



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería

Escuela Ingeniería en Construcción

"IMPERMEABILIZACION TUNEL LAS RAICES."

Tesis para optar al título de:
Ingeniero Constructor.

Profesor Patrocinante:
Sr. Adolfo Montiel Mancilla.
Constructor Civil.

ALEXIS ANTONIO HERMOSILLA PALMA
VALDIVIA -CHILE

2005

INDICE DE MATERIAS

CAPITULO I

1	Generalidades.	1
1.1	Túneles a través del Tiempo.	1
1.2	¿Por qué un Túnel?.	3
1.3.	Principios Básicos de Diseño	4
1.3.1.	Mantenimiento de la Capacidad Portante de la Roca	6
1.3.2.	Sostenimiento Flexible.	6
1.3.3.	Control y Supervisión de la Excavación.	7
1.4	Métodos Constructivos.	8
1.4.1	Criterios para la Evaluación de los Métodos de Ejecución de Túneles	8
1.4.2	Variables o Características de la Roca Matriz y del Macizo Rocoso	10
1.5	Métodos de Excavación o Avance	12
1.5.1	Excavación con Explosivos	12
1.5.2	Excavaciones Mecánicas Con Máquina	13
1.5.3	Excavación Mecánica con Máquinas Integrales No Presurizadas	13
1.5.4	Excavación Mecánica con Máquinas Integrales Presurizadas	13
1.6	Influencia del Terreno en El Sistema Constructivo	16
1.7	Sección Transversal de un Túnel	18
1.8	Los Túneles y El Agua	19
1.9	La Superficie de Estado	23
1.9.1	Empleo de la Técnica de Congelación de Suelos	24

CAPITULO II

2	Sistemas de Impermeabilización de Túneles	26
2.1	Influencia del Agua	26
2.1.1	Impermeabilización en Franja Capilar	26

2.1.2	Impermeabilización en Zonas de Saturación	26
2.1.3	Impermeabilización en Agua Subterránea	26
2.2	Impermeabilización de Túneles	27
2.2.1	Beneficios de La Estanqueidad	28
2.3	Requisitos a Tener en Cuenta en un Proyecto	29
2.4	Materiales para la Impermeabilización Principal	33
2.4.1	Geotextiles	33
2.4.2	Procedimiento De " <i>Jet Grouting</i> "	36
2.4.3	Impermeabilización Mediante Membranas Asfálticas	37
2.4.3.1	Descripción del Producto	37
2.4.3.2	Análisis de sus Propiedades	39
2.4.3.3	Aplicaciones	42
2.5	Hormigón Proyectado	42
2.5.1	Ventajas	43
2.5.2	Recomendaciones	44
2.5.3	Métodos de Ensayo	44
2.6	Impermeabilizantes de PVC	46
2.6.1	Impermeabilización de Túneles	47
2.6.2	Protección de Impermeabilización	48
2.6.3	Colocación	49
2.6.4	Presentación y Almacenamiento	49
CAPITULO III		
3	Impermeabilización Túnel Las Raíces	50
3.1	Descripción de la Obra	50
3.2	Trabajos Previos; Inspección Técnica	52
3.2.1	Proyecto de Reparación Considerado en Relación a las Filtraciones	52
3.2.2	Condiciones Expuestas en los Sondajes Ejecutados.	53
3.2.3	Otras Observaciones	56

3.2.4 Conclusiones y Recomendaciones	58
3.3 Especificaciones Técnicas	60
3.3.1 Procedimiento de Trabajo	60
3.3.2 Inyecciones	62
3.3.3 Grouts	62
3.3.3.1 Tipo A	62
3.3.3.2 Tipo B	63
3.3.3.3 Tipo C	63
3.3.4 Procedimiento de Trabajo	63
3.4 Aplicación de Membrana Impermeabilizante	66
3.4.1 Aplicación de Membrana de PVC	68
Conclusiones	71
Bibliografía	74
Anexos	75

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1 Criterios para la Evaluación de los Métodos de Ejecución de Túneles	9
Cuadro 2 Métodos de Excavación	14
Cuadro 3 Propiedades de la Membrana Impermeabilizante	68

INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1 Sección Transversal de un Túnel	18
Figura N° 2 Los sistemas de impermeabilización primaria	30
Figura N° 3 Impermeabilización Mediante Geotextiles	33
Figura N° 4 Procedimiento de JET GROUTING	37
Figura N° 5 Ensayo del Hormigón Proyectado	45

INDICE DE FOTOGRAFIAS

Fotografía N° 1	Impermeabilizante de PVC	48
Fotografía N° 2	Mapa Rutero Zona Temuco-Lonquimay	51
Fotografía N° 3	Zoom Zona Túnel las Raíces	51
Fotografía N° 4	Proceso de Termofusión de Membranas	67
Fotografía N° 5	Proceso de Sellado de Clavo de Fijación	67

Gracias Señor Jesús por permitirme
terminar esta etapa de mi vida, por cumplir
tus promesas en mi vida.

Especialmente a mis Padres, pilar
fundamental para concluir la meta
emprendida.

AGRADECIMIENTO

Muchas son las personas que participaron en la realización de esta investigación. En primer lugar debo agradecer al Profesor Adolfo Montiel Mansilla por su colaboración y apoyo en el logro de esta tesis.

A todas las personas que me apoyaron en el desarrollo de este documento; al Sr. Angel Llanquihuen, Ingeniero Civil de Empresas Ferrovial Agroman S.A., profesional a cargo del proyecto "Túnel las Raíces", al Sr. Raúl Baena, capataz de impermeabilización; Sr. Eduardo Leclere, Constructor Civil de Zañartu Ingenierías; Sr. Eric Moraga, Vialidad IX Región.

Y como no agradecer a mis amigos que con mucha preocupación me insistían en terminar esta etapa como Gustavo y Faby, sólo por nombrar algunos. A BARZA SA que tantas alegrías nos trajo. Como olvidar a la "pancha" que me acompañó en los 5 años de mi vida valdiviana, muchas gracias también a Paula Soto y la tía Norma, realmente se pasaron.

A mi hermana Katy, y nuevamente a mis padres Marcos y María...

Amorcito, llegaste en el momento justo me diste las fuerzas y la motivación que faltaban para terminar esta etapa, TE AMO. A todos ellos de corazón les digo.....

MUCHAS GRACIAS Y QUE EL SEÑOR LES BENDIGA!!!!

"Todo lo puedo en Cristo que me fortalece"

Filipenses 4:13

RESUMEN.

La construcción de túneles cuenta con muchas alternativas para conseguir los resultados que se requieren; en lo que dice relación con los métodos para las excavaciones, como en los diferentes materiales y técnicas que se emplean para la impermeabilización de éstos.

La impermeabilización de este tipo de estructuras es uno de los ítems mas relevantes al momento de diseñar el proyecto, la influencia del agua puede, en muchos casos, llegar a ser trágico" para el túnel causando fallas estructurales y molestias a los usuarios. Para evitar estos casos se utilizan distintas técnicas de impermeabilización entre las que encontramos las membranas de PVC, membranas asfálticas, inyecciones de hormigones especiales y la aplicación de membranas de espuma poliorrefinadas.

La espuma poliorrefinada es lo que analizaremos en profundidad con el caso práctico de la impermeabilización del Túnel las Raíces. En esta obra se aplicaron dos membranas, en primer lugar una membrana de PVC y sobre ella la espuma, esto se hizo en los lugares en que el túnel presentaba mayores filtraciones, en los casos de menor flujo de agua sólo se aplicó la espuma.

SUMMARY.

The tunnels construction counts with many alternatives to get the aftermaths that are required; in it that he says relation with the methods for the excavations, I have a meal in the different materials material and techniques that are used for the waterproofing of these.

The waterproofing of this fellow of structures is one of the items but reeast winds in a minute I lay plans to design the project, he influences her give (subj) louses up it can be able to in many instances, to arrive to being. they utilize distinct the waterproofing techniques that poliorrefineades find the the PVC, asphaltic-membranes, injections membranes of especial concretos and the membranes application of foam among to avoid these cases.

The poliorrefinead foams it am it that we will examine in depth with the practical case of the waterproofing of the tunnel the roots. they applied two membranes in this work, in the first place a the PVC and envelope membrane she foams it, this was made in the places in that the tunnel was showing elders leaks, in the cases of younger flow of water only the foam was applied.

INTRODUCCION

Gran parte del territorio chileno se desarrolla entre dos cordilleras; la Cordillera de Los Andes, columna vertebral de América Latina y la Cordillera de La Costa. Chile se encuentra cubierto aproximadamente en un 70% por montañas, cerros y lomajes. Ello, sumado a su actividad minera, ha exigido una cantidad considerable de socavones y túneles.

Desde la fundación del Ministerio de Obras Públicas, todos los túneles de los ferrocarriles, de las obras hidráulicas y de los caminos, estuvieron a su cargo.

Toda esta actividad tunelera creciente en nuestro país, hace que la ingeniería chilena esté particularmente interesada en esta materia, aplicando nuevas técnicas de proyecto y de construcción para los proyectos viales, dado que la ejecución de proyectos de túneles se ha visto en aumento en directa relación a la creciente demanda de construcción de diversos proyectos viales.

El conveniente desarrollo de estas obras viales ha necesitado de la capacitación e innovación en materia de soluciones viables y eficientes en las áreas de Mecánica de Rocas y Suelos y a la vez de la Geología aplicada a la Ingeniería utilizando también diversas técnicas desarrolladas primeramente en el ámbito de la minería, presentándose éstas como herramientas útiles al momento de diseñar el túnel, como por ejemplo; metodología de la excavación, lo cual, es una parte muy preponderante al momento de pensar en la construcción de un túnel teniendo como variables el tipo de suelo, longitud, etc.. Además se utilizan estas técnicas, como veremos en forma más detallada, en la remodelación y mejoramiento de este tipo de estructuras

Uno de los principales problemas que se presenta al momento de ejecutar un proyecto de construcción de un túnel, es la filtración de agua proveniente de las napas subterráneas hacia el interior de la bóveda, trayendo con esto posibles fallas estructurales en el revestimiento del túnel, accidentes de tránsito causados por el pavimento mojado y otras posibles molestias a los usuarios. Por este motivo es que la impermeabilización de los túneles se considera como una tarea primordial y uno de los ítems más estudiados al momento del desarrollo de un proyecto de esta índole.

Para cumplir con el efecto impermeabilizador se cuenta con membranas de distinto origen, ya sea fabricadas a partir de un compuesto básico de PVC, geotextiles, membranas asfálticas, bases cementosas y membranas de caucho; las cuales, presentan diversas propiedades que las hacen más o menos eficientes como soluciones a las filtraciones de un túnel en específico, además de la membranas existen también otro tipo de soluciones para las filtraciones, como es el caso de las

inyecciones de soluciones cementosas hacia el interior de la roca circundante al túnel, en los lugares en donde dichas filtraciones son más abundantes.

Durante el desarrollo del presente documento se ejemplificará lo antes descrito mediante la experiencia de las obras de mejoramiento del Túnel Las Raíces, ubicado en la IX Región de nuestro país; este antiguo túnel diseñado en sus orígenes para el tránsito ferroviario con el correr del tiempo fue siendo utilizado para el flujo vehicular, ya que, es parte de la ruta del Paso Internacional Pino Hachado. En la ejecución de este proyecto se utilizaron técnicas de impermeabilización ya probadas, sin embargo hubo que desechar la solución primaria, consistente en inyecciones, debido a los resultados extraídos de estudios realizados con anterioridad y que se detallarán en el capítulo concerniente a los trabajos realizados en el Túnel Las Raíces.

OBJETIVO GENERAL.

Elaborar un estudio descriptivo de los procesos de construcción e impermeabilización de un túnel, analizando las distintas etapas de las que se compone y los diversos materiales que se emplean.

OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- > Estudiar alternativas de en la metodología de construcción de los túneles.

- > Analizar y describir los distintos materiales que se emplean en la impermeabilización de un túnel y sus distintas disposiciones.

- > Para finalizar se ejemplifica lo antes visto con lo desarrollado en la impermeabilización del Túnel las Raíces, el tipo de material que se empleó y el por qué se decidió ocupar.

CAPITULO I: GENERALIDADES

TUNELES A TRAVEZ DEL TIEMPO

Los túneles son una de las pocas realizaciones humanas que han sido, y probablemente seguirán siendo, usadas para propósitos similares por diferentes culturas y grupos humanos, desde la Antigüedad Histórica hasta nuestros días. No ha ocurrido así con otros inventos de la Humanidad como por ejemplo la pólvora, la brújula o la imprenta, conocidos por los chinos muchos años antes que los europeos, pero que eran usados de forma diferente a su empleo convencional posterior. Una breve reseña histórica nos hace comprender mejor la anterior afirmación.

El primer túnel del que se tiene conocimiento fue construido en la antigua Babilonia, bajo el río Eufrates y su finalidad era permitir el paso entre el Palacio Real y el Templo, que estaban situados a distintas orillas del río.

Fue revestido con ladrillos y tenía una longitud de aproximadamente 900 m. Su construcción se realizó entre los años 2180 y 2160 Antes de Cristo, es decir, hace más de 41 siglos. El segundo túnel más conocido fue construido por los Hebreos en Jerusalén, para asegurar el suministro de agua por gravedad a la ciudad, ante un posible asedio por parte de los asirios. El túnel con una longitud aproximada de 525 m, ha permanecido intacto hasta nuestros días, datándose su construcción hacia el año 704 Antes de Cristo.

El túnel de la Isla de Samos, hoy día todavía en uso, fue construido en el siglo VI Antes de Cristo para llevar agua por gravedad a la ciudad de Samos a través de una montaña. Su longitud aproximada es de 1000 m, con 1,80 m de altura y 1,80 m de ancho. El ingeniero que llevó a cabo la obra fue, según Herodoto, Epalinus. El cuarto y quinto túnel más antiguos de los que se tiene conocimiento, fueron mandados construir durante el reinado del emperador romano Augusto, para servir

de comunicación entre la ciudad de Nápoles y la villa imperial situada en las cercanías de Pozzuoli. El más largo, denominado hoy día "*La Grotta di Seiano*" tiene una longitud de 750 m. , siendo su ancho variable entre 4 y 6 m. El más corto, que fue descrito por Seneca, tiene una longitud de 700 m. siendo su ancho variable entre 2,4 y 3,1 m. , estando su altura comprendida entre 2,6 y 5,1 m. Se le conoce hoy día como la "Grotta di Posilippo".

El sexto túnel fue escavado en la década comprendida entre los años 41 y 51 Después de Cristo, en la época del Emperador Claudio, con el propósito de dragar el Lago Fucino, al norte de Roma. Su longitud era de 1050 m., siendo su ancho de 2,7 m y 5,7 m. de altura Su inauguración fue un rotundo fracaso, ya que cuando se abrió no entro prácticamente nada de agua en el emisario.

Se comprende, por tanto, que desde la antigüedad histórica, los túneles han sido usados de modo similar a como hoy día se hace, salvo en lo referente al desarrollo de nuevas tecnologías que implican la utilización más intensiva del medio rocoso en profundidad. Así desde un punto de vista funcional los túneles se clasifican en:

- Hidráulicos: Conducción de agua por gravedad o bajo presión en canales, presas, centrales hidroeléctricas, saneamiento de ciudades, etc..
- Vías de Comunicación: Ferrocarriles, carreteras, ferrocarriles metropolitanos, accesos peatonales, etc..
- Sistemas de Defensa: Silos atómicos, centros de transmisiones y comunicaciones, depósitos de aprovisionamiento militar, etc..
- Depósitos de Almacenamiento: Materiales radiactivos, gases, petróleo y derivados del mismo, etc.
- Explotaciones mineras.

¿POR QUE UN TUNEL?

Un túnel se presenta con frecuencia como una solución alternativa de otras a cielo abierto. Chile, nuestro país tiene una accidentada orografía a causa de grandes sistemas montañosos, esto ha dado origen a construcciones de túneles de carretera de razonables longitudes para poder enlazar en forma más expedita ciudades o lugares de importancia y facilitar los transportes más diversos. Además dado al notable crecimiento en la última década de la actividad económica de nuestro país ha sido necesario estudiar nuevas alternativas de tránsito a las ya existentes (túneles paralelos), mejorando así los niveles de servicios de nuestros caminos.

Para seleccionar la mejor alternativa o solución es necesario proceder sistemáticamente; primero un estudio previo, que permita recomendar una solución (a veces varias) y el año óptimo de su puesta en servicio. Luego viene la etapa de anteproyecto de la o las soluciones recomendadas y por último el proyecto de la obra completa. A continuación se indican las fases que se deben considerar al construir un túnel:

- El objetivo de la obra subterránea
- La geometría del Proyecto: trazado y sección tipo
- La geología y geotecnia del macizo
- El sistema Constructivo
- La estructura resistente: el Cálculo
- Las instalaciones para la explotación

PRINCIPIOS BASICOS DE DISEÑO

Con independencia del uso futuro de la excavación, que puede sin embargo condicionar la necesidad de disponer de un revestimiento definitivo como se expresa más adelante, una vez seleccionado un trazado, existen tres áreas principales a considerar en el diseño de la obra subterránea.

Una de ellas es la estimación de las dificultades asociadas con el terreno y el agua, existen a lo largo del trazado, así como la afección del medio ambiente, que hoy por hoy es uno de los principales ítems a tomar en cuenta al momento de construir cualquier estructura; por otro lado se deben considerar las estructuras próximas a la traza.

Entra dentro de éste área la modelización del comportamiento de los terrenos a excavar, con especial atención a la presencia de terrenos metaestables, cruce de zonas debilitadas y fallas, posición del nivel freático, cruce de zonas con elevada presión de agua, suelos dispersables bajo nivel freático, etc. Por otra parte es ahora imprescindible considerar como ya se dijo anteriormente la afección del medio ambiente, la afección a estructuras próximas o a sistemas de afección de acuíferos, etc..

También se deben considerar las cargas a soportar por el túnel, el diseño de los elementos de sostenimiento y la estimación de los movimientos inducidos por la excavación.

Cae dentro de ésta área de estudio la determinación del estado tensional del terreno afectado, la distorsión de éste estado por la presencia de fallas, zonas **milonitizadas** o elevadamente fracturadas, etc. Es significativo por ejemplo el caso del denominado túnel parietal, que es aquel que discurre por una ladera muy próximo

a la superficie y en donde existe normalmente un estado tensional asimétrico de la formación, etc..

Por otra parte son numerosos los sistemas existentes de diseño del sostenimiento y cálculo de la carga de terreno, que van desde los cálculos empíricos basados en una clasificación geométrica, hasta los modelos matemáticos basados en comportamientos elásticos y elastoplásticos, con la aplicación del método de los elementos finitos, muy desarrollados desde el uso intensivo de los modernos sistemas de cálculo informático y que han propiciado la existencia de numerosas aplicaciones específicas para el diseño de túneles.

La elección de los sistemas de excavación más adecuados es primordial, éstos hoy en día permiten: realizar el sostenimiento, al menos principalmente, antes de proceder a la extracción del terreno proceder a una estabilización y refuerzo de sus propiedades mecánicas antes de la extracción (inyecciones de variado tipo, jet-grouting, congelación de terrenos, etc.); o bien dotar de una presión interna a la cavidad creada que ayude a su soporte (aire comprimido, escudos mecánicos con bentonita, topos, etc..)

Cae también dentro de esta área la elección del sistema más idóneo de arranque del material que haga mínimo el daño que se produce con la excavación al terreno circundante.

Las técnicas de excavación que veremos más adelante juegan un papel importante dependiendo si el área en donde se va a realizar la excavación es muy compleja.

Un túnel con filtraciones es un drenaje con consecuencias respecto al régimen freático del terreno suprayacente. Esto puede acarrear inconvenientes con respecto a la agricultura, desecar pozos de abastecimiento, etc. En áreas edificadas

puede originar asientos y averías, o incluso la ruina de edificaciones. Esto ha ocurrido con mucha frecuencia pero un caso particularmente espectacular se presentó en Oslo, en donde unas filtraciones, realmente escasas, en un túnel de comunicaciones, desecaron una pequeña cuenca subterránea prácticamente cerrada, con escasa aportación externa, ocupada principalmente por estratos de arcilla blanda, lo que originó grandes asientos y daños.

Es por lo tanto necesario que el diseño del túnel esté integrado, y tenga presente las tres grandes áreas que condicionan la actividad futura de la construcción.

1. Mantenimiento de la Capacidad Portante de la Roca

La componente esencial del sostenimiento del túnel es la propia roca, por lo que para garantizar esta función. Debe ser excavada adecuadamente para evitar que se afecten sus características geomecánicas. Además mediante la adecuada colocación en el tiempo de un sostenimiento se debe evitar su alteración y debilitamiento.

Es necesario recalcar la conveniencia de evitar la concentración de tensiones, ya que ésta destruye la roca, por lo que estas concentraciones deben limitarse a zonas de pequeña área, eligiendo adecuadamente la sección tipo de excavación teniendo en primera aproximación a formas en general muy redondeadas.

2. Sostenimiento Flexible

Si es necesario, se debe colocar un sostenimiento flexible en el momento adecuado, debiendo éste permitir las deformaciones necesarias en el terreno para lograr la descarga y debiendo evitar las deformaciones excesivamente grandes que tiendan a debilitarlo.

Un aspecto esencial es que en terrenos difíciles se debe lograr un cierre completo del sostenimiento lo más rápidamente posible para formar un anillo resistente que estabilice la roca afectada por la excavación.

3. Control y Supervisión de la excavación

Para conseguir la adecuada información que permita la toma de decisiones es imprescindible llevar a cabo una medición continua de las deformaciones que se producen en el interior de la cavidad, y de las tensiones sobre el sostenimiento. Por otra parte todos los elementos de sostenimiento se deben y de hecho se pueden ir adaptando a los cambios en las condiciones del terreno, ya que esta es una información que también se desprende del control de mediciones que se realice.

Normalmente y debido a su bajo costo, la auscultación se realiza mediante la medición de convergencias en secciones instrumentadas que típicamente, y para condiciones medias de excavación, se sitúan a distancias entre 15 y 40 m. y cuya frecuencia de lectura decrece, en condiciones normales, según se va alejando del frente de excavación.

METODOS CONSTRUCTIVOS

Criterios para la Evaluación de los Métodos de Ejecución de Túneles

En el cuadro que se encuentra a continuación he resumido lo que se puede llamar “criterios de evaluación a aplicar”, en el caso de una obra subterránea.

Por una parte, señalamos el origen o procedencia de la problemática a considerar. Son las llamadas condiciones que imponen el país o el entorno; las propias necesidades de Proyecto (diseño o funcionalidad); las características del macizo rocoso a atravesar, y, finalmente, el tipo y límite de las prestaciones que ofrecen los equipos que pudieran seleccionarse en principio.

Cabe destacar del cuadro citado, por una parte, la clasificación de los macizos rocosos los que inciden directamente al momento de seleccionar el método para ejecutar el túnel.

Los macizos rocosos poseen muchas clasificaciones las que toman parámetros como la resistencia a compresión simple, el factor conocido como RQD que mide la fracturación y así otro tipo de factores que afectan al momento de decidir que tipo de excavación usamos.

CONDICIONES DE:	FUENTES DE INFORMACION (Métodos de Trabajo)		VARIABLES O FACTORES A EVALUAR:			
1- El País	Restricciones que impone la legislación o normativa sobre:		Mano de Obra Materiales Equipos			
2- El entorno del proyecto (ecología del entorno)	Legislación o normativa de obligado cumplimiento (general o local) sobre:		Vibraciones, ruidos, polvo... Afectación a obras próximas (subsidiencias) Otras limitaciones en áreas urbanas/industriales			
3- El proyecto (o el diseño)	FUNCIONALIDAD: Normas generales relativas a:		Carreteras / FF.CC. / Obras Hidraulicas / Energía...			
	SECCIONES DE PROYECTO (Estabilidad, resistencia)		Formas / Dimensiones de la Sección tipo Cámaras, accesos... Impermeabilización, drenajes			
	Características del TRAZADO		Longitudes / Pendientes / Curvas en la sección tipo Id de accesos y otros			
4- El macizo geológico (o el macizo rocoso)	CLASIFICACION de macizos rocosos (clasificación de rocas)		E	Resistencia	Dureza	Característ. de la roca Matriz
			N	Tenacidad	Abrasividad	
			S	Perforabilidad		
INVESTIGACIONES Geotécnicas		Sondeos / Catas	A	P. específico / Compos. Química		Característ. Del macizo
		Geofísica (sísmica, microsísmica...)	Y	Petrografía / Mineralogía / Litología		
			O	Fracturación		
			S	Discontinuidades y su frecuencia Contenido de agua (y otros fluidos)		
			Lab.	Estado tensional Interno		
5- El equipo de Construcción	FABRICANTES de equipo		Rendimiento-tiempos (Límites del proyecto) Características de las máquinas (en relación con las señaladas y otras del equipo)			

CUADRO 1

Variables o Características de la Roca Matriz y del Macizo Rocoso

Siguiendo el cuadro anterior haré unos comentarios sobre definiciones y métodos de medidas de estas variables.

- Resistencia y Dureza

Usualmente, de las dos variables que miden la resistencia, a compresión simple y a tracción, en la tecnología de equipos y, por tanto, en su selección, se emplea sólo la primera. La resistencia a compresión simple se obtiene en laboratorio sobre muestras de la roca matriz de dimensiones Standard (normalmente de relación altura/diámetro = 2/1).

La dureza define la aptitud de corte de la roca, sea por la resistencia que ésta opone a la penetración de un útil de ensayo (método NCB y Ensayo CERCHAR), sea por la altura del rebote en otros métodos de medida (martillo SCHMIDT o escleroscopio SHORE).

Puede decirse que la excavabilidad de la roca o, mejor, su perforabilidad tiene más que ver con la dureza que con la resistencia a compresión; pero también es cierto que hay una correlación estrecha entre ambas variables y que, a efectos prácticos, es admisible considerar como factor inicial, al hablar de excavabilidad, la resistencia a compresión.

- Tenacidad

Es característica a tener en cuenta en ciertas rocas de estructura fibrosa, como el yeso o la **serpentina**, que, siendo rocas blandas, pueden presentar dificultades para el corte o desintegración mecánica, más relacionados con esta característica que con la dureza. Sirva la referencia para recordar que, en estos casos pueden convenir los ensayos de tenacidad.

- Abrasividad

Es una característica importante para estimar, sobre todo, los costes de los sistemas de ejecución, pues afecta tanto al corte mecánico como a la perforación de la roca.

- Perforabilidad

Así como para las otras variables o factores a cuantificar hay consenso general en el concepto y existen, simplemente, diversos métodos de ensayo, todavía no existe un ensayo, con cierta aceptación, para medir la perforabilidad. Continúan las discrepancias, desde considerar la perforabilidad definible a partir de la resistencia a compresión y la abrasividad, hasta proponer el ensayo “in situ” de cada roca concreta, como único criterio fiable.

- Fracturación

Es un factor muy importante, pues cuanto mayor sea la fracturación real que las rocas matrices de cada macizo puedan presentar, mayor es la posibilidad de excavarlas, al menos por corte, rozado o “rippado” mecánicos. En cuanto al uso de explosivos, hay contradicción entre la dificultad de perforación y la ventaja de reducción de carga en una roca medianamente fracturada.

El método más común de medir la fracturación es el índice RQD, que evalúa el % de testigo recuperado de un sondeo a rotación de al menos 4” de diámetro. Se considera testigo recuperado al conjunto de trozos que superan los 10 cm.

Hay que señalar también que la sísmica, que puede facilitarnos datos iniciales de orden de magnitud de la resistencia, es aplicable, sobre todo, a la fracturación, con ensayos exteriores sobre los afloramientos o incluso en el interior de los sondeos.

- Discontinuidades y su frecuencia

Siendo un factor importantísimo para la idoneidad de un sistema de excavación, no hay metodología concreta de laboratorio y la apreciación tiene que hacerse de forma visual por el examen de calicatas o testigos de sondeos, aparte de la información inicial que puede obtenerse por sísmica.

METODOS DE EXCAVACION O AVANCE

Los métodos constructivos se clasifican en cuatro grupos, que se describen a continuación:

1. Excavación con explosivos:

Durante muchos años ha sido el método más empleado para excavar túneles en roca de dureza media o alta, hasta el punto de que se conoció también como *Método Convencional de Excavación de Avance de Túneles*. La excavación se hace en base a explosivos, su uso adecuado, en cuanto a calidad, cantidad y manejo es muy importante para el éxito de la tronadura y seguridad del personal, generalmente se usa dinamita. La excavación mediante explosivo se compone de las siguientes operaciones:

- Perforación
- Carga de explosivo
- Disparo de la carga
- Evacuación de humos y ventilación
- Saneamiento de los hastiales y bóveda
- Carga y transporte de escombros

Actualmente, puede decirse que el avance con explosivos sigue siendo, estadísticamente, el método más frecuentemente aplicado, y el que ofrece posibilidades de empleo, con muy pocas excepciones.

2. Excavaciones mecánicas con Máquina:

Se consideran en este grupo las excavaciones que se avanzan con máquinas rozadoras; con excavadoras, generalmente hidráulica – brazo con martillo pesado o con cuchara, sea de tipo frontal o retro-; con tractores y cargadoras (destrozadoras) e, incluso, con herramientas de mano, generalmente hidráulicas o eléctricas.

3. Excavación mecánica con máquinas integrales no presurizadas:

Esta excavación se realiza a sección completa empleando las máquinas integrales de primera generación o no presurizadas. Otro rasgo común es que, en general, la sección de excavación es circular.

4. Excavación mecánica con máquinas integrales presurizadas:

La baja competencia del terreno suele asociarse a casos de alta inestabilidad y presencia de niveles freáticos a cota superior a la del túnel la primera solución aplicada a los escudos mecanizados abiertos para trabajar en estas condiciones fue la presurización total del Túnel.

Dentro de éstos cuatro métodos constructivos de túneles coexisten los métodos de excavación de ellos, entre los cuales podemos destacar por ser los más utilizados los siguientes:

Revisemos en forma esquemática los diversos métodos clásicos empleados en la perforación de túneles y que se centran fundamentalmente en diferentes secuencias de excavación, estos métodos han sido empleados a lo largo de la historia con diversos resultados, y en diversas condiciones de terreno:

Método Inglés: recibe su nombre por haber sido aplicado en túneles a través del tipo de terreno que usualmente se localiza en Inglaterra, como son las arenas y areniscas. Su principal característica es proceder el avance de la perforación a sección completa del túnel, en una sola operación.



Método Belga: Se basa en los principios que permitieron la construcción, en 1828, del túnel del Charleroi en el canal que enlaza Bruselas y Charleroi.



Método Alemán: En este método se procede siguiendo el sistema de núcleo central, ver figura.

Método Alemán Modificado: Se aplica en el caso en que durante la operación de perforación del túnel a través de un terreno bastante firme, surja la aparición de agua, lo que origina una alteración en el método Clásico Alemán en cuanto a las etapas sucesivas de ataque del frente.



Método Austríaco: Los austríacos desarrollaron un plan de trabajo basado en la utilización de puntales de madera formando un sistema de entibación. La excavación se realiza como indica la figura.



Método Italiano: Consiste en extraer solo el medio arco más la galería central por la cual se retira la marina, luego se concreta el medio arco, luego se extrae el resto del material por zonas y se van concretando los muros (método similar al método belga).

En nuestro país el método más utilizado es el Nuevo Método Austriaco de Construcción de Túneles, el cual, más que un método merece el nombre de *metodología*, pues no construye un procedimiento seriado en concreto, sino que tiene como característica esencial buscar la colaboración de la roca o de el terreno, lo que es un aspecto común en todas las teorías de equilibrio límite, ya que, la idea misma de la bóveda de descarga, es una forma de estimar la limitación de las presiones sobre el revestimiento, debido a la colaboración del terreno en los casos en que forme una capsula estable.

Esta metodología consiste en la excavación de piques de acceso de alrededor de 15 metros de diámetro, por donde se ingresa tanto la maquinaria liviana que efectúa las excavaciones como los equipos y materiales necesarios para la construcción del túnel.

A partir de este pique se inician las excavaciones, sin recurrir a explosivos dada la naturaleza favorable del subsuelo, avanzando simultáneamente en dos direcciones opuestas y en tramos cortos de no más de un metro. Para su sostenimiento, la bóveda del túnel es revestida inmediatamente con hormigón proyectado (shot crete) reforzado con malla metálica, marcos reticulares envueltos en el hormigón proyectado y pernos sellados en toda su longitud. Posteriormente, se instala el revestimiento definitivo de hormigón armado de alta resistencia, hasta obtener el ancho de las paredes del túnel especificado.

A medida que se avanza, se instalan las mangas de ventilación, que permiten efectuar los trabajos al interior del túnel, en una atmósfera libre de polvo.

Este método constructivo de túneles, de desarrollo local, tiene la ventaja de reducir las interferencias en la superficie a costos similares y equivalentes al método a "tajo abierto" (cavar y tapar).

Sin embargo esta metodología es prohibida en algunos países como España debido a hundimientos de terreno tanto en la etapa de construcción como en ya en la de funcionamiento de estos túneles lo que ha obligado a la evacuación de personas en Madrid y la región de Cataluña.

INFLUENCIA DEL TERRENO EN EL SISTEMA CONSTRUCTIVO

Con respecto al sistema de construcción e impermeabilización se pueden distinguir tres tipos de terreno,

- Terreno duro.
- Terreno quebradizo.
- Terreno blando.

Terreno duro: se utilizan procedimientos de excavación en grandes bloques y dada la naturaleza del terreno el túnel es estable (por cierto tiempo) no siendo necesario un sostenimiento previo. En estos casos no hace falta la utilización de revestimientos que soporten el terreno y establezcan un equilibrio, basta con eliminar irregularidades y rellenar fisuras mediante hormigón proyectado, y aplicar después el sistema de impermeabilización sobre esta superficie ondulada y rugosa.

Por último se revestirá con hormigón encofrado o proyectado si es necesario formar la estructura de soporte del túnel, teniendo en cuenta la presión del terreno e incluso del agua.

Terreno quebradizo: no se puede construir el túnel a sección completa, es preciso hacerlo por etapas sucesivas dando lugar a varios tipos de avance (nuevo método Austriaco, Belga, Inglés, etc.) siendo preciso la realización de un sostenimiento previo en cada fase que garantice la seguridad del túnel y por lo tanto

del avance (cerchas, hormigón proyectado, bulones, etc.). Es sobre este soporte y antes del revestimiento estructural, donde se realizará la impermeabilización.

Terrenos blandos: en este tipo de casos (plásticos) el túnel tiene que estar construido en el espacio creado por la máquina tuneladora (T.B.M.) y por tanto es preciso que la construcción del soporte se efectúe enseguida en dicho espacio.

En este tipo de terreno existen dos formas de conseguir la estanqueidad. sellado de juntas entre dovelas, o un sistema de impermeabilización de superficies de dichas dovelas (en el caso de dovelas reticulares o metálicas, es necesario primero igualar la superficie como soporte del sistema de impermeabilización).

Cuando la unión entre dovelas y la impermeabilización no sea suficiente para soportar la presión del agua, es necesario construir un revestimiento interior con hormigón encofrado.

Una vez definidos los procedimientos de impermeabilización, según la influencia del terreno, será importante resaltar la determinación de consecuencias para la elección del material de impermeabilización. Con revestimientos rígidos solo se necesita un material de flexibilidad muy pequeña sin embargo con revestimientos flexibles (dovelas) solo se puede utilizar materiales con un alto grado de elasticidad.

SECCION TRANSVERSAL DE UN TUNEL

La figura muestra un esquema de la sección transversal de un túnel.

- Calzada bidireccional con pistas de 4m c/u
- Veredas peatonales de 0,85 m. a cada lado
- Canaletas de drenaje de filtraciones y derrame de líquidos
- Canaletas para ductos
- Gálibo útil vertical mínimo de 5m., en todas las pistas de circulación vehicular
- Pendiente longitudinal mínima, la que permita un adecuado drenaje.
- Zonas de aparcamiento en túneles de más de 1.000 m.

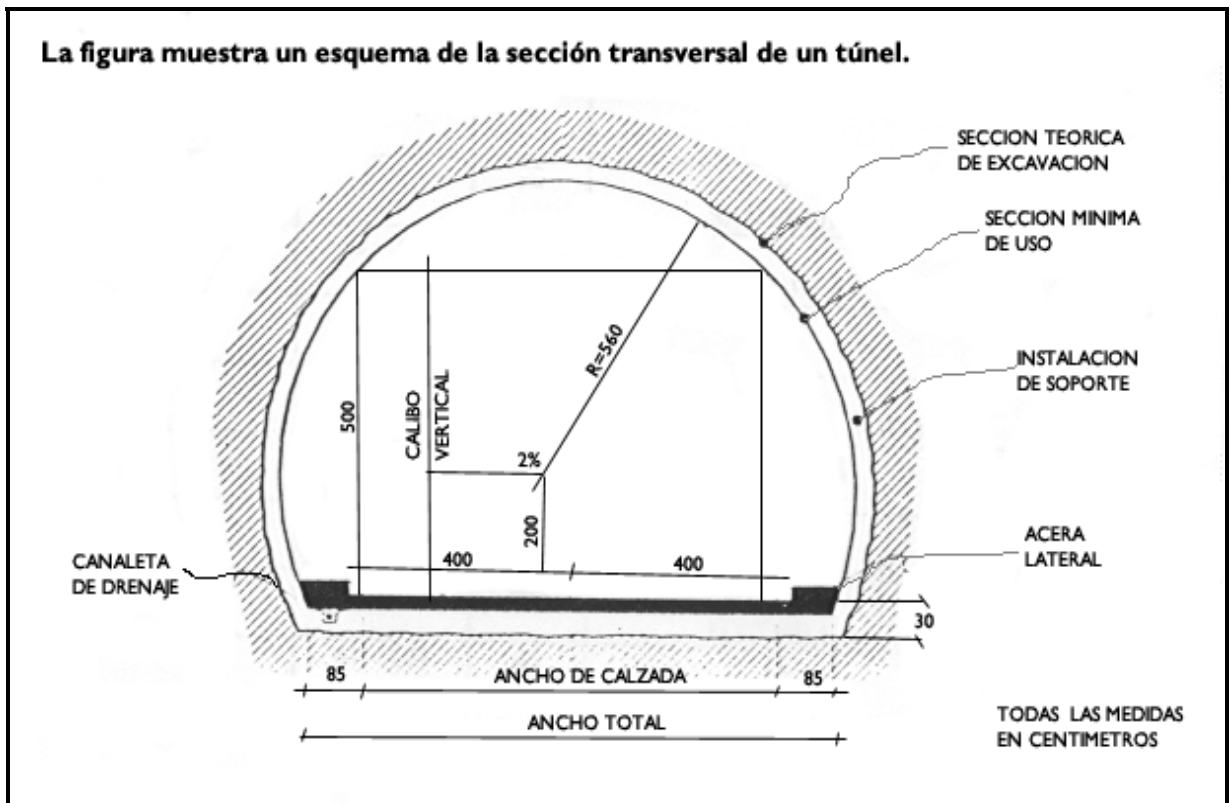


Figura N° 1

LOS TUNELES Y EL AGUA

No parece necesario esforzarse para demostrar la influencia del agua freática, su caudal, su presión, su temperatura, sobre las distintas etapas de la construcción, excavación y puesta en marcha de los túneles. Todos podemos recordar un elevado número de ellos que sufrieron retrasos en su construcción, e incluso paralizaciones que duraron años, por esta causa. Igualmente, otros muchos experimentaron y experimentan dificultades en su explotación e incluso en su permanencia, y en el caso que veremos detalladamente más adelante durante todo su funcionamiento, eso si, debido a la antigüedad del túnel y la escasa tecnología disponible para ese entonces.

Por otra parte, el túnel también influye en el agua freática, lo cual puede tener consecuencias de muy diverso género (asientos, hinchamientos, inundación de sótanos, depresión de la capa freática con pérdidas de rendimientos de pozos, decaimiento de la vegetación, etc.) que pueden tener lugar a distancia mucho mayores de las que pueden alcanzar las acciones mecánicas de la excavación de la cavidad.

Según la literatura consultada podemos clasificar estas influencias en tres grupos:

1. Interferencia de un caudal de agua demasiado elevado, y, en algunos casos, demasiado caliente, con las operaciones constructivas. Esta interferencia puede ser puramente mecánica, es decir, que dificulte o incluso impida el trabajo, en medio de una fuerte corriente de agua. Pero en otros casos, el flujo es capaz de desencadenar una erosión regresiva o incluso una **solifluxión**

2. Inestabilidad de la cavidad excavada, producida en parte por la degeneración de las cualidades resistentes del terreno. En otra parte, a veces la más importante, por las fuerzas de filtración en la aureola de terreno alrededor del túnel. Es ésta una inestabilidad de masa que no siempre es fácil de diferenciar de las manifestaciones erosivas del grupo anterior, pero que es preciso tratar de manera distinta: la erosión puede ser detenida con dispositivos de captación y filtrado, que no tendrían el menor efecto sobre los fenómenos de éste segundo grupo.

3. Efectos del túnel sobre su faja de influencia. Los debidos a la influencia sobre el agua freática se superponen a los que son consecuencia de la descompresión producida por la excavación. Pero podemos identificar lo siguiente:
 - 3.1 Esta descompresión ser mayor cuando hay agua, debido a los efectos referidos el los dos puntos anteriores.
 - 3.2 Se producen efectos de otra clase, debidos a la alteración que la construcción del túnel, y, posteriormente, su presencia como inclusión impermeable, origina en el agua freática (y con mayor razón, si tiene filtraciones en uno o en otro sentido). Es característico que estas acciones alcancen distancias mucho mayores que las debidas a la descompresión, y que puedan traducirse en asientos pero también en levantamientos.
 - 3.3 Mientras que los efectos citados en el punto anterior suelen tenerse en cuenta habitualmente, y han sido objeto de atención en numerosas publicaciones, hay otros que con frecuencia son soslayados.

La alteración de los regímenes hidrogeológicos muchas veces grande durante la construcción, muy superior a la que produce el túnel terminado, ocasiona con frecuencia perjuicios a las captaciones de agua

subterránea que pueda haber en el área de influencia, pero, además, tiene consecuencias sobre el medio ambiente, que pueden ser irreversibles.

En efecto, un rebajamiento del nivel freático prolongado durante unos cuantos meses es capaz ocasionar cambios permanentes en las asociaciones vegetales del área afectada. Pero, además, es relativamente frecuente que el nivel anterior no se reponga jamás, o al menos tan sólo al cabo de un largo tiempo, con ocasión de un ciclo de lluvias excepcionales. Esto se debe a la intensa **histéresis** que presentan los ciclos de humedad en los suelos semisaturados, y también a la formación de trampas de aire, y a la desconexión de sifones capilares.

De estos tres grupos de cuestiones, el primero exige que, en el proyecto, se haga un riguroso estudio hidrogeológico del trazado. Las técnicas geofísicas, tales como la **tomografía**, medida de potenciales, etc., pueden tener un papel importante en esta etapa. Desde el punto de vista constructivo, un caudal importante, pero proveniente de un depósito fósil, puede no representar un problema grave, pues decrecerá o se extinguirá al cabo de algún tiempo. Pero también debemos considerar en estos casos que vamos a producir una alteración irreversible.

La estimación de los caudales que van a entrar en el túnel tiene que hacerse poniendo en juego todas las técnicas de la hidrogeología, como sostienen los grandes investigadores de este tipo de problemas en la construcción de túneles.

En cuanto al segundo grupo de dificultades, las referentes a la estabilidad de la excavación, es preciso dividirlo en dos subgrupos, el de los túneles superficiales y los profundos. En los primeros, como hemos visto antes, siguen teniendo cierta

vigencia los métodos clásicos de cálculo, basados más o menos en las teorías de empuje de tierras, que, en túneles profundos, están hoy ya, prácticamente olvidadas.

En estas últimas, es claro el predominio del Nuevo Método Austriaco (NATM) como interpretación fenomenológica de la plastificación progresiva de una aureola en la periferia del túnel. Pero la influencia del agua en este proceso es un tema que merece una atención particular.

Hay que hacer notar, ante todo, que esta influencia ha sido de cierta manera tenida en cuenta en los criterios de clasificación de rocas.

Contrariamente, la formulación clásica del NATM considera que las deformaciones del terreno son consecuencia única de la planificación de la aureola, así como de la deformación elástica del terreno exterior a ella. Esto equivale a un cálculo de presiones totales, lo cual resulta lícito en condiciones que desde hace ya muy largo tiempo han sido fijadas en el estudio de otros tipos de problemas. Estas pueden sintetizarse muy brevemente, aun cuando con ello se pierda precisión, diciendo que es en los casos en los que las presiones del agua intersticial, o no existan, o sean constantes, o, por último, que estén de tal manera asociadas a las tensiones totales, que las tensiones efectivas puedan representarse como función de aquellas.

Es evidente que este no es el caso de un túnel, en el que las presiones del agua intersticial están controladas primordialmente por las condiciones de drenaje, y no por las tensiones. Y es esencial señalar que el estado de estas presiones es marcadamente un fenómeno transitorio, que sigue el proceso de avance del túnel, pero sin estar acoplado, aun cuando sea simultáneo, con las variaciones del estado de tensiones en los alrededores del frente de la excavación.

Esto tiene como consecuencia que, en el proceso de deformación, que constituye la base del análisis que el NATM hace del estado del terreno, con la finalidad de hacer una predicción sobre la evolución futura, influyan dos grupos de funciones escasamente relacionadas entre sí: las que definen la fluencia plástica, teniendo también en cuenta la viscosidad estructural del esqueleto sólido del terreno y las que representan la evolución de la red de movimiento del agua hacia la excavación o también, en su caso, hacia galerías de drenaje exteriores a la misma, o pozos profundos destinados a rebajar la capa freática, procedimiento que vemos aplicado en varios importantes túneles recientes.

La existencia de deformaciones diferidas es, sin duda, uno de los fenómenos más conocidos de quienes aplican el NATM y hasta puede considerarse que es el que lo hace factible. Por lo tanto, ha sido analizado en numerosos y excelentes trabajos. Pero, en su gran mayoría, no se encuentra el concepto de esta doble causa de los mismos.

El efecto del agua sobre la estabilidad del túnel no se limita al arrastre y erosión interna. Hemos hablado antes de un radio de plastificación en los terrenos coherentes. Existe también por supuesto, un radio de plastificación en los terrenos con rozamiento, y este radio se encuentra determinado por las condiciones de filtración.

LA SUPERFICIE DE ESTADO

En el caso de que no exista el problema del agua, el terreno exhibe una capacidad de convergencia que quedará definida por una "línea de terreno" que, juntamente con la "línea de revestimiento", constituyen las herramientas básicas del NATM. En cierto modo, esta línea no es única, por un cierto retraso de las

deformaciones, debido a la viscosidad estructural del terreno. Así pues, hay en realidad toda una familia de “líneas de terreno” cada una correspondiente a un cierto retraso en la aplicación del revestimiento después de la excavación en el frente. Estas líneas del terreno componen una “superficie de estado”, si añadimos, como tercera coordenada, el tiempo.

Sin embargo, a pesar de la importancia que esta viscosidad estructural puede tener esta “superficie de estado” no ha despertado interés en las técnicas.

Pero, si existe agua, este efecto de retardo puede ser muy importante, ya que la llegada del frente implica un cambio muy grande del estado tensional que origina, a su vez, un cambio de las presiones del *agua intersticial*, lo cual desencadena un fenómeno de consolidación o hinchamiento que, según la permeabilidad del terreno, puede ser muy lento.

Por lo tanto, tenemos, en lugar de la línea del terreno, toda una “superficie de estado”, tal como la de la figura. Según la velocidad de avance, y el tiempo que se tarde en colocar el revestimiento primario, el terreno del túnel pasará por una serie de estados que pueden definir trayectorias diversas, pero siempre situadas sobre la mencionada superficie (cuya unicidad, por otra parte, no es perfecta, pero comparable a la de otras superficies de estado que aceptamos y manejamos).

Empleo de la técnica de Congelación de Suelos

Dentro de las diversas aplicaciones de la técnica de la congelación de suelos a las obras públicas y urbanas es de interés su empleo en la ejecución de túneles.

En este tipo de obras, el suelo congelado actúa por lo general como elemento resistente y como impermeabilización del recinto frente al flujo del agua, con carácter provisional en tanto se construye la estructura definitiva.

La congelación del terreno para la construcción de túneles se ha aplicado en diversas ocasiones, la mayoría de ellas en Europa.

Este procedimiento, que utiliza la circulación de fluidos criogénicos por sondas, permite la consolidación temporal de suelos y terrenos inestables (construcción de túneles, salvamento de obras en caso de desprendimiento de terreno).

CAPITULO II: SISTEMAS DE IMPERMEABILIZACIÓN DE TÚNELES

INFLUENCIA DEL AGUA

La impermeabilización de un túnel estará influenciada por el tipo y calidad del agua del terreno.

En general se distinguirán los túneles situados en zonas de aguas subterráneas, en zonas de saturación o en la franja capilar. La intensidad de agresividad del agua contra el revestimiento depende del tipo de agua del terreno y puede manifestarse de dos formas.

- Agua Capilar
- Agua de cepa Hídrica

Según estas dos formas, existe una clasificación de las medidas a tomar en cuenta a las técnicas de impermeabilización.

Impermeabilización en franja capilar: la cual debe ser efectuada en toda construcción subterránea, ya que deberán cerrar los poros para evitar que la humedad llegue al interior según las leyes de los capilares.

Impermeabilización en zonas de saturación: deberá ser una impermeabilización flexible y resistente a la presión del agua. Se deberá desviar el agua para que no se forme presión, normalmente esta agua desviada se recoge en un drenaje longitudinal del túnel.

Impermeabilización en agua subterránea: deberá ser una impermeabilización flexible y cerrada y resistente a la presión del agua subterránea. Durante la construcción será necesario bajar el nivel freático o eliminarlo con aire comprimido.

En todos los casos es indispensable para la elección del material de impermeabilización, el conocimiento de la composición química y condiciones físicas del agua y del terreno, ya que ciertas sustancias disueltas en ambos pueden atacar la impermeabilización.

IMPERMEABILIZACIÓN DE TÚNELES

Teniendo en cuenta la influencia de los diversos factores, los requisitos y los tipos de soportes en los trabajos de impermeabilización de túneles, como el volumen de filtraciones existentes y el tipo de revestimiento previsto, la impermeabilización puede comprender desde una hasta cuatro fases:

Fase 1. Impermeabilización primaria: serán los trabajos provisionales de taponamiento o recogida y conducción de aguas para permitir la ejecución posterior de las impermeabilizaciones intermedia y principal.

Fase 2. Impermeabilización intermedia: son los trabajos posteriores a la impermeabilización primaria mediante la aplicación de gunita, hormigón proyectado o morteros. La impermeabilización intermedia puede ser de protección cuando se aplica un hormigón o mortero proyectado armado de un espesor no superior a 7 cm en toda la superficie a tratar, de esta forma se consigue proteger el método primario; o de regularización cuando la aplicación de la gunita u hormigón proyectado tiene por finalidad servir de soporte a la impermeabilización principal y su espesor suele ser de 10 a 250 mm.

Fase 3. Impermeabilización principal: consistirá en la instalación de un geotextil, de una membrana impermeable de PVC o cualquier otro material que garantice la absoluta estanqueidad del túnel.

Fase 4. Impermeabilización posterior: son aquellos trabajos previstos o no, complementarios de la impermeabilización principal o bien trabajos de reparación que conduzcan posteriormente a la estanqueidad de la construcción. Su aplicación se adecuará según la importancia de las filtraciones o la calidad del soporte de ejecución.

Beneficios de la estanqueidad

Los sistemas tradicionales de impermeabilización alcanzan costes muy elevados por m², principalmente cuando existen fuertes filtraciones de agua en la fase de ejecución, bajas temperaturas o paramentos muy irregulares producidos por voladuras.

A la hora de diseñar el tipo de impermeabilización de túneles y galerías es importante asegurar la estanqueidad y buen funcionamiento en el tiempo, puesto que:

- La penetración de agua por las fisuras de la roca, amenaza el revestimiento de hormigón, por efecto del hielo tanto en las boquillas como en los túneles cortos.
- El agua de filtración conduce en Invierno a la formación de hielo en la calzada, con el consiguiente peligro para la circulación de los vehículos.
- El agua de filtración da lugar a eflorecencias y concreciones calcáreas sobre la superficie interior del revestimiento, con la consiguiente lixiviación del hormigón.
- La impermeabilización asegura la protección del revestimiento de hormigón, contra la agresividad del agua de filtración (ejemplo: sulfatos).

La impermeabilización de túneles tiene gran importancia, tanto técnica como económicamente, ya que contribuye a mejorar su calidad, conservación y resistencia.

Los túneles mal impermeabilizados necesitan de una importante inversión en mantenimiento, debido a la lixiviación, los desperfectos de las paredes de hormigón y a la formación de hielo.

REQUISITOS A TENER EN CUENTA EN UN PROYECTO

Los requisitos de los componentes fundamentales en la impermeabilización de un túnel serán, primero la membrana como elemento impermeable y segundo el geotextil como elemento de protección, para los daños mecánicos como para la evacuación de las aguas de filtración.

Cuando se crea necesario, dependiendo de los caudales de filtración, se efectuará una impermeabilización primaria a base de drenes en forma de espina de pez (sistema Oberhasli) para recoger y conducir las aportaciones de agua a los drenes longitudinales. Este sistema se efectuará dependiendo de las zonas de mayor filtración o no, en cuyo caso su aplicación será puntual.

Los drenes tienen carácter provisional y su misión además de recoger el agua será la de presentar unos soportes adecuados para la impermeabilización definitiva posterior.

En el diseño de la impermeabilización de un túnel se deberá tener muy en cuenta sus drenajes y la protección de los mismos.

El drenaje asegurará la evacuación sin presión de las aguas de filtración a través de los drenes longitudinales. Dicho drenaje deberá tener el diámetro suficiente (mayor a 20 cm. para facilitar los trabajos de mantenimiento y conservación), y sus aberturas de entrada proporcionales al agua de filtración.

Los sistemas de impermeabilización primaria (drenaje) son:

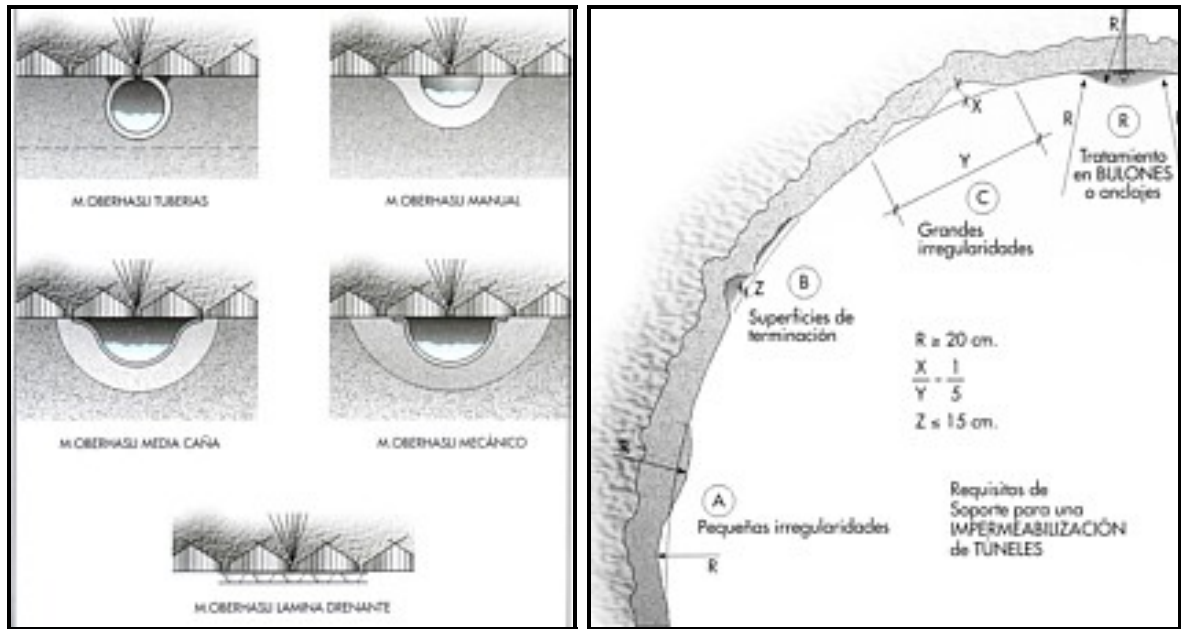


Figura N° 2

- Dren autoformado mediante gunita con acelerante ultrarrápido sobre mangueras retiradas para formación de dren.
- Medias cañas de material plástico, adosadas al contorno o perímetro, en forma de espina de pez, protegidas en su colocación mediante pasta de cemento con acelerante ultrarrápido, capaces de fraguar en presencia del agua y a su vez protectores de la media caña.
- Dren autoformado mediante pasta de cemento y acelerante ultrarrápido, en forma de espina de pez, capaz de obturar y fraguar en presencia del agua.
- Media caña de fibrocemento, adosadas al contorno o perímetro, en forma de espina de pez, protegidas en su colocación mediante pasta de cemento con acelerante ultrarrápido, capaces de fraguar en presencia de agua y a su vez protectores de la media caña.

La impermeabilización primaria (drenaje) deberá ser protegida con gunita o mortero, debido a la provisionalidad y a la utilización de acelerantes de fraguado,

tanto para evitar su fisuración como para conseguir un soporte adecuado para fijar la impermeabilización con membrana.

Entre los requisitos a tener en cuenta en el soporte, se establecerán los siguientes:

- La profundidad de una irregularidad no deberá ser superior a 15 cm. respecto a la superficie de terminación.
- Los elementos de anclaje y bulonado que sobresalgan del soporte se cortarán en su parte no funcional.
- No existirán irregularidades con un radio inferior a 20 cm.
- En una irregularidad la relación profundidad/ extensión debe ser igual o inferior a 1/5.

Por último los requisitos de la impermeabilización principal serán los que a continuación se detallan:

- La impermeabilización deberá proteger y envolver la superficie de la obra, de manera durable contra el agua de filtración.
- La impermeabilización debe ser puesta en obra de manera sencilla, económica y racional, sin interrumpir el desarrollo de los trabajos posteriores, e independientemente que el soporte este húmedo.
- La membrana de impermeabilización deberá ser suficientemente resistente para continuar siendo estanca después de las sollicitaciones mecánicas resultantes del proceso de hormigonado posterior.
- El geotextil debe garantizar la evacuación del agua de filtración, sin entrar en carga, de manera durable hacia los drenes longitudinales.

- La impermeabilización se deberá adaptar a las irregularidades del soporte.
- La impermeabilización deberá resistir las cargas sobre el encofrado y el empuje del macizo rocoso sobre la bóveda interior definitiva.
- Se evitará la realización de trabajos próximos a la impermeabilización que puedan producir chispas, llamas o calor radiante.
- Los componentes de la impermeabilización (geotextil y geomembrana) deberán ser imputrescibles, resistir al envejecimiento y químicamente inalterables.
- Las láminas con las que se confecciona la membrana, deben ser soldables y sus uniones deberán poder ser verificadas mediante un control de soldadura.
- Todos los materiales que formen parte del sistema principal de impermeabilización deberán ser autoextinguibles, para evitar riesgos de incendios.

MATERIALES PARA LA IMPERMEABILIZACION PRINCIPAL

GEOTEXTILES

En lo que respecta al geotextil, tendrá la misión de proteger la impermeabilización en su fase de instalación, como posteriormente durante su puesta en servicio, tanto en los posibles daños internos y externos.

Además tendrá la función de hacer circular el agua de filtración hacia el exterior de la impermeabilización, sin que se produzca presión hidrostática.

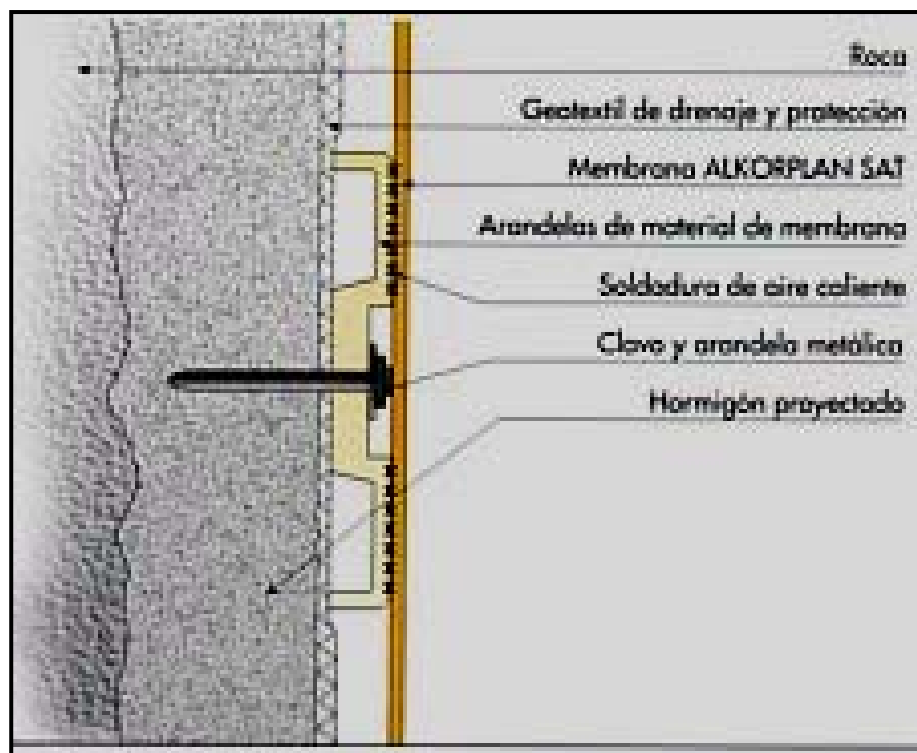


Figura N° 3

El geotextil utilizado en el sistema de impermeabilización, que servirá como capa protectora y compensadora, tiene también una función importante como desagüe superficial de aguas de filtración.

Esto significa que el geotextil evita la perforación de la geomembrana en las aristas y puntos salientes y facilita el deslizamiento de la misma cuando es solicitada

por posibles movimientos del soporte a la protección, pero también evacua el agua en su plano, para evitar la formación de subpresión y el aire hacia el drenaje longitudinal.

Los geotextiles a utilizar serán siempre no tejidos, cuyas fibras serán 100% polímeros sintéticos, unidas mecánicamente mediante punzonado (agujado).

No se deberá permitir el uso de geotextiles que no sean resistentes a soluciones de alta alcalinidad ($\text{pH} > 12$).

El geotextil debe ser estable frente:

- Al contacto con morteros y hormigones.
- Al agua de filtración.
- Al hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- A pH comprendido entre 2 y 12,8.
- A la pérdida de masa por el proceso de hidrólisis.

Mejora de Suelos Mediante la Técnica del JET GROUTING

La mejora de suelos en los términos que nos interesan, o sea lo que se refiere a la reducción de la permeabilidad e incremento de resistencia, puede obtenerse por varios métodos inyección, que pueden resumirse en:

- Inyección de “impregnación”, en el cual el producto de inyección rellena los espacios vacíos sin cambios significativos del volumen y de la estructura del suelo.

- Inyecciones “con desplazamiento” o de “compactación”, en las cuales una mezcla densa crea un flujo radial que desplaza o comprime el suelo circundante.
- Inyecciones de “fracturación (claquage)”, en las cuales el suelo se fragmenta por fracturas hidráulicas: la lechada recubre y comprime, pero no penetra en los fragmentos individuales.
- El “jet grouting”, en el cual el suelo es mezclado “in situ” con una mezcla estabilizante, por medio de un chorro producido en una tobera a presiones muy altas (> 20 Mpa), en un proceso alternativo el suelo es removido en gran parte por medio de un chorro mixto de agua-aire y sustituido por lechada.

Las inyecciones de impregnación pueden realizarse con una gran variedad de mezclas (desde suspensiones de partículas muy finas, a soluciones coloidales y puras) pero tanto el riesgo técnico como el económico aumentan con la disminución de la permeabilidad del suelo.

Las inyecciones con desplazamiento o fracturación hidráulica deliberada, son procedimientos que deben utilizarse con cuidado y en casos determinados, sobretodo como medidas temporáneas o de reparaciones en recalces, correcciones de asientos diferenciales de estructuras o recompresión de suelos afectados por excavación de túneles.

La ventaja específica de las más recientes técnicas basadas en el “jet grouting” es la posibilidad de tratamiento de una gran variedad de suelos desde gravas hasta arcillas por medio de una simple inyección de cemento. Según esta técnica se obtiene una eficaz mejora del suelo sin depender de los problemas de permeabilidad que derivan criterios de pura impregnación, ni de las controversias que surgen respecto a la permanencia o la toxicidad de las mezclas químicas.

Además, la técnica de “jet grouting” supera las limitaciones de otros métodos de inyección, como fracturación o desplazamiento (claquage). Para concluir, las técnicas de “jet grouting” suministran una valiosa alternativa a las técnicas clásicas de inyección, y hasta a las técnicas de congelación o de lo llamado pantalla continua.

PROCEDIMIENTO DE “JET GROUTING”

La técnica RODINJET comprende la fracturación y contemporánea mezcla del suelo “in situ” con una lechada de cemento: como alternativa, el suelo puede ser removido en gran parte por chorros de agua-aire, y reemplazado por lechada de cemento. Por lo tanto, el tratamiento puede realizarse mediante el uso de un solo fluido (la lechada) como medio de fracturación y estabilización (Rodinjet 1) o tres fluidos: aire y agua como medios de fracturación y evacuación, y la lechada como agente estabilizante (Rodinjet 3).

La secuencia de operaciones relacionadas a este método consiste generalmente en las siguientes fases:

- a) Perforación hasta la profundidad requerida por medio de un varillaje equipado de en su extremo de un sistema de perforación y “jetting” (monitor)
- b) Inyección o jetting, a través de toberas calibradas situadas a lo largo del eje del monitor, mientras se hace rotar y se extrae la maniobra.

El tamaño y las propiedades mecánicas del suelo tratado (columnas), dependen del efecto combinado del tipo de suelo y la composición de la mezcla, el caudal y la presión del chorro, en relación con el número y tamaño de las toberas, y las velocidades de ascensión y rotación del monitor.

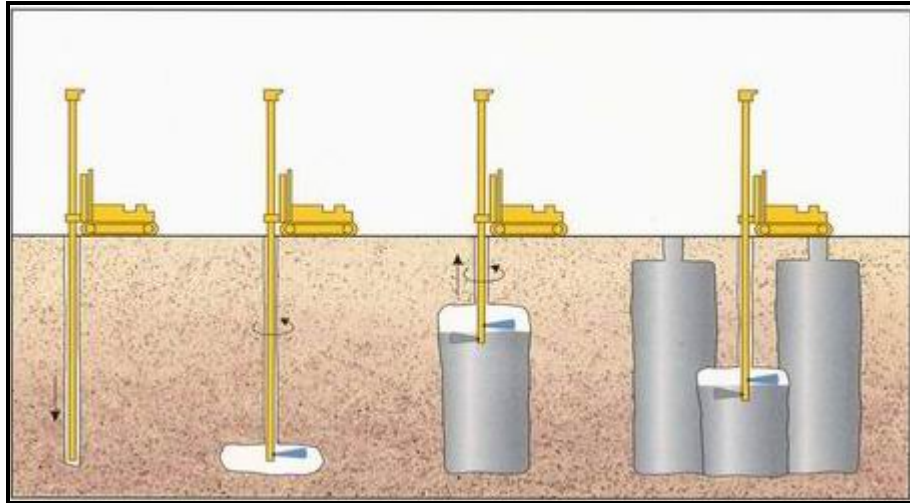


Figura N° 4

IMPERMEABILIZACION MEDIANTE MEMBRANAS ASFALTICAS

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

La Membrana asfáltica consistente en una armadura de poliéster recubierta por ambas caras con asfalto modificado con elastómeros del tipo SBS. Al mismo tiempo, sus caras se encuentran recubiertas de una lámina de polietileno con el fin de evitar contaminación por adherencia de polvo o partículas residuales y facilitar su manejo.

Se utiliza normalmente para la impermeabilización de superficies horizontales y verticales que reciben la acumulación de agua (piletas, estanques, piscinas), aguas lluvias y aguas de riego.

En el ámbito de la impermeabilización, desde hace más de una década se inició la fabricación y aplicación en el país de las membranas asfálticas, que constituyen una poderosa y definitiva solución en la mayoría de las necesidades de

impermeabilización. Dichas membranas asfálticas han evolucionado en el tiempo, lo que se ha traducido en el empleo de diferentes tipos de mezclas asfálticas, en el uso de mejores elementos de refuerzos de poliéster y en el cumplimiento de normas y especificaciones cada vez más exigentes. Los asfaltos bases empleados, han sido mejorados y diversificados a través de su importación, gracias al moderno terminal marítimo Cono Sur, ubicado en la localidad de Ventanas, Quinta Región.

En la actualidad se emplean dos tipos de asfalto modificados con polímeros del tipo S.B.S. y A.P.P., o dicho de otra forma, dos tipos de mastics con propiedades diferentes, siendo ambos de muy buen comportamiento.

Esta membrana complementa las mejores propiedades de cada uno de los mastic modificados con polímeros, aportando al mercado un producto con mejor comportamiento frente a los requerimientos de especificadores, constructores e instaladores.

Este nuevo tipo de membrana asfáltica está constituida por un refuerzo de poliéster en el centro, por un mastic asfáltico modificado con polímeros del tipo S.B.S. en la cara inferior de la membrana y por un mastic modificado con polímeros del tipo A.P.P. en su cara superior. Ambas caras, a su vez, están protegidas con un polietileno micro perforado de alta densidad. Un aporte muy interesante, ha sido cambiar el polietileno de la cara superior por un poliéster con un alto gramaje, lo cual junto con las modificaciones realizadas a la masa asfáltica, ha permitido obtener una membrana asfáltica con elevadas resistencias frente a punzonamientos y a elevadas temperaturas, haciéndola muy adecuada para proyectos con altos estándares, donde es necesario que el producto resista las solicitudes básicas de la construcción de la obra y permita recibir una carpeta asfáltica en caliente sobre ella.

Para comprender a cabalidad el aporte de la membrana asfáltica es necesario conocer las limitaciones de una membrana elaborada con mastic modificado con polímeros del tipo. Su óptima adherencia y resistencia a altas temperaturas han impulsado el uso de estas nuevas membranas en grandes obras de ingeniería.

S.B.S. o A.P.P. Esta dice relación, en el primer caso, con su baja resistencia a altas temperaturas, lo cual no la hace apta para que sobre ella se pavimente directamente con una carpeta asfáltica en caliente, ni para el tránsito peatonal durante su instalación en épocas en que la temperatura ambiente es alta. A modo de ejemplo, durante el verano en zonas expuestas al sol, la temperatura superficial puede llegar con facilidad a 60 °C, lo que limita el desplazamiento de personas por sobre la membrana y la hace más susceptible a cualquier daño ocasionado durante la construcción de la obra. En el caso de una membrana elaborada con un mastic modificado con polímeros del tipo A.P.P, esta presenta una menor elasticidad, especialmente a bajas temperaturas, baja adhesividad a substratos como hormigón y morteros, y genera mayor dificultad para ser manipulada, especialmente en la impermeabilización de detalles o singularidades.

Análisis de sus Propiedades

Las principales propiedades que hacen de la membrana asfáltica un producto innovador y apto para ser sometido a elevadas sollicitaciones son:

Elongación: La elongación de esta membrana se relaciona con las propiedades del mastic asfáltico, modificado con polímeros del tipo S.B.S., pues acepta más deformación que una membrana elaborada solamente con asfalto modificado con polímeros del tipo A.P.P.

La utilización de un mastic modificado con S.B.S en la cara inferior de la membrana asfáltica, le otorga una mejor capacidad de adaptarse a las deformaciones de la superficie y le permite resistir y disipar elevadas tracciones y elongaciones, que un mastic modificado con polímeros del tipo A.P.P no puede resistir.

Resistencias Mecánicas: En lo que respecta a sus propiedades mecánicas es importante destacar tipo y gramaje del poliéster a utilizar. La utilización de poliéster con gramajes cercanos a los 200 gr/m² ha permitido obtener resistencias a la tracción superiores a los 1200 N/5cm y resistencia al punzonamiento estático sobre los 55 kg.

La resistencia al punzonamiento se ve incrementada por la utilización de un mastic asfáltico más duro, como es el caso del asfalto modificado con polímeros del tipo A.P.P., utilizado en la capa superior de la membrana, el cual protege y aísla térmicamente la capa inferior constituida por el mastic modificado con polímeros del tipo S.B.S.

Resistencia a Altas Temperaturas: Lo fundamental en este aspecto es el Punto de Ablandamiento del mastic asfáltico, lo cual en el caso del mastic asfáltico modificado con polímeros del tipo A.P.P es cercano a los 150 °C. Es por esta razón que la cara superior de la membrana está constituida por este tipo de mastic, con el fin de proporcionarle mayor resistencia a altas temperaturas, hacerla más apta para recibir carpetas asfálticas y servir como elemento protector de la cara inferior elaborada con mastic asfáltico modificado con polímeros del tipo S.B.S., cuyo punto de ablandamiento es cercano a los 105 °C.

Adhesividad: Uno de los objetivos que los diseñadores persiguen hoy, es adherir completamente la membrana a la base, con el propósito que ante una eventual perforación y consecuente paso de agua, ésta no se desplace por el espacio entre la membrana y la base, ocasionando graves problemas para detectar la falla y, posteriormente, para reparar. Una de las limitaciones que tiene una membrana constituida solamente con mastic modificado con polímeros del tipo APP, es su menor elongación y menor adherencia. Es por esta razón, que la cara inferior de la membrana asfáltica está constituida por un mastic modificado con polímeros del tipo S.B.S, el cual le proporciona las propiedades necesarias para obtener la adherencia requerida. Este concepto se refuerza, si se utiliza un asfalto elastomérico como adhesivo entre la membrana y la base imprimada y no un asfalto oxidado como se emplea frecuentemente.

La posibilidad de manufacturar membranas impermeabilizantes, utilizando asfaltos seleccionados, aditivos que modifiquen y mejoren las propiedades de los asfaltos base y poliéster de la más alta tecnología del mundo, permite a la industria nacional competir en mejores condiciones en una economía globalizada.

A nivel nacional existen fabricantes que continuamente se han mantenido innovando y desarrollando estas nuevas tecnologías por lo que actualmente existen productos fabricados bajo rigurosos controles de calidad y diseñados para cumplir con los altos estándares exigidos por el mercado nacional e internacional.

La utilización e incorporación de estos productos queda en manos de diseñadores y especificadores, quienes deben tomar este desafío y proyectarse hacia un futuro. Es así como algunos de ellos han incorporado la membrana en grandes obras de ingeniería que actualmente están en ejecución.

APLICACIONES

ACTIVIDAD DESCRIPCIÓN ACTIVIDAD

- Impermeabilización de superficies sobre radier
- Impermeabilización de superficie de estructuras verticales y horizontales.
- Impermeabilización de superficies de cubierta de techumbre
- Colocación de sellos y membranas en la colocación de forros y protecciones
- contra aguas lluvias.
- Impermeabilización en la colocación de revestimientos exteriores.
- Impermeabilización previa colocación de pavimentos
- Impermeabilización de estructuras en construcción de caminos.
- Impermeabilización de superficies en construcción de túneles

HORMIGÓN PROYECTADO

La incorporación de fibras estructurales al hormigón proyectado, reemplazando a la malla electrosoldada, es una realidad y su uso se expande en grandes obras de nuestro país como el metro de Santiago y túneles en las hidroeléctricas de Ralco y Alfalfal.

En algunas de estas obras se ha llegado a incrementar el rendimiento de avance hasta un 40%, debido al ahorro de tener que instalar la malla de refuerzo, que además implica un alto riesgo. Las fibras se distribuyen uniformemente en todo el espesor del hormigón proyectado, impartiendo un mejor comportamiento triaxial frente a las tensiones de corte y flexión debido a la disminución drástica de las fisuras por contracción. No hay que dejar de mencionar que el efecto de sombra que

se produce detrás de la malla electrosoldada puede dejar vacíos que inducen corrosión en la misma y posterior fisuración del hormigón.

El comportamiento del hormigón proyectado frente a la absorción de esfuerzos mejora notablemente gracias a la ductilidad que le otorgan las fibras en dosis adecuadas, llegando a aumentar el valor de energía de rotura del hormigón hasta en 5 veces. Se le denomina igualmente “tenacidad” y se expresa en Joules. La absorción de energía de rotura de las fibras es mayor que la de las mallas electrosoldadas (Estudio realizado en Noruega por la Asociación de Investigación Técnica de Noruega - NTNF).

Ventajas

- Mayor resistencia a la abrasión y al impacto.
- Mayor estanqueidad y resistencia a la congelación.
- Mayor capacidad de adherencia.
- Reducción en el espesor promedio de shotcrete debido a que el mismo copia el perfil de la roca. Las fibras producen además ahorros de tiempo y dinero.
- Ahorro en costos directos ya que el costo de la fibra equivale a un 50% del costo directo de la malla (contando mano de obra).
- Ahorro en el costo indirecto por evitar la colocación del shotcrete en dos capas.
- Ahorro en el hormigón utilizado ya que las fibras permiten aplicar el espesor requerido en toda la superficie, independiente de las irregularidades del sustrato.
- Ahorro debido a la disminución del rebote provocado por la malla de refuerzo.

Recomendaciones

- El hormigón proyectado y reforzado con fibras requiere el uso de microsílíce y aditivos para poder contrarrestar los efectos negativos que tienen las fibras sobre el bombeo y la proyección. Por otro lado su uso mejora la adherencia entre la fibra y la matriz de hormigón.
- El largo de la fibra no deberá exceder el 50% del diámetro interno de la manguera de proyección deberá como mínimo tener el triple del tamaño máximo de árido (por razones de anclaje).
- El contenido de fibra por metro cúbico de hormigón y el espesor del mismo deberá ser determinado en base a los ensayos de carga sobre panel. El contenido teórico de fibra metálica varía entre 35 y 50 kg/m³ y el de fibra de polipropileno rígida es de 5 a 10 kg/ m³.
- Para hormigones ubicados a la intemperie o sometidos a ataque de aguas sulfatadas (p.ej. minería subterránea) se recomienda fibras de material sintético (Masterfiber 50PS o similar).
- La fibra sintética muestra una caída más brusca después de la primera fisura, pero con un posterior aumento de resistencia a la deformación, lo que la hace estructuralmente interesante, especialmente en labores mineras donde se esperan grandes deformaciones.

La cantidad adecuada de fibra a utilizar deberá ser determinada con ensayos en obra.

Métodos de Ensayo

El método normalizado se denomina "Round Determinate Panel Test", adaptado a la minería subterránea (paneles de 800 mm de diámetro y 75 mm de espesor), y normalizado por la ASTM. El procedimiento consiste en una aplicación

sobre panel de hormigón apoyado en tres puntos de una carga puntual centrada y la medición de la deformación en cada escalón de carga. El criterio a utilizar para la comparación de resultados se puede basar en la realización de series de paneles con diferentes mezclas con diferentes contenidos de fibras, una serie de paneles patrón sin fibra ni malla y una serie de paneles con malla de refuerzo.

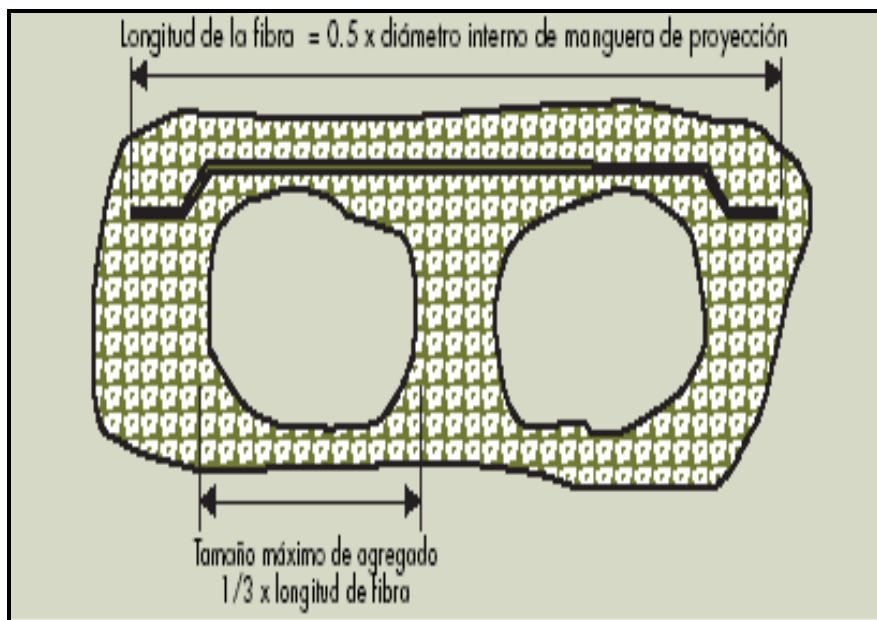


Figura N° 5

IMPERMEABILIZANTES DE PVC

El uso de materiales termoplástico como el PVC-P, en el campo de la Ingeniería Civil es cada vez más extenso ya sea en el empleo de láminas impermeabilizantes en la Edificación, como el de geomembranas en la Obra Civil.

El sistema de impermeabilización NOVANOL con láminas PVC-P ha sido especialmente diseñado en Edificación para la impermeabilización de cubiertas, terrazas, azoteas y cimentaciones. En el ámbito de la Obra Civil está indicado para la impermeabilización de canales, depósitos de agua potable, balsas e incluso túneles.

Para este caso veremos las características particulares del producto llamado NOVANOL, es un material laminado a base de policloruro de vinilo fabricado exclusivamente a partir de resinas vírgenes que garantizan características constantes, una óptima durabilidad y permiten obtener un revestimiento impermeable de absoluta garantía.

La amplia gama NOVANOL permite la elección de la lámina más indicada y adecuada para las diferentes aplicaciones que se pueden dar tanto en la Edificación como en la Obra Civil.

- Resistentes al hinchado, putrescibilidad y envejecimiento.
- Elevado nivel de estanqueidad incluso bajo deformación permanente.
- Elevada capacidad de adaptación a las irregularidades del soporte gracias a su alta deformabilidad.
- Elevada resistencia al punzonamiento.
- Resistente a las raíces según DIN 4062 parte 1.
- Excelente estabilidad dimensional.
- Resistente a la intemperie.

Impermeabilización de túneles

Las geomembranas NOVANOL Túneles ofrecen una elevada resistencia al punzonamiento, gran durabilidad y estabilidad incluso bajo deformación permanente, por lo que son ideales para la impermeabilización de túneles en obras subterráneas. Poseen la propiedad de no combustionar con llama ante la presencia de fuego, por lo que son autoextinguibles; además, al revestirse la lámina con un aro de hormigón, queda un sistema de impermeabilización totalmente ignífugo, no desprendiéndose gases tóxicos en caso de incendio.

Esta gama de geomembranas de PVC-P la componen tres variedades, **NOVANOL SA TUNELES OPACA color verde, NOVANOL SA TUNELES TRANSPARENTE y NOVANOL SA TUNELES AMARILLA/NEGRA.**

Las tonalidades en que se presentan estas geomembranas son una medida de control visual para la detección de posibles daños causados mecánicamente durante su aplicación.

Colocaremos un geotextil no tejido POLITEX SPPCT-500 (500 gr/m²) sobre el soporte, como elemento de protección de la impermeabilización tanto en su fase de instalación, como posteriormente durante su puesta en servicio. Además tendrá la función de drenar el agua de filtración, sin que se produzca presión hidrostática sobre la geomembrana de PVC-P. El geotextil evita la perforación de la geomembrana de las aristas o cantos vivos, a la vez que forma una capa compensadora entre los movimientos del macizo rocoso y el hormigón evitando la rotura de la lámina de impermeabilización.

Los enormes esfuerzos mecánicos que se ocasionan al realizar un túnel ocasionarían la rotura de la impermeabilización principal, sin la colocación de un geotextil no tejido.

La colocación del geotextil sobre el soporte de hormigón, se efectuará sujetándolo por medio de arandelas de PVC, fijadas con la clavadora de pólvora P-45.

La geomembrana de PVC quedará fijada por todo el perímetro del túnel, al soldarse mediante aire caliente a las arandelas de PVC.

Las láminas NOVANOL cumplen con los requisitos especificados en las siguientes Normativas:

- **DIN 16938**
- **BMFWA**
- **SIA 280**



Fotografía N° 1

Protección de impermeabilización

Son láminas de PVC-P homogéneas (sin armar) especialmente diseñadas para la protección de una impermeabilización principal y/o como barrera de vapor.

Se presenta en tres formatos de espesores de 0.5 – 0.8 – 1 mm.

Colocación

La unión de las láminas NOVANOL en la impermeabilización de cubiertas, se realizará por soldadura térmica mediante un soldador de aire caliente o por soldadura química con el PG-30, asegurando y comprobando que quede perfectamente unida mediante una varilla metálica. El solape entre láminas será de unos 5 a 7 cm. La adherencia de la lámina al soporte puede realizarse mediante fijaciones mecánicas, perfiles colaminados o mediante adhesivos especiales.

En balsas y túneles los solapes entre láminas se tratarán por termofusión mediante un soldador de aire o cuña caliente de doble soldadura con cámara central de comprobación, que permita controlar la ejecución de un solape hermético.

La soldabilidad y calidad de la soldadura están influenciadas por las condiciones atmosféricas (temperatura, humedad), condiciones de soldadura (temperatura, velocidad, presión) y por el estado superficial de la lámina (limpieza, humedad).

Tanto en obras de edificación como en obra civil, el buen funcionamiento de la impermeabilización con láminas de PVC-P sobre soportes rugosos, con irregularidades, en cubiertas lastradas, balsas, túneles, etc..., pasa por la colocación de un geotextil no tejido, antipunzonante POLITEX-POLINAR PPW como elemento de protección.

Presentación y almacenamiento

El material se suministra en rollos con mandril de cartón. Es aconsejable almacenar los rollos en lugar seco y protegido del calor. Deberán estar en posición horizontal, paralelos entre sí (nunca cruzados) y dentro del embalaje de origen.

CAPITULO III: IMPERMEABILIZACION TÚNEL LAS RAÍCES

DESCRIPCIÓN DE LA OBRA

El Túnel las Raíces está ubicado en la Novena región de nuestro país, en la Provincia de Malleco, comuna de Curacautín; a aproximadamente 35Km de la ciudad que da nombre a la comuna. El túnel pertenece a la Ruta 181 que comienza en la ciudad de Victoria y que forma parte del Paso Internacional Pino Hachado.

Esta construcción se ejecutó durante los años 1929 al 1939, originalmente fue diseñado para el paso del ferrocarril entre Temuco y Lonquimay, se comenzó con el tráfico vehicular en el **año 1980**, éste túnel tiene una longitud de 4.528m, siendo así, el más largo de América del Sur, posee una altura promedio de 4m y un ancho de su bóveda, también promedio, de 2.80m. El túnel se desarrolla bajo la el macizo cordillerano conocido como “Cordillera de las Raíces”, esta orientado de Norte a Sur, conociéndose como boca Norte a la entrada proveniente de la ciudad de Curacautín.

Debido a que éste túnel se ubica en la cordillera y está expuesto constantemente a muy bajas temperaturas, en su interior se solían formar “estalactitas” con el congelamiento del agua que se filtraba en la bóveda. Las filtraciones si bien no eran en la totalidad del túnel, éstas se estimaba, que estaban presentes en aproximadamente un 67% de la longitud total de la estructura, presentando así, molestia a los usuarios comunes, sin embargo se consideraba toso un atractivo turístico par el usuario ocasional, lo que en su tiempo, al momento de analizar el proyecto también se tomo en cuenta por una posible disminución de flujo turístico a la zona, sin embargo, primó el hecho de que éste viaducto formaría parte del “Corredor Bioceánico”, impulsado por los gobiernos de Chile y Argentina; dado

que, en muchas ocasiones éste túnel debió ser cerrado al paso de vehículos, por el exceso de filtraciones o como se mencionó anteriormente, por el congelamiento de dichas filtraciones.

El Proyecto de Impermeabilización fue adjudicado a la empresa Ferrovial Agroman S.A., el plazo de ejecución de la obra es de 540 días, la fecha de inicio fue el 06 de Febrero del 2004; la inversión esta contemplada en \$ 2.923.144.578.



Fotografía Nº 2



Fotografía Nº 3

TRABAJOS PREVIOS; INSPECCIÓN TÉCNICA

Para efectuar una impermeabilización adecuada se solicitó una Inspección Técnica, dicha opinión fue solicitada por la Empresa Zañartu Consultores de Ingeniería y se refiere a entregar una opinión acerca de las condiciones que presenta la obra del Túnel las Raíces.

Como parte inicial de los trabajos de impermeabilización, se efectuaron sondajes para proceder a inyectar el área, todo esto referente a las Especificaciones Técnicas expuestas anteriormente, las que consultaban 7 sondajes en el desarrollo de la bóveda.

Proyecto de Reparación Considerado en Relación a las Filtraciones:

El proyecto de reparación o manejo de las filtraciones considera la inyección de las zonas de infiltración. Para efectuar estas inyecciones se han programado aureolas de 5 sondajes cada 2.5 metros de distancia entre aureolas. Dentro de cada aureola hay un sondaje en el centro de la clave y dos hacia cada lado separados a 2 y 4 m del sondaje de la clave. Estos sondajes están programados a 10m de longitud.

Al momento de la visita se han efectuado 8 sondajes para inyecciones, los que son analizados más adelante. La ejecución de estos sondajes mostró situaciones de orden geotécnico que motivaron la visita inspectiva al túnel.

Las inyecciones se programaron para ser ejecutadas a 8 bars de presión (80 kg/cm²) y en dos etapas dentro de cada sondeo. El proyecto considera la inyección promedio de 60 kg de cemento por metro lineal de perforación. Aparentemente no se

hicieron investigaciones de ningún tipo durante los estudios de ingeniería que determinaron las soluciones que se tratan de implementar.

Condiciones Expuestas En Los Sondajes Ejecutados.

Tal como se ha indicado hasta el momento de la visita, se habían efectuado 8 sondajes los cuales correspondían a los que se indican. Todos estos sondajes son de 10 m de longitud a partir de la bóveda de hormigón.

Según las Especificaciones Técnicas Especiales las inyecciones se deberían hacer en dos etapas partiendo con una etapa inicial en una cámara de 5 m desde el fondo del sondaje hacia fuera. Como comentario a esto se debe indicar que el proyectista asumió que el hormigón estaba pegado a la roca y que ésta era de buena calidad geotécnica.

Las Especificaciones Técnicas Especiales, indican que se deben ejecutar pruebas de Lugeon Mejorado. Estas pruebas no se habían ejecutado en ninguno de los sondajes efectuados.

Se indica que en todos los sondajes, la roca que se observa corresponde a roca volcánica del tipo Andesita y Andesitas Basálticas con intercalaciones de Tobas y Brechas. Las rocas tipo Tobas corresponden a rocas muy débiles, con fracturamiento en trozos pequeños y en sectores están muy descompuestas a arcillas.

1. Sondaje Km 95.055

Se encuentra en el centro de la clave. Se cortó un espesor de 40 cm de hormigón en la bóveda. No se detectó armadura dentro del hormigón. Presencia de un hueco vacío entre los 40 cm y los 90 cm de profundidad.

La roca se inicia a los 90cm y corresponde a la roca fracturada del tipo volcánico y volcánico sedimentaria (brechas y tobas). El fracturamiento es intenso. El RQD del tramo entre los 0.9 y 10 m es del 19 %, lo que indica que la roca es de muy baja competencia geotécnica (entre 0 y 25 % de RQD el macizo se clasifica como de muy mala calidad geotécnica).

2. Sondaje Km 95.065

Localizado a 4 m bajo el sondaje central hacia el lado derecho. La bóveda de hormigón tiene un espesor de 55cm, no presenta armadura y está de tope contra la roca.

La roca corresponde a una Andesita dura, fresca, con muy buena recuperación. El RQD del tramo es de 28 % lo que indica una roca de mala calidad geotécnica.

3. Sondaje Km 95.075

Localizado a 4m bajo el sondaje central del lado izquierdo. Se presenta 1 m de espesor de hormigón sin armadura de tope sobre la roca. Alternancia de rocas volcánicas porfíricas y sedimentarias volcánicas del tipo tobas y brechas. Desde 1m y hasta 6.3m la roca se presenta dura, luego hasta los 10m la roca esta completamente descompuesta convertida en arena. Hasta los 6.3mde profundidad, el RQD es del 9% y luego de 0%. Lo indicado nos señala que la roca debe ser catalogada como de muy malas características geotécnicas.

4. Sondaje Km 95.165

Localizado a 4m bajo el sondaje central al lado derecho. Se presenta un hormigón de bóveda de 80 cm el cual no tiene armadura, luego se llega a la roca. La roca se presenta muy fracturada llegando en sectores a presentarse molida (6.1-6.5m). El RQD del sector excavado es menor al 10 %.

5. Sondaje Km 95.175

Localizado a 4m bajo el sondaje central del lado izquierdo. Se inicia mostrando una bóveda de hormigón sin armadura de 80cm de espesor, luego existen 12 cm de madera humedecida y vacío hasta los 1.15m de profundidad. La recuperación total en roca es del 85%. Hasta los 5.3m hay Andesita dura, de buena calidad geotécnica, luego sigue una Andesita de otro color pero de igual calidad geotécnica. El fragmentamiento del macizo rocoso es alto y su RQD es solamente de 14%.

6. Sondaje Km 95.230

Se encuentra en el centro de la clave. Se inicia con 43cm de hormigón lleno de oquedades debido al lavado con agua de infiltración, baja resistencia. Entre 1.0 y 1.22m solamente se recupera un trozo de madera de 22cm de espesor, luego hay hueco hasta los 2.05m. Hasta los 4.7m se presenta con intenso fracturamiento (RQD 0%). Desde 4.7 a 10m la roca se presenta dura con RQD de 29%.

7. Sondaje Km 95.240

Localizado a 4m bajo el sondaje central al lado derecho. El hormigón de la bóveda, al inicio de la perforación, es de 50cm de espesor y se presenta de tope con la roca y sin armadura. La roca se presenta en trozos con tamaños de 1" a 2" a excepción del tramo entre los 6.15 y 8.40m, en donde se presenta molida y arcillizada. El RQD total del tramo es cercano a 0%:

8. Sondaje Km 95.230

Se encuentra en el centro de la clave. El hormigón de la clave alcanza a 60cm de espesor. El sector se presenta con roca fresca pero intensamente fracturada, con RQD cercano al 0%. Entre los 8.4 y 8.95m la roca se presenta arcillizada. Se hace notar que según información del sondeador, se producía by-pass de agua durante la perforación y el agua usada para perforar aparecía hasta unos 3m alejada del sondaje y en forma casi inmediata indicando que el macizo es de alta permeabilidad.

Para un mayor ahondamiento de dicha experiencia ver **ANEXO 1**

Otras Observaciones

Durante la visita efectuada se realizaron diversas observaciones que se relacionan con las condiciones del Túnel las Raíces. Estas observaciones y los comentarios correspondientes se presentan a continuación.

Los sondajes se presentaban limpios de un día para otro. De acuerdo al sistema de sondajes, que sólo permite perforar durante la noche, se debía perforar un mismo sondaje en dos jornadas. Los resultados de esto indican que no se producía obstrucción del sondaje de un día para otro lo cual significa que la roca tiene una capacidad de autoaporte.

La roca que se presenta en todos los sondajes tiene, según el índice RQD, una clasificación geotécnica de mala a muy mala. En general estas rocas se presentan con sectores muy fracturados y en parte arcillizadas.

No se aprecia que se hayan producido reparaciones mayores dentro de los hormigones de la bóveda debido a roturas de esta. Esta situación indicaría que no se han producido caídas mayores tras la bóveda. Esto se ve avalado también por el hecho que los sondajes han reconocido huecos entre la bóveda y la roca y no han detectado la presencia de material suelto que se hubiese derrumbado.

La bóveda de hormigón no tiene refuerzo de fierro lo que significa que corresponde solamente a un sistema aerodinámico para el manejo de los humos generados por las locomotoras de la época de uso del túnel y no a un aspecto estructural de refuerzo, recordemos que el túnel fue diseñado en un comienzo para el uso ferroviario. Esta situación se aprecia en todos los túneles ferroviarios antiguos dentro de los que se pueden citar aquellos túneles de la ruta interior al norte que se inicia en Petorca y llega a Illapel. En este sector existen 4 túneles con una forma ojival, basada en ladrillos, que se encuentran en una disposición autosoportante que no tiene ningún uso en el aspecto estructural.

No hay antecedentes de la geología del sector ni datos de la época de construcción. Debido a lo expuesto no se puede establecer la calidad geotécnica de la roca que se encuentra tras la bóveda de hormigón más allá de los sectores donde se han efectuado prospecciones de sondaje.

La presencia de madera tras la bóveda de hormigón, y el hecho que un sondaje lateral muestre que el hormigón no está en contacto directo con la roca, indican que eventualmente se habrían puesto durante la etapa de construcción, marcos de madera los que actuaron como eventuales moldajes interiores. En la clave todos los sondajes se presentan con oquedades entre hormigón y roca.

Conclusiones Y Recomendaciones

De acuerdo a lo que se observó y analizó, se pueden considerar las siguientes conclusiones:

- La calidad geotécnica de la roca es mala a muy mala, presentándose con un fuerte fracturamiento y alta permeabilidad, así como con zonas arcillosas que corresponderían a fallas geológicas.
- La bóveda de hormigón no corresponde a una bóveda armada y solamente correspondería a un diseño aerodinámico para el manejo de los gases o humos que generaban las locomotoras de la época.
- La bóveda de hormigón se encuentra separada de la roca en algunos sectores y en general se presenta en una condición de deterioro aleatoria. Los sondeos han demostrado que en sectores el hormigón de la bóveda se presenta con oquedades por lavado de finos. Las observaciones exteriores muestran que los hormigones de la bóveda se presentan muy anidados.
- No se conoce la resistencia de los hormigones de la bóveda, pero se establece de acuerdo a lo observado, que es aleatoria y en general no debe ser alta.
- No hay evidencia de reparaciones de la bóveda de hormigón, lo que indica que esta ha soportado situaciones tales como el sismo de los años 60 y aquellos generados por las erupciones de los volcanes cercanos al área. Todo esto indicaría que la situación del macizo se ha establecido y aunque debe considerarse precaria, no estaría sometida a cargas mayores.
- No se puede establecer que lo que resta de vida útil de la bóveda de hormigón y no existe manera de establecer se esta fallaría frente a solicitaciones que no se han producido hasta ahora. Solamente se puede deducir que el estado estructural de la bóveda no está condicionado para soportar solicitaciones de cargas mayores.

- Los sondajes efectuados para proceder a inyectar el macizo en las zonas con fuertes infiltraciones han servido perfectamente para conocer la condición de la roca y de la bóveda de hormigón en aquellos sectores donde se efectuaron. Sin ejecución no se habrían detectado las situaciones a las que se enfrentó el proyecto de reparación del túnel. La mayor cantidad de sondajes que se pueda disponer, servirá para tener un mejor conocimiento de la situación estructural de la obra y eventualmente preparar soluciones alternativas de estabilización e impermeabilización.
- Como conclusión general se indicó que la opción de inyección, considerada en el proyecto de reparación, no es aplicable y que su implementación no aseguraría que se pueden aminorar las filtraciones. Las inyecciones pueden producir desestabilizaciones del macizo, lo cual generaría caídas de sectores rocosos y eventualmente la rotura de la bóveda de hormigón. La roca ha mostrado que su condición geotécnica es pobre y su permeabilidad es muy alta, lo cual impediría la ejecución adecuada de las inyecciones sin entrar a un riesgo de desmoronamiento del macizo y su consiguiente fallo de la bóveda. A lo indicado debe agregarse el hecho que para poder inyectar en el tramo inicial la roca se debería proceder inicialmente a sellar el espacio entre roca y bóveda, lo cual no aparece técnicamente factible debido principalmente a la calidad del hormigón de la bóveda y adicionalmente al desconocimiento de la calidad del material a ocupar y la localización de las oquedades.
- Se recomienda proceder a manejar las filtraciones mediante el sistema de láminas impermeables tipo Carfoam, dado que este sistema asegura la solución del problema de filtraciones y no pone en riesgo la estabilidad de la bóveda. La solución de láminas impermeabilizantes ha sido considerada en el proyecto como una solución alternativa al problema de filtraciones. Sin embargo las láminas consideradas en el diseño aparentemente están fuera de producción y han sido reemplazadas por elementos más modernos.

ESPECIFICACIONES TECNICAS

En un comienzo el proyecto de impermeabilización del Túnel las Raíces sería desarrollado mediante el procedimiento de "Jet Grouting", esto establecían las Especificaciones Técnicas elaboradas para el proyecto, pero debido a los trabajos previos antes descritos y los resultados que arrojaron los sondajes que se realizaron a la bóveda del túnel, se concluyó que esto no era posible debido a los vacíos que presentaba la bóveda en algunos tramos; como sabemos el Jet Grouting consiste en inyectar hormigón especial a la roca mediante una perforación en la misma y así "anular" la filtración que se producía en ese lugar, pero al presentar los vacíos, este hormigón caería y se necesitaría volúmenes impensados para conseguir los resultados esperados.

Según las Especificaciones Técnicas de la obra se procede a ejecutar las Perforaciones.

El objetivo de estas perforaciones, es proceder a la detención o aminoramiento de los caudales de infiltración de agua subterránea que fluyen hacia el interior del Túnel Las Raíces, las cuales se inyectarán posteriormente con Grout. La ubicación y longitud será lo indicado en los cuadros y demás documentos del proyecto lo que será ratificado por la Inspección Fiscal directamente en terreno.

Procedimiento de Trabajo

A las perforaciones se les dará un número, identificando su ubicación y dirección. El diámetro de las perforaciones deberá ser el adecuado para permitir la colocación satisfactoria de un obturador y no será en ningún caso inferior a 50 mm.

El contratista deberá desarrollar perforaciones ha roto percusión para controlar filtraciones de agua. Las perforaciones identificarán problemas potenciales más allá del frente de trabajo y serán la base para las decisiones que deban tomarse a modo de asegurar el buen resultado de las inyecciones.

La perforación se ejecutará en diámetro de 2" con una longitud de 10 m, medida desde el exterior del revestimiento de hormigón o superficie a la vista. El sondeador llenará simultáneamente con el avance una planilla donde anotará la velocidad de avance y los materiales y espesores detectados que le sea posible diferenciar (hormigón, suelo, roca blanda, roca dura, etc.) los huecos o vacíos, comportamiento del agua y cualquier otra observación significativa.

Se perforarán 5 sondajes radiales (formando una aureola), ubicados uno en el ápice del túnel y 2 hacia cada lado separados entre si a lo menos 2 m. Estos se ejecutarán perpendiculares a la superficie. El ITO puede proceder a modificar la posición, cantidad y longitud de los sondajes de acuerdo a la distribución de los fluidos infiltrados o el tipo de inyección a ejecutar.

En tramos de menor longitud se harán dos aureolas en los extremos.

La ubicación de las perforaciones y la presión de inyección podrán ser establecidas, en cada caso en particular, por el ITO.

El detalle de las perforaciones y lo encontrado en ellas se detallan en un estudio realizado.

Inyecciones

Las inyecciones (grouts) que se utilizarán serán morteros o lechadas en base de cemento, se definen tipos A, B, y C. El grout a ser usado, dosificación y presión, se deberá definir caso a caso, dado que el éxito de una operación de inyección depende de la habilidad y experiencia de la cuadrilla y otros factores.

Grouts

En general, todo el material para grouts deben ser aprobados por el ITO.

Todo grouts de cemento, será una mezcla de agua, cemento y aditivos (lechadas), o agua, cemento, arena y aditivos (morteros); con dosificaciones variables y ajustadas a las condiciones de terreno, según se requiera.

Los grouts de cemento serán de tres diferentes tipos y las dosificaciones se harán según las instrucciones del fabricante. Los morteros podrán venir dosificados en seco desde fábrica. Los cementos serán resistentes a los sulfatos lo que deberá ser certificado por el fabricante.

TIPO A

Es un mortero de grano grueso de fraguado rápido que sirve para detener flujos altos de agua concentrados o para sellar fracturas anchas. El equipo de grouteo, debe ser compatible con el tamaño del grano, de 0 a 5 mm. El tiempo de fraguado deberá ser aproximadamente 30 min, para una mezcla de agua y mortero en proporción en peso 1:1, a 15°C. El mortero contendrá puzolana o **microsilica** en suficiente cantidad para prevenir exudación y plastificadotes, para asegurar un buen bombeo de la mezcla. El mortero tendrá propiedades expansivas a fin de sellar fracturas y bloques quebrados. Será usado también en inyecciones de relleno y contacto.

TIPO B

Es un mortero de grado fino, con cemento de número BLAINE 4000 o superior, de fraguado rápido usado para sellar filtraciones distribuidas en zonas amplias. Debido a que el fraguado del grout es muy rápido no da lugar a exudación, por ésta razón la penetración en las fracturas, de todo tamaño, es mejor que la de los grouts de cementos corrientes. El tiempo de fraguado será del orden de 5 a 10 min, para la mezcla de agua y mortero en proporción 1:1 en peso, a 15°C. El mortero debe contener puzolana o microsilica en suficiente cantidad para prevenir exudación y plastificadores para asegurar un buen bombeo de la mezcla.

TIPO C

Es una lechada de cemento de grado normal y se usa para grouteo de aberturas menores. El contenido de agua en la mezcla estará en la razón agua/cemento comprendida entre 0,4 y 2 medidas en peso. Esta razón será definida por el contratista y presentada en cada colocación al ITO para su aprobación.

Procedimiento de Trabajo

A las perforaciones previamente identificadas se le inyectará el grout especificado.

El grout tipo A, de grano grueso y con limitadas propiedades expansivas, se usa para el control de filtraciones provenientes de fracturas anchas y abiertas. También se usará para rellenos.

Después que se ha logrado reducir la filtración, se emplean los grouts tipo B y C. Estos grouts se pueden usar, además, en zonas con fracturas finas con una

distribución amplia. La operación de grouteo se termina siempre inyectando grouts tipo B, que es de fraguado rápido.

El grouts más probable a utilizar será el tipo C. Cuando la presión comience a elevarse la operación se terminará utilizando grout tipo B. Si los consumos son elevados sin elevarse significativamente la presión de inyección, se disminuirá la razón A/C. Si la condición se mantiene se pasará a inyección tipo A. Posteriormente, si continua el alto consumo, se detendrá la inyección para permitir fraguado y se reperfilará y reinyectarán la misma perforación con lechada tipo C.

La ubicación de las perforaciones y la presión de inyección podrán ser establecidas, en cada caso en particular, por el ITO. En general se efectuarán dos operaciones de inyección en los sondajes de 10 m. La primera de alta presión ubicando el obturador o packer a 5m de profundidad y la segunda de presión limitada con el obturador en las cercanías de la boca del sondaje. Se mantendrá una observación cuidadosa del revestimiento del túnel por eventuales daños que pudiera ocasionar la inyección a presión, para detener la operación oportunamente. El contratista deberá tomar todas las precauciones necesarias para evitar accidentes o daños a la estructura del túnel, y reparará a su costo y responsabilidad cualquiera que eventualmente ocurriere.

El contratista empleará personal experto y con experiencia en las operaciones de inyección. Con este objeto deberá entregar al ITO, los antecedentes de dicho personal para su aprobación.

Para cumplir el requisito anterior, el contratista podrá proponer la participación de su subcontratista especializado, el cual también deberá contar con la aprobación del ITO.

Será obligación del contratista efectuar oportunamente y al inicio de las obras las pruebas pertinentes con los grouts que se propone utilizar en cada caso y someter su utilización a la aprobación previa del ITO. Sin perjuicio de esta obligación, el ITO podrá exigir del contratista la presentación de las certificaciones de calidad y cumplimiento de las especificaciones de cada uno de los productos de inyección propuesto a utilizar.

El equipo de grouteo de cemento, deberá tener una capacidad para inyectar grout a un ritmo mínimo de 3 m³/hora, a cualquier presión hasta 80 Kg/cm². Se estima una inyección de 60 Kg de cemento/m de perforación.

El equipo debe estar permanentemente en buenas condiciones de operación. Si cualquier perforación resultase dañada o inservible, debido a fallas mecánicas del equipo o por un suministro inadecuado de grouts, será reemplazada por cuenta del contratista.

El equipo para el control de la presión será tal que permita lecturas de presión será tal que permita lecturas de presión dentro de un rango de $\pm 0,5$ Kg/cm². Este equipo deberá estar disponible en el lugar de la faena, al iniciarse éstas.

Como parte de los trabajos de inyección se podrán hacer pruebas de agua simple donde lo indique la Inspección Fiscal, considerándose en forma preliminar, una por aureola.

Estas pruebas se efectuarán en cámaras de 5m en el fondo del sondaje. Para su realización se procederá a instalar un packer u obturador a los 5m de la perforación y se introducirá agua a presión hasta llegar a los 10 kg/cm².

APLICACIÓN DE MEMBRANA IMPERMEABILIZANTE

Para los efectos de la impermeabilización del Túnel las Raíces se empleó ***Espuma de Poliolefina Reticulada***, como se dijo se extrajo, de la experiencia vivida en el Túnel Caracoles en la V Región.

Esta espuma cuenta con propiedades excepcionales que son especiales para casos como el que se está estudiando, este material es fabricado en Alemania por la empresa TROCELLEN, para la aplicación de esta espuma se contó con mano de obra especializada procedente de España de la empresa KTC, empresa que se dedica alrededor del mundo a la aplicación de este tipo de impermeabilizantes para túneles.

La aplicación de la membrana se realiza adhiriendo ésta a la bóveda mediante un clavo plástico Hilti IZ 8x70, se hace un agujero con un taladro y luego se pone el clavo, la presentación de la membrana es en rollos de 50 m lineales y un ancho de 2.20 m el espesor de la membrana es de 15 cm, por esto, para la puesta disposición en la bóveda se debe hacer con un traslape de 30 cms, la unión de dos tramos de membrana se realiza mediante la termofusión (foto) también mediante este método se “tapan” los clavos con “parches” redondos del mismo material (foto).



Fotografía Nº 4



Fotografía Nº 5

La composición de la membrana es la siguiente:

PROPIEDADES	NORMA	UNIDAD	VALOR
Resistencia a la tracción Longitudinal Transversal	Directrices de la UEATc	Kp/5 cm	75 70
Alargamiento a la rotura Longitudinal Transversal	Directrices de la UEATc	%	26 22
Resistencia al desgarro Longitudinal Transversal	Directrices de la UEATc	Kp	21 23
Resistencia a movimientos activos tracción/compresión (50 ciclos)	Directrices de la UEATc		No se producen desgarramientos, fisuras o pliegues
Flexibilidad a baja temperatura (-20°C)	Directrices de la UEATc		No fisuración
Punzonamiento estático sobre soporte rígido	Directrices de la UEATc	Kg	25 L4
Estanqueidad al aire de las juntas (10 Kpam 30 min)	Directrices de la UEATc		NO se producen burbujas
Conductividad térmica	ASTM C-177	W/mk	0,031
Absorción de agua tras 28 días de inmersión	DIN 53428	vol%	0,8
Permeabilidad	ISO 1663	ng/(pa.sm2)	10
Comportamiento al fuego	UNE 23727-81		M1
Peso superficial		Kg/m2	<0,8

CUADRO 3

Aplicación de membrana de PVC

El proyecto de impermeabilización no contemplaba su aplicación en todo el desarrollo del túnel, sólo se aplicó en los lugares de mayor filtración, y aun así, se dispuso además poner otra lámina impermeabilizante en las zonas de aun mayor filtración, esta lámina se conoce como "huevera", es una membrana de nódulos de polietileno de alta densidad.

Ventajas Sikaplan. 9.6 T

tiene alta resistencia a:

- Envejecimiento
- Penetración de raíces
- Agua con cal

- Microorganismos
- Exposición térmica
- Otras propiedades:
- Elevada resistencia al punzonamiento
- Fácil de unir
- Alta resistencia mecánica
- Reciclable

Normas Cumple la norma SIA 280

Datos Básicos

Color Capa expuesta: Amarillo, 0,6 mm.

Capa de apoyo: Negro, 0,9 mm.

Almacenamiento Guardar en ambiente seco y bajo techo, apoyado sobre superficies no punzantes.

Los rollos deben ser colocados en posición horizontal sobre un soporte plano y liso.

Presentación Rollo de 2.2 m de ancho y 20 m de largo.

Datos Técnicos

Datos generales:

Espesor: 1.5 mm

Peso: 2,0 kg/m².

Datos según norma SIA 280:

Ensayo Especificación Resultado

Elongación (a Ruptura)

Longitudinal > 200 % ¡Y 310 % ± 30%

Tranversal > 200 % ¡Y 310 % ± 30%

Doblado a baja temperatura: Sin fisuración a -20°C Cumple

Deformación al calor:

6 horas a 80° C cambio dimensional

Longitudinal < 2 % 1,9 %

Transversal < 2 % 0,5 %

Resistencia a la presión:

(corte) 1 hora / 5 bar (0,5 N/mm².) Cumple

Así esta lámina se colocaba debajo de la espuma, como ya se dijo, en los lugares de mayor filtración, la fijación de esta lámina es mediante un clavo también Hilti pero metálico, y es puesto sobre la bóveda mediante un martillo de fulminantes.

CONCLUSIONES

Como en todo ámbito, en un comienzo se tiene una idea preconcebida de las cosas; cuando se habla de túneles nos imaginamos un camino que pasa bajo las montañas, jamás nos preguntamos el porqué de su forma, o si todos se construyen de la misma forma o tan simple como si en alguna otra parte del mundo tienen alguna solución menos costosa o menos riesgosa para sortear las partes más abruptas de la geografía de un país.

Comúnmente también los túneles presentan un atractivo especial para niños y adultos, la sensación de estar transitando por debajo de un cerro o en el caso particular del Túnel las Raíces, pasar bajo la cordillera.

Todas estas ideas fueron y dudas ahora tienen un fin informativo, podemos comprender ahora, que no todas las obras viales de éste tipo se construyen de la misma forma, en cada uno de los países en que se empezaron a utilizar estas soluciones viales, se empleaban distintas formas constructivas, eso si, cada una, a medida que pasaba el tiempo y se iba adquiriendo más experiencia, mejoraba a la anterior.

La cantidad de túneles alrededor del mundo es inmensa, todos con distintos fines y no sólo cruzando cordones montañosos, sino que también sorteando trozos de mar o canales, y no tan sólo para unir localidades dentro de un país, sino para unir dos países. Ejemplo claro de esto es el canal entre Francia y el Reino Unido que pasa bajo el Canal de La Mancha.

Además los túneles estén presentes desde las primeras civilizaciones pero con usos distintos que para los que los conocemos hoy en día.

Una vez que se toma la decisión de desarrollar un proyecto de esta índole hay parámetros a tomar en cuenta y que influyen notablemente en la ejecución de la obra, ejemplo claro es la influencia del agua, esta se presenta principalmente a través de napas subterráneas. La presión que ejerce sobre la bóveda, y sobretodo, el daño que origina al revestimiento de la misma, la llevan a ser el principal problema a la hora de construir un túnel; en el caso del Túnel Las Raíces era el motivo principal de las obras de mejoramiento que se realizaron.

Para estos efectos se cuenta con una gama muy amplia de elementos impermeabilizantes cada uno de ellos con distintas características, formas, costos y sobre todo con distintas composiciones, que van desde elementos de fibras naturales, pasando por el conocido hormigón, hasta llegar a membranas refinadas, asfálticas, etc.. Cada uno de estos elementos han sido probados en todo el mundo y cada día afloran nuevas tecnologías para la impermeabilización de túneles.

En el caso particular del Túnel Las Raíces, se empleó una membrana poliorrefinada, se toma la decisión de utilizar este material, por la experiencia vivida en el Túnel Caracoles, el comportamiento que presentó allí dio la confianza para volver a utilizarla, ya que, ambos túneles presentan características similares; bajísimas temperaturas en invierno y una filtración muy copiosa en ciertos lugares, aún así, la impermeabilización del Túnel Las Raíces fue reforzada con otra membrana de PVC en los lugares de mayor filtración para que cumpla con la función de conducir los caudales hacia los extremos inferiores de la bóveda.

Después de hacer una última visita al túnel en el mes de Julio pude constatar personalmente en terreno que la impermeabilización es total, lo que anteriormente era como estar en un día de lluvia hoy es totalmente seco y por ende, toma mucho menos tiempo cruzar el túnel, según pude saber también, en algunas partes en

donde sólo se aplicó la membrana de PVC, esta se está desprendiendo de las paredes de la bóveda, comprobando así, que la verdadera impermeabilización la cumple la membrana de poliorrerfina o Espuma Poliorrefinada.

BIBLIOGRAFÍA

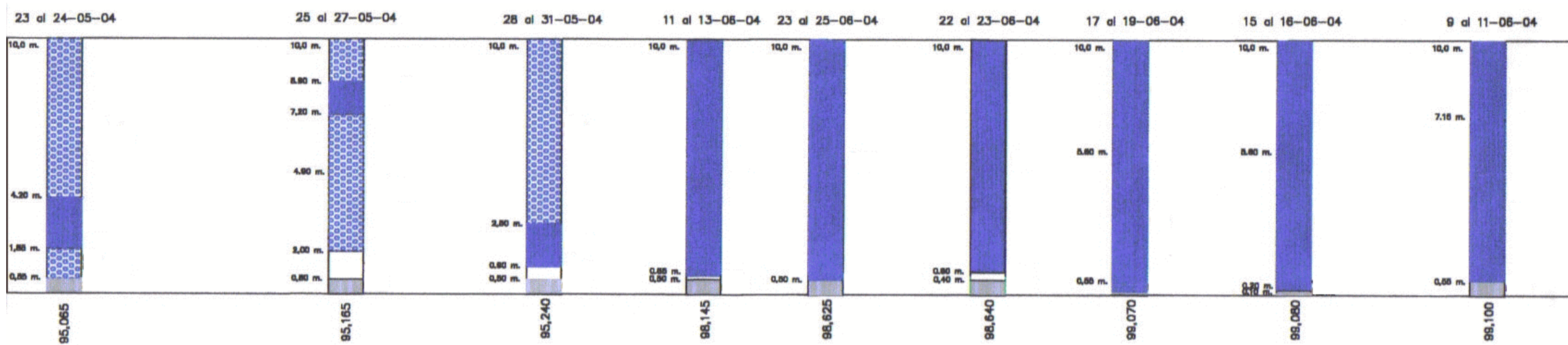
- **GONZALEZ, G.** *Túneles I*. Madrid. CEDEX. 1989.
- **DELGADO, A.** *TRATAMIENTO Y REFUERZOS DEL TERRENO EN OBRAS DE TUNELES*. Madrid. CEDEX. 1989.
- **MORENO, E.** *Diseño de Túneles en Rocas*. Madrid, CEDEX. 1989
- **M.O.P.T.T., DIRECCIÓN DE VIALIDAD.** *Manual de carreteras*. Volumen III. Chile, 2002
- **Referencia Electrónica**
 - www.vialidad.cl
 - www.microtunel.com
 - www.revistabit.cl
 - www.revistabit.cl/body_articulo.asp?ID_Articulo=1012 - 14k
 - www.satecma.es
 - www.trocellen.de/seiten/download_center/pdf/IMAGE_S.pdf
 - www.sika.com.co/co-con-news-sikaplan.pdf
 - www.cdt.cl
 - www.degussa-cc.es/NR/rdonlyres/FA055B1C-E732-4625-B508-CC9E92203EC4/0/novanol.pdf.
 - www.degussa-cc.es/NR/rdonlyres/CE7DF02A-368C-4AC7-8839-EA04CB59C5BA/0/tunelsec.pdf.
 - www.alkor.es
- **Otras referencias**
 - Especificaciones Técnicas “**Mejoramiento del Túnel las Raíces**”
 - Informe de Opinión Visita Técnica Obras de Reparación Túnel Las Raíces IX Región, Sr. Hugo Delucchi, Geólogo Geotécnico MSc

ANEXO 1

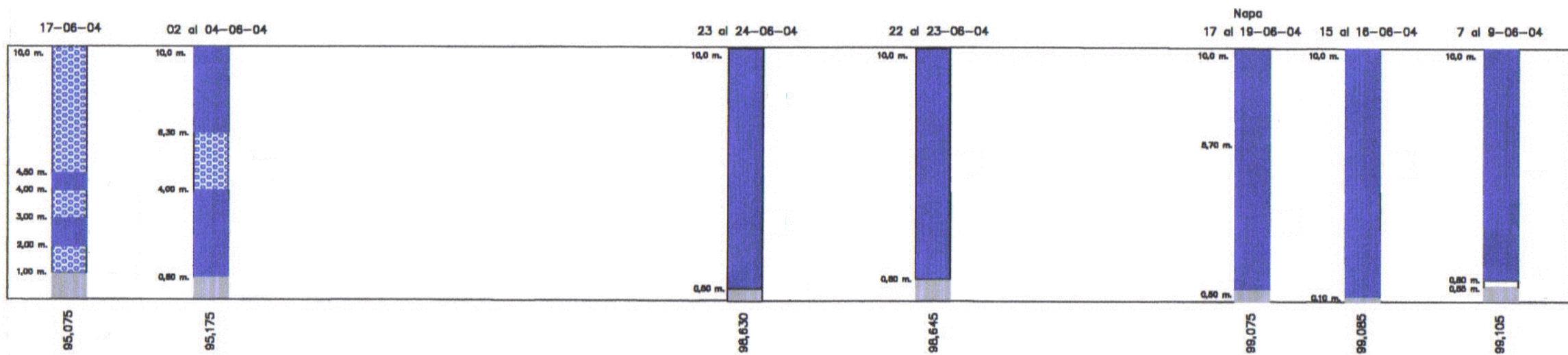
Simbología



Lado Derecho (A 4.0 m. DE LA CLAVE)



Lado Izquierdo (A 4.0 m. DE LA CLAVE)



Clave Bóveda

