1000 mm, no obstante, para empezar, se prefiere de 800 mm. que es suficiente para la demolición de esta pantalla de pilotes, se puede continuar con surcos y corte más profundos que se miden según el caso , sobre todo de pendiente de la dureza del hormigón.

Para la extracción de bloque de hormigón de 0.9mts x 0,9mts x 0,6mts de espesor, cada pieza de 1 y un peso de 1.120 kg se realizará en varios pasos:

1. Trazado de las zonas que hay que cortar para marcar intersecciones entre los diferentes bloques a desmontar.

2. Anclaje de máquina e inicio de los cortes con disco diamantado siempre desde abajo hacia arriba, iniciando por el corte de abajo, luego se debe realizar el corte horizontal de la parte de arriba. Como paso final se debe realizar los dos cortes en forma vertical. Si no se guarda este orden, la pieza de trabajo puede caer y apretar el disco, para el final del último corte, la sierra debe colocarse en una pared fija que esté unida.
3. Colocación de los pernos de elevación según indicara las mediciones de equilibrio de peso o realización de 2 perforaciones en el centro de la pieza según indicara las mediciones de equilibrio de peso, para ser enganchada mediante cadenas.
4. Elevación y evacuación de cada una de las piezas obtenidas después de los cortes mediante medios mecánicos.

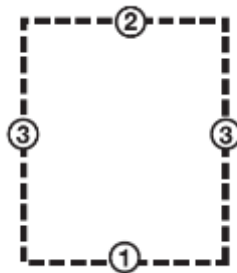


Figura 61: Pasos

Tomado de: Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México (2009)

7.3.2.2 SOLUCIÓN DE PASO DE PANTALLAS PARA TUNELADORA

Para evitar atravesar obstáculos estructurales, se han desarrollado muros o pilotes con refuerzos a atracción de material compuesto por fibra de vidrio. El comportamiento elástico ante la ruptura de la barra de fibra de vidrio permite que la tuneladora atraviese la estructura de hormigón sin encontrar mayor resistencia que el hormigón armado.

El estudio en un patrón de refuerzo de fibra de vidrio presenta diferencias mínimas cuando se lo compara con la versión de acero.



Figura 62: Pilotes de estructura vibra de vidrio

Tomado de: VROD (2019)



Figura 63: Cale de tuneladora en pantalla de pilotes

Tomado de: Zabala, Sánchez, & Matallana (2012)

7.4 PROBLEMAS DE DOVELAS

Durante la excavación del tramo se encontró fallas en el método de revestimiento de dovelas ya que este procedimiento todavía tiene inconvenientes por la magnitud de presión ejercida sobre ellas al momento de excavar. Método desarrollado como un método para excavar túneles en suelos blandos. El escudo, además de sostener el

terreno, tienen la finalidad de proteger buena parte de los equipos y de facilitar el montaje de los anillos formados por las dovelas, durante el montaje y excavación de dieron patologías básicas como:

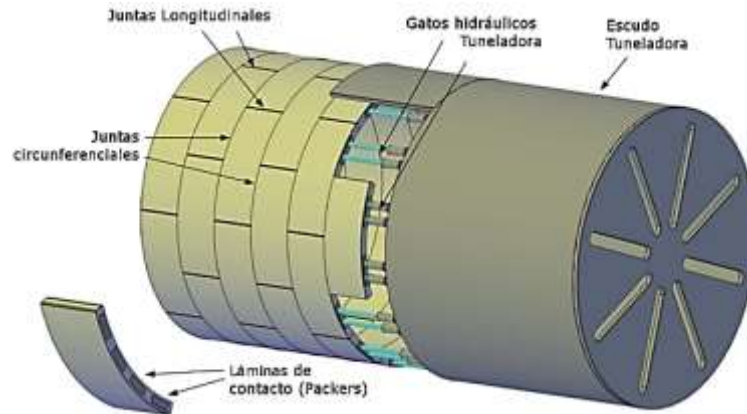


Figura 64: Partes de un revestimiento con tuneladora

Tomado de: Oriol Arnau (2020)

7.4.1 FISURAS DE DOVELAS

Durante la etapa constructiva del túnel revestido por dovelas los factores de aparición de fisuras y daños locales en las dovelas, tales como las imperfecciones de forma que se derivan de las tolerancias de construcción, las variables en el contacto entre dovelas y el empuje de los gatos hidráulicos durante el montaje, entre otras.

Aun cuando estas fisuras en algunos casos llegan a ser imperceptibles por la vista, es posible que no representen un peligro desde el punto de vista estructural.



Figura 65: Fisura de dovelas producidas por mucha presión

Tomado de: Oriol Arnau (2020)

Por aspectos de durabilidad pueden ser afectados a altos niveles de carga, debido a una combinación de condiciones desfavorables pueden ser de gran relevancia en el comportamiento estructural del túnel en cuestión.

7.4.2 DEFICIENCIAS POR FABRICACION DE DOVELAS

El prefabricado de hormigón, al igual que en cualquier otro proceso industrial, se produce piezas con ligeros defectos o desviaciones en las medidas o formas geométricas. Estos defectos son los causantes habituales de las deficiencias de contacto entre las dovelas.

Las deficiencias de contacto pueden no parecer excesivamente perjudiciales, dado su pequeño rango de medida milimétrica. Pero estas suelen ser suficientes para que aparezcan condiciones de contacto inadecuadas haciendo que las dovelas trabajen de forma diferente para la que han sido diseñadas y aparezcan esfuerzos perjudiciales a la estructura y pudiéndose producir grietas, desprendimientos e imperfecciones.

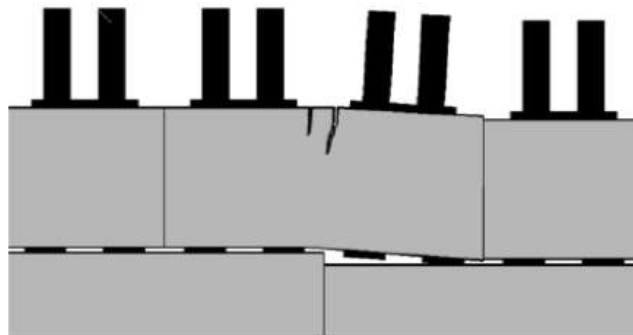


Figura 66: Condición de contacto inadecuada en dovelas

Tomado de: Galleria di Base del Brennero - Brenner Basistunnel BBT (2020)

Para resolver este problema es necesario tenerlo en cuenta desde un principio, es necesario establecer unos límites de tolerancias que no comprometan la seguridad

estructural durante el proceso constructivo ni a lo largo de su uso. Incurrir en el error de establecer unas tolerancias realmente restrictivas y precisas provocará un aumento exponencial en los costes de fabricación, ya que obtener tolerancias del orden de escasos milímetros en el hormigón es realmente complicado, además de aumentar la dificultad de montaje del anillo, sobre todo a la hora de colocar la dovela clave (última dovela en ser montada y al cerrar el anillo permite que este pueda entrar en carga).

7.4.3 COMPORTAMIENTO DE JUNTAS ENTRE DOVELAS

Durante el montaje de los anillos se coloca la junta entre dovelas para el blindaje del túnel. A los elementos de contacto ubicados en las juntas entre dovelas se les denomina “packers”, y son utilizados tanto en juntas radiales como longitudinales; siendo más importantes en las radiales y propensos a generar problemas ya que se ven sometidos a grandes esfuerzos de compresión al recibir todo el empuje horizontal realizado por los gatos para el avance de la tuneladora.

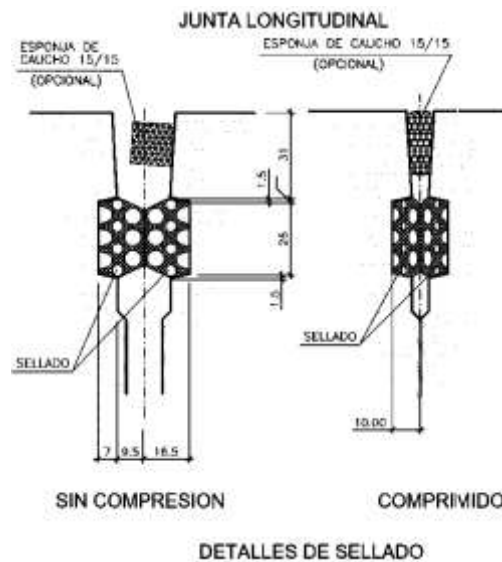


Figura 67: Detalles de sellado

Tomado de: Grupo Acciona (2016)

Los *packers* se pueden definir de forma general como *elementos que suavizan y distribuyen los esfuerzos en la interface de las diferentes dovelas*. (Junca Ubierna, 1997)

Para la correcta realización de esta transmisión, tres conceptos son fundamentales y se comentan a continuación.

Debido a que los elementos de unión utilizados normalmente (como son los pernos, bulones y conexiones macho-hembra) tienen holguras para poder realizar el montaje, estos no trabajan estructuralmente hasta que se producen unos desplazamientos mínimos. De esta forma son los “packers” los encargados de transmitir todas las cargas hasta que se estabiliza la estructura.

Otro objetivo que cumplen los denominados “packers”, es el de distribuir la carga de forma uniforme por la superficie evitando así la aparición de concentración de tensiones, cargas excéntricas o tensiones tangenciales nocivas debidas a posibles defectos en las dovelas o en su colocación.

Otra función es repartir las cargas a la parte central de la dovela donde el hormigón está armado para así evitar que las zonas de recubrimiento trabajen reduciendo fisuras.



Figura 68: Detalle de packers en dovelas

Tomado de: Soto Saavedra (2014)

El “packer” es *suficiente para minimizar las irregularidades del acabado superficial del hormigón, mantener un espesor mínimo tras la aplicación de las cargas.* (Saavedra L., 2014)

Otro factor determinante es realizar un hormigón autocompactante, teniendo en cuenta la experiencia obtenida en investigaciones previas el uso de hormigones autocompactantes con fibras sintéticas convierte en una alternativa para reducir considerablemente la probabilidad de fisuras y daños locales, independientemente de las causas que las generan.

7.4.4 OVALACIÓN Y MOVIMIENTOS SOBRE LOS ANILLOS DE COLA

Los radios mínimos de trazado y la pendiente longitudinal son aspectos que afectan en las operaciones y guiado de la máquina. La resultante de los empujes de los gatos sobre el anillo de dovelas presenta una excentricidad respecto del eje del túnel cuando se está en el desarrollo de una curva. También se producen empujes asimétricos cuando se pretende corregir con los gatos de empuje la tendencia a la rotación del escudo (contrarrotación).

Una relación alta entre el diámetro del túnel y el espesor de la dovela le confiere al anillo una mayor facilidad para la ovalización en el montaje o cuando éste soporta esfuerzos no homogéneos en su perímetro.

A la salida del escudo el anillo tiende a experimentar un cierto movimiento ascendente (flotabilidad) que depende de sus dimensiones y espesor, así como de las condiciones en las que se realiza la inyección.

En zonas de curvas de pequeño radio pueden producirse situaciones desfavorables en determinadas circunstancias donde el anillo sufra coacciones puntuales de la TBM al ser expulsado por la cola del escudo. El procedimiento de montaje que se use y los métodos singulares de elección de la posición del anillo universal son cuestiones que influyen significativamente en la ovalización y rozamiento del anillo con la cola del escudo.

En el momento en el que el anillo sale por la cola del escudo recibe de forma directa la presión del mortero de inyección. *En la medida en la que la inyección de mortero no resulte regular e hidrostáticamente homogénea a lo largo del perímetro del anillo se producirán empujes y posibles movimientos asimétricos sobre el mismo.* (Saavedra L., 2014)

Todas estas circunstancias hacen que sean los anillos más próximos a la cola del escudo los que pueden verse sometidos a esfuerzos y movimientos localizados que es necesario controlar a fin de obtener una buena geometría del revestimiento, reducir al máximo posible los resaltos entre dovelas y anillos y evitar la rotura de los elementos de conexión entre anillos y dovelas (biconos y tornillos).

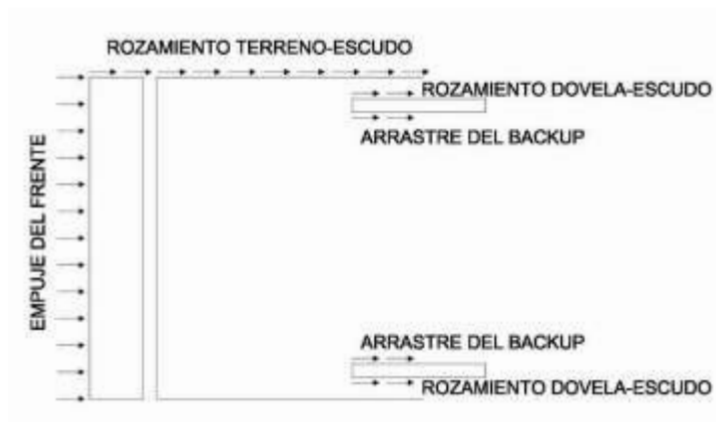


Figura 69: Rozamiento entre empuje de maquina con anillo o revestimiento

Tomado de: Zabala, Sánchez, & Matallana (2012)

7.4.5 PROBLEMAS CON FILTRACIONES

La filtración en el túnel en la parte norte del metro de Quito independiente del factor principal la permeabilidad del terreno y su gran cantidad de agua en su nivel freático, se realizaron por algunos aspectos constructivos que no se los tomaron muy en cuenta al realizar los procesos de excavaciones a continuación describiremos las causas de dichos fallos.

7.5 INYECCIÓN MORTERO DE ANILLOS EN LA COLA DEL ESCUDO

Esta actividad tiene una gran importancia en los túneles realizados con TBM y, en particular, en los ejecutados con máquinas del tipo EPB. La inyección se debe controlar en detalle para reducir en lo posible los asentamientos, filtraciones y ovalamiento provocados por el túnel, para minimizar los esfuerzos asimétricos que se pueden producir sobre el anillo a la salida del escudo y para reducir al máximo los resaltos y movimientos que puede experimentar el anillo en las proximidades de la cola del escudo. Una inyección adecuada del anillo también puede contribuir a mejorar la conducción de la EPB.

Cuando se opera en modo cerrado es fundamental mantener una sincronización perfecta entre el avance de la EPB y la inyección del mortero por la cola del escudo. También existen otros sistemas de inyección sin arena, *a base de una mezcla de cemento bentonita al que se le añade un estabilizador. La mezcla se mantiene estable un período de tiempo largo y se puede bombear a grandes distancias.* (De Rivaz, 2011) Finalmente, se le añade un aditivo acelerante justo a la salida por la cola del escudo que provoca el inicio de fraguado de forma prácticamente inmediata (sistema japonés).

Las propiedades que deben reunir los morteros para la inyección del trasdós de los anillos son básicamente:

- Buena bombeabilidad y fluidez (distancias 3km – 5km).
- Tiempo de trabajabilidad adecuado (4 h – 24 h).
- Desarrollo rápido de resistencias mecánicas.
- Baja exudación (< 1%).
- Resistencia al lavado por el agua del terreno.
- Sin retracción plástica.
- Durabilidad.
- Fácil de limpiar en las líneas de inyección.

Existen en el mercado aditivos apropiados para potenciar en los morteros las propiedades indicadas. En la Tabla 1 se muestra la dosificación básica (a falta de aditivos) empleada en el tramo Labrador- La Carolina Metro de Quito, donde se utilizó un mortero rico en cemento, y el rango de variación de las dosificaciones básicas empleadas en otros túneles.

Tabla 11: Dosificación básica del mortero en el tramo Labrador–La Carolina

Tomado de: Zabala, Sánchez, & Matallana (2012)

	L-9 tramo IV (Kg/m³)	Otros Túneles (Kg/m³)
Cemento	250	50 - 100
Cenizas	-	0 – 280
Arena + Filler	1.680	1.450 – 1.560
Filler	240	0 - 340
Agua	280 – 300	270 – 350
Bentonita	-	0 – 20

La inyección debe realizarse controlando tanto el volumen como la presión en cada una de las líneas de mortero. Es habitual fijar el final de la inyección estableciendo un rechazo por presión después de haber superado un volumen de inyección prefijado y próximo al valor teórico del hueco generado con el avance de un anillo. La presión de inyección mínima que se establece es normalmente superior en 0,5 – 1,5 bar a la presión dada en la cámara de escombro.

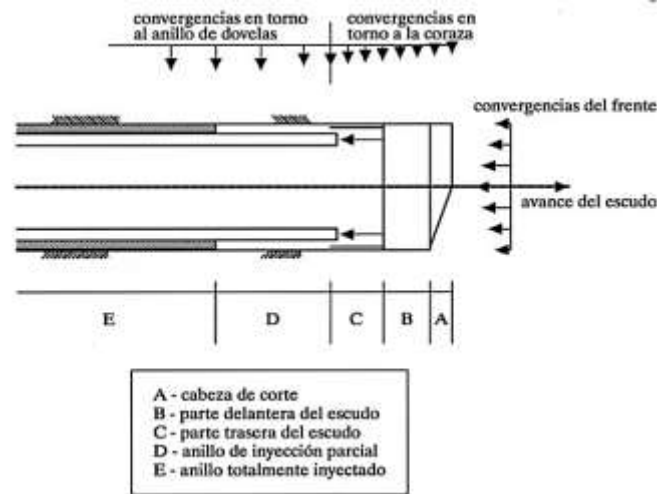


Figura 70: Inyección

Tomado de: Zabala, Sánchez, & Matallana (2012)

El objetivo que se debe perseguir es que la inyección se realice con caudales homogéneos en todas sus líneas, *que éstas estén todas operativas y que las presiones de inyección en las distintas líneas supongan un gradiente razonablemente ajustado a la cota que guarda cada una de ellas en la cola del escudo* (Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México, 2009), y todo ello con una perfecta sincronización con el avance de la excavación.

Es importante programar y mantener un adecuado suministro de mortero a la máquina y una limpieza continuada de las líneas de inyección ya que se obturan muy

rápido y parando la calidad de la inyección dejando tramos sin inyección por lo cual pueden causar diversas patologías según los diversos factores a reaccionar.

Esquema de la junta de cepillos – grasa de un escudo

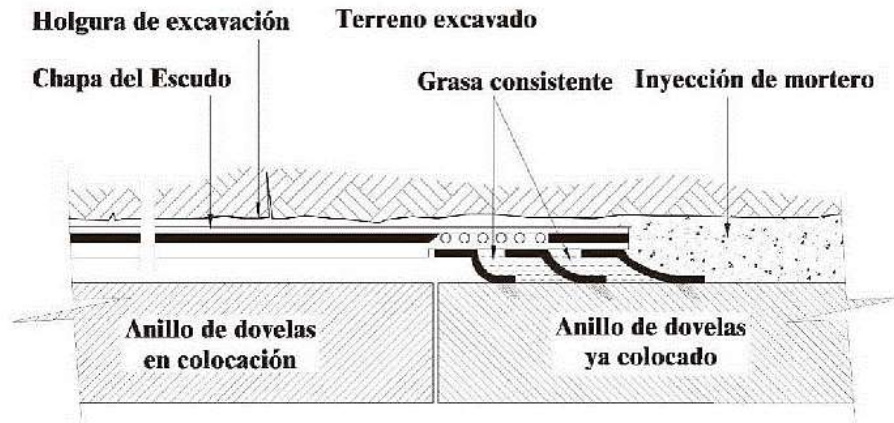


Figura 71: Esquema de la junta de cepillos - grasa de un escudo

Tomado de: Zabala, Sánchez, & Matallana (2012)

7.5.1 INYECCIÓN Y TRATAMIENTOS EN TERRENOS PARA FILTRACIONES

En general en todos los tratamientos después del paso de la tuneladora son las inyecciones de aditivos resistentes a altas presiones para mejorar la calidad del terreno, identificar la filtración para su tratamiento es un arte que la experiencia, distinguir entre inyecciones diversas en suelos con el objetivo de modificar el trasdós del túnel con el objetivo de:

- Aumentar la resistencia a la compresión y al corte
- Impermeabilizar
- Rellenar
- Compactar

La solución constructiva para sellado de túneles con elevadas filtraciones de agua se realiza con un sistema combinado formado por morteros de fraguado instantáneo,

espumas acurreactivas de inyección de alta y baja expansividad, y morteros flexibles a base de cemento.

En suelos de Quito es relativamente más fácil inyectar resinas que productos en base cemento como mortero o lechadas, al ser productos exentos de cargas de áridos como filler o arena, pero no siempre son los más efectivos.

En filtraciones donde hay mucho aporte el tratamiento que actuó con mayor eficiencia fue la inyección de lechada por la facilidad de absorción de fluido donde se llevaba el trasdós fácilmente, las temperaturas no extremas permitían el fraguado correcto.

Los objetivos buscados es el aumento de la densidad, de la resistencia al corte, mejora de la estabilidad, reducción de la compresibilidad, impermeabilizar y consolidar para evitar el lavado de finos y mejorar la homogeneidad del suelo para reducir así la filtración.

En general la porosidad (% de huecos) de un suelo arenoso fue de un 25 % a un 35% del volumen total (para el cálculo de consumos) (Pialarissi Cavalaro, 2009). Las distancias entre perforaciones se realizaron mediante ensayo in situ siendo normal

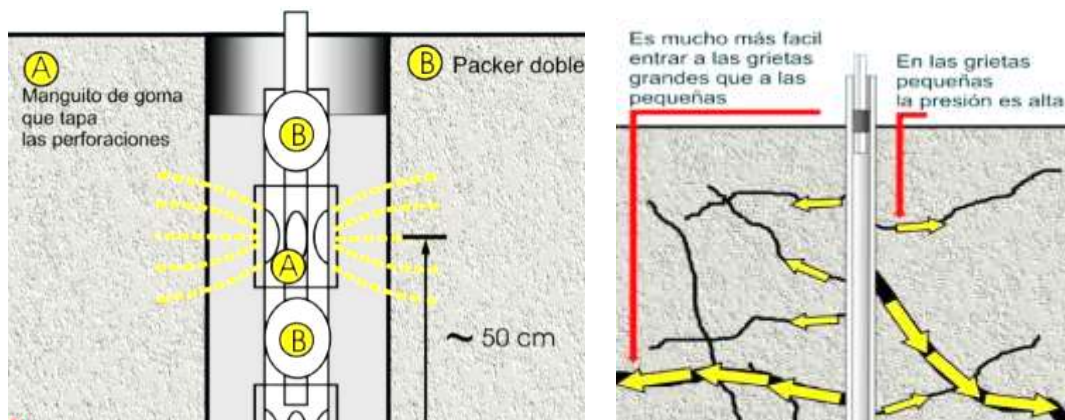


Figura 72: Detalle de inyección de aditivo bicomponente en filtración por la dovela

Tomado de: Zabala, Sánchez, & Matallana (2012)

separaciones de 0,8 a 1,5 metros. Las presiones de inyección se ejecutaron entre 5 y 30 bares según la cantidad que se iba inyectando y de la profundidad entre 0.25 a 0.50 cm variando según la gravedad.

Las técnicas serán describir con las distintas fases y productos de inyección, así como sus distintos campos de aplicación y técnicas en función del objetivo, tipo de filtración. Existe una gama de productos de inyección que abarcan los sistemas de inyección de productos en base poliuretano, cada uno de ellos con un campo de aplicación determinado según el objetivo buscado, ya sean inyecciones de consolidación, estabilización de terrenos y relleno de suelos.



Figura 73: Técnica de Inyección por filtración

7.6 ANÁLISIS PREVIO Y CAMPO DE APLICACIÓN DE INYECCIÓN

Las planificaciones son la base para que las variables técnicas y económicas, sean medidas e implementadas con eficiencia, para la elección de la técnica y del producto más idóneo, se debe tomar en cuenta el tipo de terreno o soporte en el cual se va a realizar la inyección. En el caso de terrenos y macizos rocosos, se debe realizar la

evaluación geotécnica del mismo, esta evaluación y estudio de las características geotécnicas debe tener en cuenta los parámetros de porosidad, en caso de terrenos granulares no cohesivos y del grado de figuración y alteración en el caso de macizos rocosos. La presión de poro debe tomarse en cuenta por su influencia en la presión de inyección. Se podría incidir en la penetración de la red de poros o fisuras de la masa de terreno o suelo considerada. En terrenos cohesivos las inyecciones plantean directrices distintas a la de “empapar el terreno o suelo”, debiendo tenerse en cuenta el comportamiento plástico de este tipo de materiales.

El estudio previo del material en donde se van a realizar las inyecciones y los objetivos planteados y definidos que se desean alcanzar con las mismas, en los que debemos tener muy en cuenta los aspectos económicos, permitirán planificar y definir el programa de inyecciones. Por razones económicas se debe evaluar el volumen a inyectar por taladro o perforación realizada, este volumen vendrá dado por el volumen de poros o huecos en suelos granulares y por la figuración del suelo, (también porosidad en determinados tipos de rocas sedimentarias), elementos estructurales a perforar, así como el área a tratar en el terreno o elemento objeto del tratamiento.

Se debe considerar que no toda filtración va ser curada por lo que se utiliza el criterio de canalizar esa agua a drenantes.

La elección de uno u otro producto dependerá principalmente de las necesidades del trabajo encargado, así como del tipo de elemento sobre el que se va a trabajar. Los parámetros a tener en cuenta para la elección de uno u otro producto son:

- **Penetración:** En la planificación debe constar hasta donde se debe realizar este proceso, pues, únicamente penetrar en los primeros centímetros del elemento podría ya lograr el objetivo, un ejemplo muy usado es detener vías

de agua en juntas de elementos de hormigón. Son empleadas de igual manera las inyecciones en fisuras de hormigón o en casos de consolidación de placas.

- **Viscosidad:** Se usan viscosidades para distintas aplicaciones, a menor viscosidad conseguiremos mayor penetración y una menor presión de bomba durante su inyección. El incremento de viscosidad es uno de las metas para una mayor presión de inyección en los revestimientos de hormigón.
- **Tiempo de gelificación:** La resina acuoreactiva entra en contacto con el agua y hasta que la reacción finaliza, es el tiempo requerido para la gelificación. *Se determina por el volumen alcanzado por la resina. Se divide en el tiempo de inducción y el tiempo de reacción.* (Herrera Herbert & Castilla Gómez, 2012)

La gelificación es un sistema acuorreactivo hidrófobo, es decir, no hidrófilo, equivalente a no necesitar una gran cantidad de agua para reaccionar, el proceso resulta en la espuma que permite el hinchamiento o retracción en dicho espacio, pierde su capacidad de absorber agua.

- **Flexibilidad:** Propiedad de absorber movimientos limitados. Permite tratar juntas sometidas a movimientos de materiales. Cada junta tiene su proceso o ciclo de mayor separación o máxima apertura. Así mismo ayuda a que los poliuretanos flexibles no sean sugeridos en consolidación de suelos y revestimientos.
- **Durabilidad y Resistencia:** Su resistencia química y resistencia a agentes agresivos, son altas respectivamente, sirven para reparaciones que requieran durabilidad y permanencia.

7.7 IDENTIFICACIÓN DE FILTRACIONES EN EL TÚNEL TRAMO LABRADOR-LA CAROLINA

La eficiencia está en obtener el mejor provecho al momento de la inyección, es decir, si las grietas están en mayor separación de su ciclo de movimiento esto sucede cuando la estructura de túnel inicia. El motivo es que los selladores funcionan mejor a compresión que a tracción. Esto es de gran importancia cuando se esperan grandes movimientos. Para seleccionar el tratamiento se realiza un mapeo de la cantidad de agua que emana por la filtración, fisura o junta, en el caso del metro de Quito se realizó un estudio de aporte de agua por filtración en el tramo Labrador- La Carolina para ver el comportamiento de la filtración. Los resultados de los anillos que se realizó el tratamiento son los siguientes:

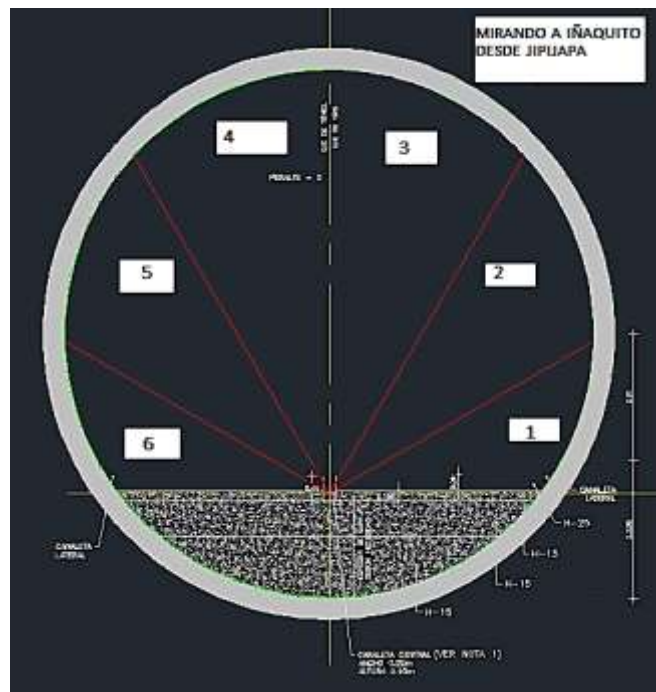


Figura 74: Medición del agua de la filtración
Tomado de: (Zabala, Sánchez, & Matallana, 2012)

Tabla 12: revisiones manuales

		REVISION 1						REVISION 2						
		FECHA: 02/03/2018						FECHA: 20/04/2018						
Anillo		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	
12					HUMEDAD						HUMEDAD			MISMO APORTE
154				GOTEOS	CHORRO					GOTEOS	CHORRO			AUMENTO APORTE
210				HUMEDAD										DISMINUYE APORTE
342		HUMEDAD			HUMEDAD						HUMEDAD			DISMINUYE APORTE
431				GOTEOS	HUMEDAD					GOTEOS	HUMEDAD			AUMENTO APORTE
670													HUMEDAD	AUMENTO APORTE
1055		HUMEDAD	HUMEDAD											DISMINUYE APORTE
1056		HUMEDAD	HUMEDAD					HUMEDAD	HUMEDAD					MISMO APORTE
1057		HUMEDAD	CHORRO					HUMEDAD	CHORRO					MISMO APORTE
1058		HUMEDAD	HUMEDAD					HUMEDAD	HUMEDAD					MISMO APORTE
1059			HUMEDAD					HUMEDAD	HUMEDAD					AUMENTO APORTE
1060			HUMEDAD					HUMEDAD	HUMEDAD					AUMENTO APORTE
1093		HUMEDAD						HUMEDAD						MISMO APORTE
1094		HUMEDAD						HUMEDAD						MISMO APORTE

1095	■					
1096	■					
1168	■					
1169	■		■			
1175				■	■	
1183				■	■	
1184				■	■	
1191		■				
1192		■		■	■	
1193		■		■	■	■
1194		■	■	■		
1195		■	■	■		
1196	■	■				
1197	■	■				
1198	■	■				
1207	■	■				
1208	■	■				
1209	■	■	■	■		
1210			■	■		
1211	■	■				■
1212	■	■	■			■
1229	■					

	■					MISMO APORTE
	■					MISMO APORTE
						DISMINUYE APORTE
	■		■			MISMO APORTE
				■	■	MISMO APORTE
						DISMINUYE APORTE
						DISMINUYE APORTE
	■					MISMO APORTE
	■					DISMINUYE APORTE
	■				■	DISMINUYE APORTE
	■	■	■			MISMO APORTE
	■	■	■			MISMO APORTE
	■	■	■	■		AUMENTO APORTE
	■	■				MISMO APORTE
	■	■				MISMO APORTE
	■	■				MISMO APORTE
	■	■				MISMO APORTE
	■	■				MISMO APORTE
	■	■	■	■		MISMO APORTE
				■	■	CAMBIO APORTE
	■	■			■	CAMBIO APORTE
	■	■		■	■	CAMBIO APORTE
	■					DISMINUYE APORTE

1230												DISMINUYE APORTE
------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	------------------

Tabla 13: Medición Entrada de Agua en Metro de Quito

METRO DE QUITO ESTACIONES EL LABRADOR, JIPIJAPA, IÑAQUITO Y LA CAROLINA APORTE ENTRADAS DE AGUA ENTRE JUNTA DE ANILLOS MAS ESTACIONES				
	ESTACIÓN EL LABRADOR	ESTACIÓN JIPIJAPA	ESTACIÓN IÑAQUITO	ESTACIÓN LA CAROLINA
METROS CUADRADOS m² (SUPERFICIE APLICADA PLANTA BAJA CONTRABOVEDA)	4623,64	3008,69	2794,43	3043,59
APORTE DE AGUA ESTACIÓN l/min	8,2	14,11	7,5	1,2



Figura 75: Evidencias de Filtraciones Metro de Quito

7.8 METODOS Y PROCEDIMIENTO OPERATIVO APLICADO PARA LA INYECCION DE FILTRACION EN TRAMO LABRADOR-LA CAROLINA



Figura 76: Método Operativo aplicado en Filtración en tramo Labrador - La Carolina

El método realizado en las filtración o grietas de agua depende mucho del análisis en campo, no siempre funciona en la primera aplicación de un método existen filtraciones que se sellan y en pocos días aparecían en otra posición más o menos leves. Por ello no en todas las grietas y filtraciones del túnel en el tramo Labrador – La Carolina se aplicaron las mismas por lo que se explicara los principales procedimientos técnicos más efectivas aplicadas.

7.8.1 MÉTODOS DE INYECCIÓN PARA OBTURACIÓN Y CONTROL DE VÍAS DE AGUA.

Este método se lo realizo en filtraciones leves y goteos ya que no existía mucha presión de agua en el trasdós del anillo casi todas fueron selladas después de probar algunos métodos antiguos utilizados. En el proceso de inyección, los pasos son:

7.8.1.1 Limpieza de la superficie: Esta operación permite localizar la posición exacta y anchura de la grieta a sellar. Algunas veces la superficie del hormigón está oculta por una superficie de depósitos minerales acumulados por la fuga de agua durante mucho tiempo. Debe eliminarse todo lo que oculte la grieta, puesto que debe verse claramente la grieta para replantear la situación de los taladros para los inyectores.

7.8.1.2 Perforación de los puntos de inyección: Con el fin de inyectar resina en la grieta, es necesario instalar inyectores de tipo mecánico, localice en toda su longitud el defecto a ser inyectado y replantee las perforaciones de modo que no se dañe el soporte. El diámetro del taladro medio debe ser equivalente al inyector a utilizar.

El ángulo de la perforación debe de ser aproximadamente de 45° o menor respecto a la superficie y hacia la grieta. La profundidad de la perforación en su intersección con la grieta debe ser cercana al centro de la estructura, si es posible. No suele ser necesario taladrar a más de 40 cm de profundidad, siempre que se disponga de suficiente presión y el material se contenga durante la inyección. Las perforaciones deben hacerse siempre al tresbolillo de la grieta. Esto asegura un mayor porcentaje de las perforaciones atravesando la grieta, incluso si el ángulo de la grieta en el hormigón no es perpendicular a la superficie.

La distancia de las perforaciones entre sí varía generalmente de unos 15 a 50 cm dependiendo de la anchura de la grieta. Cuanto más ancha la grieta, mayor separación entre perforaciones. La experiencia ayuda a decidir con que separación deben realizarse las perforaciones. En hormigones de espesor de 32 cm o menos. Coloque los inyectores directamente sobre la grieta. Esto ayudará a minimizar el deterioro del hormigón en estas secciones del anillo.

7.8.1.3 Limpieza de los huecos de los taladros: Limpie los huecos realizados con el taladro de cualquier resto de arenilla o material suelto, utilizando un cepillo circular de diámetro adecuado. De este modo la goma del inyector tendrá buen agarre contra las paredes y no resbale al apretarlo.

7.8.1.4 Colocación de los inyectores: Inserte los inyectores en los taladros realizados previamente, de modo que la parte superior del manguito de goma quede por debajo de la superficie del hormigón. Si no puede empujar el inyector en el taladro, introdúzcalo con un martillo. Apriete el inyector con una llave tan fuerte como sea necesario.

7.8.1.5 Limpieza de la grieta, si es necesario: En algunos casos, puede ser muy útil limpiar la grieta con agua para mejorar la penetración de la resina en paredes más gruesas. Este lavado permite detectar puntos de inyección ciegos, o discontinuidades en la grieta. El procedimiento se inicia en el inyector más bajo en una grieta vertical, o en la parte más estrecha en una grieta de una superficie horizontal, y se continúa de inyector en inyector consecutivamente. Se recomienda retirar los conectores de los inyectores no unidos a la línea de presión, mientras se lava para así eliminar el agua sobrante.

7.8.1.6 Inyección de la resina y catalizador: Mezcle de resinas con la cantidad de catalizador necesario (del 2% al 10%), llene el depósito/tolva de resina y cargue la bomba, manguera y boquilla. Abra la válvula de la boquilla y deje fluir los restos de disolvente hasta la aparición de la resina. Recoja todo el disolvente y producto sobrante en un recipiente de desperdicios.

El aplicador debe vigilar 3 puntos de referencia cuidadosamente:

- La grieta / inyector, por si la resina fluye de la zona de trabajo
- La manguera de presión, observando las pulsaciones que indican el flujo del material
- El manómetro, verificando la presión de inyección real aplicada.

Comience la inyección en el punto de mayor resistencia para asegurar buena penetración y mínimas pérdidas de material. Esto generalmente es el punto más bajo en una grieta vertical y la zona más estrecha en una superficie horizontal. Primero llene el taladro y luego comience lentamente a llenar la grieta.

Controle el flujo de la resina sujetando la manguera de presión con el fin de sentir las pulsaciones, o vigilando el manómetro si existe. El manómetro también es muy útil porque permite controlar la presión y mantenerla en un rango que asegure la inyección pero que al mismo tiempo minimice hechos imprevistos como repentinos derrames de material, expulsión violenta de inyectores y reventones de hormigón defectuoso.

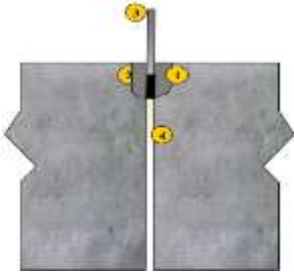

Si la superficie de la grieta muestra flujo inmediato de resina mientras trabaja con el primer inyector, espere unos minutos. En la mayor parte de los casos, la resina reaccionará suficientemente rápido con el agua y expandirá rápidamente. El producto resultante cerrará la grieta y proporcionará un sellado superficial que contendrá la resina que inyectaremos a continuación. Después de 3 a 5 minutos, comience de nuevo a inyectar.

Si la resina continúa fluyendo libremente por la grieta, deje de bombear y aplique un sellado superficial sobre la grieta con el mortero hidráulico de fraguado rápido. La resina aún puede fluir por poros en el sellado, pero no se preocupe, siempre y cuando la

mayor parte de la resina quede contenida. Una pequeña cantidad de filtración es beneficiosa porque muestra la extensión del progreso de la resina.

7.8.1.7 Limpieza: Una vez que se termina el trabajo de inyección, una buena limpieza a conciencia es fundamental, porque una vez que endurece la resina, es prácticamente imposible disolverla. Cualquier resina vertida debe limpiarse antes de que endurezca. Limpie en profundidad la bomba de inyección, mezcladores y cualquier otra herramienta que entrase en contacto con el producto.

Tabla 14: Esquema de Inyección central y lateral con inyector

Esquema de inyección central con inyector		Esquema de inyección lateral con inyector	
1.- Sellado espuma bicomponente (resina y catalizador).		1.- Sellado espuma bicomponente (resina y catalizador).	
2.- Ejecución de taladro.		2.- Ejecución de taladro.	
3.- Inyector.		3.- Inyector.	
4.- Inyección de espuma.		4.- Inyección de espuma.	

7.8.2 INYECCIÓN EN TRASDÓS DE MUROS CON MORTERO

Como solución al fallo o deterioro de la impermeabilización de los anillos hormigón, se puede inyectar una cortina de mortero en el trasdós del mismo. La inyección en la cara interior del anillo tiene como objeto proteger y consolidar la parte más próxima al terreno, no siendo posible tratarla, en todo caso, con otro sistema.

Para inyectar el mortero es necesario instalar inyectores, para ello se deben realizar taladros que atraviesen de la dovela y lleguen hasta el contacto con el terreno natural. Se debe proceder a ejecutar los taladros en tresbolillo y espaciados, con una inclinación entre 15° y 30° hacia el interior asegurándose que atraviese el anillo y el bicomponente totalmente, sin penetrar en el terreno.

Limpiar el interior de los taladros de restos sueltos y polvo con un cepillo de limpieza y/o con lanza de aire comprimido. En el caso de encontrar un muro muy deteriorado interiormente, con cavidades o extremadamente poroso, puede ser necesaria una consolidación final inyección para tratamiento de hormigón. Los taladros tendrán un diámetro adecuado al tipo de inyector (normalmente 18 mm), que se prevea va a ser utilizado. *La longitud del taladro será como máximo la proyección del espesor del muro de fábrica de ladrillo sobre la directriz del taladro según el ángulo que se le dé a la perforación* (Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México, 2009), Finalmente, adaptar los inyectores de plástico de 10 – 16 mm de diámetro interior en la boca de los taladros.

Los diferentes componentes del sistema deben mezclarse en las proporciones adecuadas propuestas. La inyección debe realizarse de abajo a arriba, y se podrán ir taponando los inyectores a medida que observemos que salga producto de inyección por

la boca de los inyectores situados más arriba. Se irán subiendo los puntos de inyección a medida que veamos que el producto no tiene capacidad de ascender más. Debe tenerse en cuenta siempre un correcto manejo de la presión de inyección, siendo muy importante evaluar de forma directa la presión a la que podemos aproximadamente 3 a 5 bares y a bajo caudal de inyección para permitir la disipación de las presiones en el terreno, evitando la fractura hidráulica.

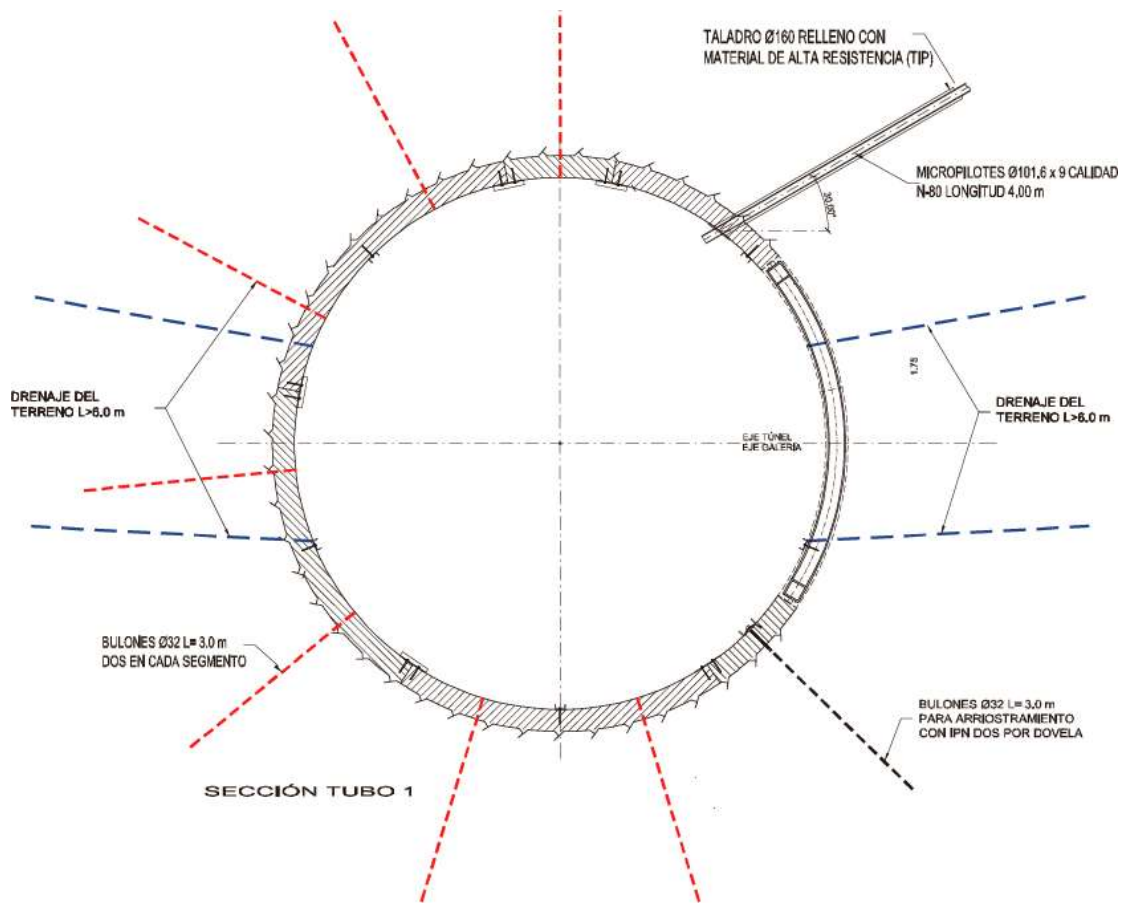


Figura 77: Detalle talados para inyección y drenaje

Tomado de: Zabala, Sánchez, & Matallana (2012)

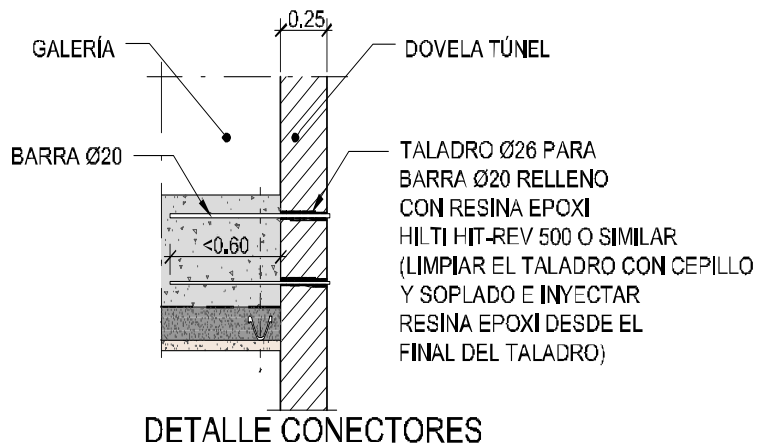


Figura 78: Detalle Conectores

Tomado de: Zabala, Sánchez, & Matallana (2012)

7.9 PROBLEMAS EN FRENTE DE ESCAVACIONES

En la excavación de túneles, la complejidad de la geología subterránea como lo es la ocurrencia de los frentes mixtos es generalmente producen potenciales problemas como la inestabilidad en frente, que incluso pueden concluir en colapsos de la excavación. La presencia abundante de agua en el entorno excavado, asociado a una alta permeabilidad en el terreno también contribuye a anomalías.

La problemática deriva en la dificultad para mantener una presión adecuada en el frente, a través del material contenido en la cámara de excavación.

7.9.1 INESTABILIDAD O COLAPSO EN EL FRENTE DE EXCAVACIÓN

En condiciones de frentes mixtos los cortadores trabajan con diferente empuje; los que trabajan en las partes resistentes requieren mayor empuje y los que trabajan en las partes suaves requieren uno menor esto provoca un desequilibrio entre las presiones

actuantes en el terreno y las de sostenimiento de la tuneladora, que junto con las vibraciones inducidas por los cortadores que giran en sobre los materiales de distinta resistencia, conducen a problemas de estabilidad y colapsos en el propio frente y en la clave, los cuales se reflejan superficialmente como asentamientos.

Una condición semejante ocurre ante la presencia de *bolsas de arena* en el frente, la cual puede causar salidas violentas del propio material hacia la máquina. Un colapso en el frente aumenta la presión en dirección de la tuneladora y puede ocasionar que el material entre repentinamente hacia el pleno, con alto riesgo de taponamiento de la cabeza de corte.

Vale la pena mencionar que la relación entre la abertura de la cabeza de corte y la sección excavada tiene una relación directa sobre la presión de apoyo mecánico sobre el frente; una cabeza de corte más cerrada proporciona mayor soporte. En tuneladoras tipo EPB esta característica usualmente se sitúa en un rango de entre 20 y 35%.

Como una regla general, las TBMs tipo EPB son equipadas con sensores de presión, instalados sobre el mamparo (Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México, 2009). Las medidas de presión son mostradas al operador en la pantalla de la cabina, permitiéndole manejar y prevenir inestabilidad en la clave, así como controlar el efecto del flujo de agua. El empleo de aire comprimido en el frente resulta bastante ventajoso para lograr este propósito. El manejo de una presión adecuada ayuda a reducir los asentamientos superficiales a valores aceptables; si el volumen es controlado adecuadamente la inestabilidad y los colapsos en el frente pueden reducirse significativamente.

Los túneles están sujetos a posibles variaciones en su geología y por tanto se vuelven susceptibles de presentar condiciones de inestabilidad en el frente. Cuando la

información disponible no permita conocer con precisión tales condiciones, es conveniente que la máquina cuente con sistemas para la investigación delante del frente que proporcionen información más precisa, como los sistemas de perforación sin extracción de núcleos, que también permitan el registro de los parámetros de perforación.

De igual manera, para poder realizar estas acciones la cabeza de corte debe adoptar una posición particular, la cual debe ser identificada y alineada con los agujeros situados en el mamparo.

En casos más críticos, debe ser posible llevar a cabo la investigación mediante herramientas de perforación que permitan la recuperación de núcleos, con el fin de conocer con mayor detalle las características de los materiales del sitio. Para llevar a cabo estas labores, se debe tener especial cuidado pues su ejecución puede originar la pérdida de los tubos de las herramientas de perforación, lo cual puede dañar la cabeza de corte una vez que se atraviesa la sección más tarde. Para solucionar este inconveniente, una solución segura es usar herramientas de perforación de aluminio.

Cabe mencionar que las investigaciones desde la TBM también son recomendadas como medida secundaria cuando el túnel se excava debajo de construcciones o estructuras existentes y en áreas particularmente sensibles. *Alternativamente a los métodos de excavación descritos, estas labores se pueden realizar a través de métodos geofísicos (prospección sísmica, electromagnética, etc.).* (Grupo Acciona, 2016)

Una vez que los problemas de inestabilidad han sido identificados, puede resultar necesario implementar medidas de mitigación. En primera instancia la adición de agentes acondicionadores y espumas en el material excavado desde el mamparo ayuda a mejorar su fluidez y su cohesión, lo cual también contribuye a mejorar la estabilidad en el frente.

En situaciones más críticas, la inestabilidad y la alta permeabilidad en el frente pueden ser contrarrestadas mediante tratamientos para el mejoramiento del terreno, como inyecciones o columnas de jet-grouting, previamente al paso de la máquina. Estos usualmente se ejecutan desde la superficie, pero también son posibles desde el interior del túnel. Los primeros son preferidos donde la profundidad es mínima (inferior a 50 metros aproximadamente), ya que no interfieren en el ciclo de producción como lo hacen los otros.

En zonas urbanas la primera alternativa tiene el inconveniente de crear interferencia y molestia en el entorno de trabajo. Al final estas medidas facilitan considerablemente la excavación y previenen consecuencias secundarias. Además, resultan bastante ventajosas para simplificar la entrada de personal al frente para ejecutar labores de mantenimiento en la cabeza de corte.

7.9.2 DESVIACIONES EN GUIADO DE TUNELADORA TBM

Como se ha mencionado brevemente en la sección anterior, las tuneladoras son muy propensas de presentar desviaciones cuando trabajan en frentes con terrenos variables. Cuando la sección de la excavación está conformada por terreno blando y duro, y el primero se ubica en la parte inferior en una proporción considerable, se generan fuerzas excéntricas en la cabeza de corte, de modo que la tuneladora puede hundirse de forma progresiva, resultando en impedimento para controlar adecuadamente la dirección, a tal grado que se tiene que detener el avance con el fin de proceder a su realineación. Según Bernaola Alonso, Castilla Gómez, & Herrera Herbert (2013), expertos en prevenciones: *el mismo efecto puede producirse cuando las condiciones descritas se han identificado con anticipación, y con el fin de compensar las desviaciones, se aplica mayor*

empuje en los cilindros en la zona donde se ubica el material de mayor resistencia. Si la fuerza es excesiva se provoca la desviación en sentido contrario a la prevista inicialmente.

Las tuneladoras modernas cuentan con un sistema de guiado muy avanzado, el cual proporciona coordenadas 3D de un punto situado en la cola del escudo y otro cerca de la cabeza de corte, su inclinación respecto a la horizontal y rotación del escudo respecto a sus propios ejes. En la cabina de operación se puede visualizar el desfase entre el centro real y el centro teórico del túnel, tanto en la cabeza de corte como en la cola del escudo.

El sistema de guiado es capaz de procesar esta información y calcular la curva corregida para corregir el alineamiento, y conforme se avanza, permite visualizar la posición de la TBM con respecto a dicha curva. Este comportamiento no tiene grandes repercusiones, pero es conveniente verificar que las desviaciones se encuentran dentro de las tolerancias permitidas, mediante levantamientos topográficos periódicos del eje del túnel.

7.9.3 DESGASTE EN LOS CEPILLOS

Como se ha descrito previamente, en la cola del escudo se dispone de juntas de grasa, frecuentemente conformada por tres filas de cepillos de acero, entre las que se inyecta grasa consistente para conseguir estanqueidad. Estas juntas son un sello eficaz de entre el escudo de la tuneladora y los anillos de dovelas colocados y tienen como propósito principal evitar el ingreso de agua, material o mortero hacia el interior del escudo.

Tanto los cepillos como la grasa de sellado deben estar diseñados para resistir presiones elevadas provocadas por la presencia de altos niveles de agua. Además, esta

última debe contar con buenas propiedades de bombeo y de adherencia hacia distintos tipos de terreno. Sin embargo, cabe mencionar que en comparación con otros componentes de las tuneladoras que han sido mejorados sustancialmente en los últimos años, estos no han sufrido grandes mejoras, al grado que su configuración permanece tal y como fue concebido en un principio.

Aun cuando su composición es relativamente simple, en condiciones de frentes mixtos o similares son susceptibles al desgaste gradual, conforme se avanza en la excavación. Dado que la excavación el frente y el espacio anular de la excavación se encuentran íntimamente ligados, al presentarse dificultad en la estanqueidad se puede ocasionar pérdida de presión en el frente, con sus implicaciones asociadas ya descritas.

Por otro lado, cuando la excavación se encuentra acompañada de flujo excesivo de agua, al filtrarse a través del espacio anular y atravesar la junta de grasa y los cepillos, se puede alcanzar el espacio relleno de mortero y por consiguiente erosión en el mismo; la pérdida de mortero implica una pérdida de masa, se puede reflejar superficialmente a través de asentamientos. El ingreso de agua al interior de la tuneladora también puede tener serias repercusiones en las tasas de avance de la excavación.

El desgaste excesivo de los cepillos puede acompañarse de pérdida constante de la grasa contenida entre los mismos. Ante esta situación la única medida que puede implementarse es la inyección constante con el fin de buscar asegurar su estanqueidad. Sin embargo, la identificación de estas condiciones difícilmente se puede percibir desde el interior de la tuneladora durante el proceso de excavación. Prácticamente la única medida de corrección es su reemplazo en zonas donde la excavación es interrumpida y se puede trabajar en condiciones atmosféricas.

8. CONCLUSIONES

- Como en la mayoría de las obras subterráneas, en la excavación de túneles una de las primeras etapas está conformada por la integración de información referente a las condiciones del sitio. En muchos de los casos, se presta poca atención a estos aspectos y el estudio del sitio se lleva a cabo de manera deficiente; su importancia es reconocida en la fase constructiva, cuando las condiciones encontradas durante su construcción son distintas a las definidas inicialmente. Sin duda, los túneles no están exentos de presentar tales variaciones, por ello es imprescindible una planificación de prevenciones.
- El estudio de las condiciones del sitio debe servir como base para establecer el método de excavación más adecuado. Una vez que se establece el método mecanizado como método de excavación se debe llevar a cabo un análisis detallada para definir el tipo de tuneladora más adecuada, tomando en cuenta que a la fecha no existe una tuneladora “todo terreno”. Una elección incorrecta puede ocasionar serias dificultades durante la excavación y comprometer la obra, resultando en la necesidad de introducir modificaciones en el método de excavación y la ejecución de trabajos complementarios. En el peor de los casos estas dificultades pueden agravarse al grado de imposibilitar la conclusión de la obra.
- Se introdujeron algunos conceptos y ejemplos de patología de túneles y de la influencia de los métodos constructivos. Se mostró que las condiciones geotécnicas, el diseño, el comportamiento del agua freática, movimientos sísmicos, tipos de suelos y el destino de una obra subterránea influyen en su

desempeño a lo largo del tiempo. Estos conceptos se de tratamientos y soluciones a los problemas ocurridos en el metro de Quito tramo Labrador – La Pradera. Se describieron los hechos, se detallaron los factores condicionantes principales y se efectuó un análisis simple que permite mostrar la influencia del comportamiento de los suelos de Quito en el túnel, tales como las condiciones geotécnicas imperantes, donde llegaron a vulnerables elementos estructurales.

- La construcción de un túnel constituye siempre un reto para los ingenieros civiles, quienes para resolver adecuadamente los problemas que se plantean en una obra subterránea, deben desarrollar y aplicar todos sus conocimientos e ingenio. En los túneles, como en ninguna otra obra de ingeniería, el proyecto y la construcción se asocian en un conjunto indivisible en el cual la participación del proyectista en los problemas de la construcción y la del constructor en los del proyecto resultan no sólo convenientes sino imprescindibles.

9. RECOMENDACIONES

- Para reducir las incertidumbres en la construcción de los túneles, se recomienda asignar un porcentaje aproximado del 3% del costo que representa la totalidad de la obra a la integración geotécnica y geológica. Sin embargo, debe tener que cuenta que aun cuando esta integración sea realizada bajo criterios razonables, las posibilidades de encontrar condiciones variables están presentes en todo momento.
- Se recomienda que todos los profesionales de la construcción del túnel, consideren que el proyecto inicial de un túnel se va adaptando durante la

construcción a las condiciones reales del terreno, que en la mayoría de los casos resultan imposibles de anticipar, al menos con el detalle que se requiere para obtener las mejores condiciones de economía y seguridad. El conocimiento de los posibles riesgos, los disminuyen en un buen porcentaje

- La única manera de proveer una vulnerabilidad en este tipo de construcciones, como es el caso de, es recopilando la información técnica necesaria para que durante la ejecución de la obra, se puedan tomar acciones que tengan un método aceptable y no solo funcione como un paliativo, el conocimiento de la geología, ayuda mucho en tales decisiones.

REFERENCIAS

- Aduvire, O. (2006). *Drenaje Ácido de Mina Generación y tratamiento*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Alonso, E. (2002). *Apuntes de la asignatura de Túneles Parte I: Historia de los Túneles*. Madrid: UPC.
- Bernaola Alonso, J., Castilla Gómez, J., & Herrera Herbert, J. (2013). *Perforación y Voladura de Rocas en Minería*. Madrid: E.T.S. de Ingenieros de Minas de Madrid.
- De Rivaz, B. (2011). *Fibre Reinforced Spray concrete for compliance with site safety requirement*. México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- Estébanez Sánchez, E. (2011). *Reparación y reconstrucción de Túneles*. La Coruña: Carlos López.
- Galleria di Base del Brennero - Brenner Basistunnel BBT. (enero de 2020). *BBT*. Obtenido de Tunnelling Methods: <https://www.bbt-se.com/en/tunnel/tunnelling-methods/>
- Grupo Acciona. (2016). *Plan de obra metro de madrid*. EPMOOP, Diseño obra civil. Madrid: Acciona.
- Herrera Herbert, J., & Castilla Gómez, J. (2012). *Utilización de Técnicas de Sodeos en estudios geotécnicos*. Madrid: Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas.
- Junca Ubierna, J. A. (1997). *Historia de los Túneles y su evolución tecnología* (Primera Edición ed.). (C. e. López Jimeno, Ed.) Madrid: Gráficas Arias Montano.

Martí, J. V., Yepes, V., González, F., & Alcalá, J. (2012). Técnicas de voladuras y excavación en túneles. En *Apuntes de la Universitat Politècnica de Valencia* (pág. 165). Valencia.

Oliveira, J. A. (2013). *Va de Barcos*. Recuperado el Noviembre de 2019, de <https://vadebarcos.files.wordpress.com/2017/09/oil-drilling-derrick.gif>

Pialarissi Cavalaro, S. H. (2009). *Aspectos tecnológicos de túneles construidos con tuneladora y dovelas prefabricadas de hormigón*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

Saavedra L., A. (2014). *Construcción Minera y Energía*. Obtenido de Etapas del Proceso: Contrucción de Túneles Mineros: <https://www.construccionminera.cl/etapas-del-proceso-construccion-de-tuneles-mineros/#.Xd53ulczZPY>

Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México. (2009). *Manual de Diseño y Construcción de Tuneles de carreteras*. Ciudad de México: SCT.

Soto Saavedra, P. R. (2014). *Construcción de Túnel*s. Santiago: Universidad Austral de Chile.

Zabala, I., Sánchez, C., & Matallana, L. (2012). *Memoria MQ - E.5.11 Diseño Definitivo de Obra Civil*. Quito: Metro de Madrid S.A.

