



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería
Escuela de Construcción Civil

“CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES”

Tesis Para Optar Al Título De:
Constructor Civil

Profesor Patrocinante:
Sr. Adolfo Montiel Mancilla
Constructor Civil

PEDRO ROBERTO SOTO SAAVEDRA
2004

A todos aquellos que se cruzaron en mi camino
y me ayudaron a convertirme en lo que soy.
En especial a aquellos que me iniciaron
en este andar y aún están conmigo,
Mis Padres.

Agradezco en forma muy especial,
a quienes me ayudaron a que esta obra (¡por fin!) concluyera.
Pao y Patty, gracias por su apoyo, albergue y cariño.
Cuenten conmigo por siempre.

En primer lugar acabemos con Sócrates,
porque ya estoy harto de este invento de que no saber nada
es un signo de sabiduría.

- Isaac Asimov -

INDICE

	Pág.
Introducción	i
Resumen / Summary.	1
Capítulo 1.- “Historia de los túneles en Chile y el mundo”.	2
1.1.- Orígenes de las construcciones subterráneas.	2
1.2.- Túneles en Chile y el mundo.	5
1.2.1.- En Europa.	5
1.2.2.- En Norteamérica.	7
1.2.3.- En Chile.	8
1.2.4.- Otros Túneles.	11
1.3.- El futuro de los túneles.	12
Capítulo 2.- “Funciones y necesidades de los túneles”.	17
2.1.- Principales funciones.	17
2.1.1.- Transporte.	17
2.1.2.- Almacenamiento.	18
2.1.3.- Instalaciones.	18
2.1.4.- Científica.	18
2.1.5.- Protección.	18
2.2.- Factores relacionados con la función de cada túnel.	19
2.3.- Ubicación.	20
2.3.1.- Túneles de montaña.	20
2.3.2.- Túneles subacuáticos.	20
2.3.3.- Túneles urbanos.	21
2.4.- Características de los diversos tipos de túneles.	21
2.4.1.- Túneles para ferrocarril.	21
2.4.2.- Túneles de carretera.	24
2.4.3.- Transporte urbano (Metro).	26
2.4.4.- Conducción de agua.	27
2.4.5.- Centrales hidroeléctricas subterráneas.	28
2.4.6.- Sistema de alcantarillado.	30
2.4.7.- Túneles de servicios.	31
2.4.8.- Túneles de almacenamiento.	32

	Pág.
2.5.- Clasificación de túneles según Manual de Carreteras.	32
2.5.1.- Según Ubicación.	32
2.5.2.- Según Características Constructivas.	33
2.5.3.- Según Clima y Altitud.	34
2.5.4.- Según Equipamiento Según Flujo Vehicular y Longitud.	34
Capitulo 3.- “Construcción de túneles”.	38
3.1.- Estudios preliminares.	38
3.1.1.- Estudio geológico.	38
3.1.2.- Sondeos.	38
3.1.3.- Túneles de reconocimiento.	39
3.2.- Métodos de perforación.	40
3.2.1.- Método de ataque a plena sección o método inglés.	40
3.2.2.- Método de la galería en clave o método belga.	41
3.2.3.- Método de las dos galerías o método austríaco.	42
3.2.4.- Método de las tres galerías o método alemán.	42
3.3.- Operaciones básicas en la construcción.	43
3.3.1.- El arranque.	43
3.3.1.1.- Método manual.	43
3.3.1.2.- Método con explosivos.	44
3.3.1.3.- Métodos mecanizados.	46
a) Con máquinas convencionales	46
b) Con tuneladoras	47
b.1) Máquinas topo (TBM, Tunnel Boring Machine)	47
b.2) Los escudos	49
c) Con rozadoras	51
3.3.2.- La carga.	53
3.3.3.- El transporte.	54
3.3.3.1.- Palas rápidas.	54
3.3.3.2.- Transporte sobre vía.	54
3.3.3.3.-Transporte sobre caminos.	56

	Pág.
3.3.4.- Revestimiento.	56
3.3.4.1.- Bulones.	56
3.3.4.2.- Cerchas.	57
3.3.4.3.- Hormigón proyectado.	58
3.3.4.4.- Preanillos de hormigón.	59
a) Preanillos sobre chapa desplegada (método Bernold)	59
b) Preserrado de la roca	59
3.3.4.5.- Dovelas.	60
a) Dovelas ordinarias inyectadas	60
b) Dovelas expandidas	60
c) Dovelas atornilladas	61
3.4.- El nuevo método austriaco (NMA).	61
3.5.- Auscultación.	62
3.5.1.- Finalidad.	62
3.5.2.- Tipos de medidas.	63
3.5.2.1.- Medidas de convergencia.	63
3.5.2.2.- Medida de desplazamientos absolutos.	65
3.5.2.3.- Otras medidas.	65
3.6.- Las técnicas del microtúnel.	66
3.6.1.- Introducción.	66
3.6.2.- Métodos.	67
a) Empuje (Pipe Jacking)	67
b) Método Auger	68
c) Con escudo de lodos	68
 Capítulo 4.- “Replanteo de túneles”.	 70
4.1.- Proyecto de un túnel.	70
4.1.1.- Plano topográfico base.	71
4.1.2.- Planos de proyecto.	72
4.1.2.1.- Planta.	73
4.1.2.2.- Perfil longitudinal.	74
4.1.2.3.- Secciones.	74
4.2.- Trabajos en el exterior.	79
4.2.1.- Planimétricos.	79
4.2.1.1.- Red de enlace entre bocas.	79
4.2.1.2.- Paso de línea por montera.	81

	Pág.
4.2.2.- Altimétricos.	82
4.2.2.1.- Nivelación entre bocas.	82
4.2.2.2.- Perfil longitudinal por montera.	82
4.3.- Replanteo de pozos y rampas de ataque.	83
4.3.1.- Replanteo exterior.	84
4.3.2.- Control de la excavación.	85
4.3.3.- Transmisión de la planimetría y altimetría.	86
4.4.- Replanteo del túnel. Metodologías.	87
4.4.1.- Replanteo por el eje.	88
4.4.1.1.- Replanteos en las boquillas.	88
4.4.1.2.- Cálculo del replanteo óptimo.	89
4.4.1.3.- Replanteo de los puntos básicos y de los intermedios.	92
4.4.1.4.- Comprobación. Replanteos dobles.	93
4.4.2.- Replanteo desde una red subterránea.	94
4.4.2.1.- Red inicial.	94
4.4.2.2.- Red de control.	95
4.4.2.3.- Control del frente.	96
4.4.3.- Replanteos expeditos.	96
4.4.4.- Replanteos con láser.	98
4.4.5.- Guiado de máquinas tuneladoras.	99
4.4.5.1.- Sistema de guiado ZED.	99
4.4.5.2.- Sistema de guiado TUMA.	101
4.4.6.- Control en la zona del “cale”.	101
Capítulo 5.- “Velocidad de avance en los túneles”	102
5.1.- Rendimiento de túneles con frente abierto.	102
5.2.- Rendimiento de túneles con el método clásico.	107
5.3.- Rendimiento de túneles mecanizados en suelos o rocas blandas.	107
5.3.1.- Canal de la Mancha.	108
5.3.2.- Ampliación del metro de Madrid.	110
5.3.3.- Storebaelt. Túnel de unión del continente con Copenhague.	114
5.3.4.- Otros proyectos de túneles mecanizados en suelos o rocas blandas.	114
5.4.- Rendimiento de túneles mecanizados en rocas duras.	116

Conclusión	Pág. 120
Anexo “Estudio de la ingeniería básica (Manual de Carreteras Vol. 3 Sección 3.803)”	124
Bibliografía	133

INTRODUCCIÓN

En obras públicas se plantea frecuentemente el problema de la construcción de túneles, ya que nuestro país tiene una accidentada geografía a causa de grandes sistemas montañosos, lo que a dado origen a este tipo de construcciones, 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, mejorando así los niveles de servicios de nuestros caminos.

Las técnicas de construcción de túneles se mejoran y perfeccionan continuamente, tanto en el aspecto de seguridad como en el de rendimiento, es así como surge la necesidad de investigar las nuevas técnicas de construcción para el aprovechamiento de los recursos disponibles a un costo de operación y mantención más bajo.

El principal objetivo de esta memoria es realizar un estudio detallado de esta innovación tecnológica, sin olvidar los métodos clásicos, de forma que ésta sirva de guía para las diferentes personas que se ven involucradas en la construcción de un túnel, ya que las publicaciones existentes son escasas y, debido al constante avance del mundo tecnológico, no debidamente actualizadas.

A continuación se exponen las diferentes alternativas que existen hoy en día para la realización de este tipo de obras. En un principio, a modo de introducción, se dará a conocer el origen de estas construcciones a lo largo de la historia, tanto en Chile como en el resto del mundo, además se presentará el futuro de los túneles, es decir, proyectos próximos o expectativas a esperar que se cumplan en un futuro no muy lejano. Luego veremos las diferentes funciones que desarrollan los túneles y las distintas características que pueden adoptar estas obras dependiendo de su uso.

En los capítulos siguientes conoceremos en profundidad los distintos métodos para llevar a cabo la construcción de un túnel, además de conocer los distintos tipos de investigaciones previas a la realización del proyecto, así como también, revisaremos los aspectos técnicos de un proyecto, mirando más de cerca los distintos tipos de planos que se presentan a la hora de el replanteo de un túnel; para que esto se entienda mejor se incluyó el primer anexo, que fue tomado del manual de carreteras, el cual presenta de manera más extendida este asunto.

También se dan a conocer y detallan las operaciones básicas en la construcción (el arranque, la carga, el transporte y el revestimiento o sostenimiento). Posteriormente, se dan a conocer en forma somera algunos conceptos o formas de replantear un túnel del punto de vista topográfico (planimetría y altimetría), los cuales son relevantes para lograr una buena obra. Se incluyen además las últimas técnicas para la construcción, como son las técnicas del microtúnel, igualmente las formas mecanizadas que últimamente están en boga.

Para terminar se dan a conocer los rendimientos que se obtienen dependiendo del tipo de suelo en el que se trabaje y del método que se utiliza. Esta información fue recopilada por el español Manuel Melis M. (Prof. Dr. Ing. de Caminos, MBA Catedrático de Ingeniería del Terreno) y fue incluida para tener una idea de los tiempos que son necesarios para la ejecución de este tipo de obras.

RESUMEN

Se presentan en esta tesis en forma breve la historia de los túneles en Chile y el mundo, los orígenes y el futuro de éstos. Además se detalla cuales son las funciones y características que diferencian a cada uno de los tipos de túneles, para después continuar con la construcción de estos, los estudios preliminares, métodos de perforación y las operaciones básicas en la construcción. También se habla de los nuevos métodos como el NMA (Nuevo Método Austriaco) y las técnicas del Microtúnel, asimismo se tratara sobre el proyecto de un túnel y los diferentes métodos para el replanteo de este. En el último capítulo se trataran los rendimientos en la construcción de diferentes túneles con distintas metodologías. Para finalizar se incluye un anexo en el cual se profundiza en el estudio de la ingeniería básica que se debe tener en cuenta para el diseño de un túnel.

SUMMARY

It is presented in this thesis, in a brief form the history of tunnels of Chile and the world, the origins and the future of them, it is detailed which are the functions and characteristics that differentiate to each one of the types of tunnels, to continue with the construction , the preliminary studies, methods of drilling and the basic operations in its construction. Also, it is spoken of new methods as the NMA (New Austrian Method) and the techniques of the microtunnel, thus, it will treat on the project of a tunnel and the different methods to redefine it. In the last chapter it will be treated the performances in the construction of different tunnels with different methodologies. To finalize is included an enclose in which is deepened in the study of the basic engineering that should keep in mind for the design of a tunnel.

CAPITULO 1.- “Historia de los túneles en Chile y el mundo”

1.1.- Orígenes de las construcciones subterráneas.

La naturaleza fue quien realizó las primeras construcciones subterráneas, construyendo cuevas y cursos de agua subterráneos, decisivos para el desarrollo de la vida y el equilibrio de los ecosistemas. El hombre utilizó el túnel mucho después como solución para salvar obstáculos o por motivos prácticos, defensivos y por supuesto religiosos.

Los primeros túneles se remontan a principios de los descubrimientos metalúrgicos, al final de la Edad de Piedra, destinados a la explotación de los minerales como el sílex o pedernal, material indispensable con el que se fabricaban una multitud de armas y herramientas; cuando se agotaba en la superficie se seguía la veta por medio de pozos y galerías. Este proceso debió iniciarse hace unos 15.000 años. Estos túneles se abrían con la técnica del fuego que consistía en provocar un incendio en el frente de ataque para luego sofocarlo súbitamente con agua fría: el cambio de temperatura daba lugar al resquebrajamiento de la roca.



Fig. 1.01 *Primeros Túneles*

Las construcciones funerarias en casi la mayoría de las civilizaciones han encontrado bajo el suelo el lugar propicio para instalarse. Las tumbas reales del antiguo Egipto, excavadas en roca, gracias a las cuales y a lo que se ha encontrado en su interior ha sido posible conocer esta extraordinaria civilización. Las catacumbas formadas por una red increíble de pasadizos, pisos y profundos túneles que permitían el alojamiento de cientos de tumbas, se convirtieron en un lugar de culto.

Según algunos historiadores, existió un túnel bajo el Eúfrates en Babilonia. Esta obra sería el primer túnel subacuático y se remontaría al 2160 A.C.; al parecer fue mandado a construir por la legendaria reina Semíramis para enlazar el palacio con el templo de Belos.

También, hace unos tres mil años, se construían túneles en Asiria, Persia y Mesopotamia para transportar en forma segura el agua, protegiéndola de la evaporación que se produciría si la conducción estuviera expuesta a los intensos rayos solares de estas áreas; estos primeros túneles de abastecimiento de agua, llamados *qanats*, también se han encontrado en el suroeste de China, y en gran parte de Europa. Los *qanats* transportaban el agua por gravedad, los pozos que delatan su existencia se utilizaban para su construcción y posteriormente para la ventilación.

Otro motivo para la construcción de túneles era el estratégico, en las antiguas ciudades amuralladas el abastecimiento de agua se conseguía mediante túneles que aseguraban el suministro en caso de asedio. Este es el caso del túnel de Siloam, que se terminó en el año 700 A.C. y que llevaba el agua desde los manantiales de la montaña de Ophel hasta el estanque de Siloam en el interior de la vieja y fortificada Jerusalén.

Hace unos 2.500 años, el arquitecto Eupalinos construyó un túnel de más de un kilómetro de longitud para abastecer con agua del Monte Castrón a la ciudad griega de Samos. Sus hombres cavaron desde ambos extremos y se encontraron en el medio. No se sabe cómo evitaron que el túnel se les inundara pero, con la pendiente adecuada, el agua fluía de un extremo a otro. Cuando Eupalinos construyó su túnel, sus hombres se abrieron paso a través de roca sólida, que era suficientemente fuerte para soportar la estructura relativamente pequeña resultante. Sin embargo, los mineros y los constructores de túneles pronto aprendieron a entibar los techos de sus túneles en terreno menos seguro con maderos y mampuestos.

Los romanos dominaron el arte de los túneles, sobre todo los de carácter hidráulico, como lo demuestran las redes de acueductos que llevaban agua a las grandes ciudades, muchos de cuyos tramos eran en túnel. Según Vitruvio (Siglo I D.C.) lo fundamental era un preciso trabajo de nivelación. Los instrumentos usados para los trabajos topográficos eran las miras en cruz, el nivel de agua y la plomada. También, siguiendo la costumbre de los etruscos, se desarrolló en el imperio romano la construcción de cloacas, que resolvían el desagüe de casas y calles. Apenas se construyeron túneles para calzadas, aunque hay que destacar el de Pansilippo, cerca de Nápoles, construido para una calzada romana el año 36 a C. y que tiene 1.500 m. de longitud y 4 m. de anchura que permitía el tránsito en ambas direcciones.



Fig. 1.02 *Cloaca Máxima, boquilla que vierte al Tíber*

En la Edad Media la construcción de túneles da un paso atrás, al ser solamente construidos como vía de salida de fortificaciones para casos de asedios, o también como acceso a criptas funerarias.

Podemos decir que el primer túnel hidráulico moderno, fue la Mina de Daroca que construyó Bedel (Ingeniero y arquitecto francés) entre los años 1555 y 1560 bajo el cerro de San Jorge y que conducía las aguas, a veces torrenciales, evitando los destrozos e inundaciones causadas a la ciudad antes de existir la mina.



Fig. 1.03 *Mina de Daroca*

Fue Luis XIV el impulsor del Canal de Midi, obra cumbre de la era de los canales, construido entre 1666 y 1681 por Jean-Baptiste Colbert (1619-1683) con 240 Km. de longitud; unía el Atlántico al Mediterráneo y evitaba los largos viajes bordeando la Península Ibérica. De él forma parte el túnel de Malpas dirigido por Pierre-Paul Riquet, con 157 m. de longitud, 6.5 m. de ancho y 8 m. de alto.

Sin embargo, exceptuando el caso romano al que hemos hecho referencia, túneles como vías de comunicación empiezan a construirse con el inicio del siglo XIX, en el imperio napoleónico que pretendía someter a toda Europa con sus ejércitos, los túneles principalmente se abrieron en la zona de los Alpes y ninguno sobrepasó los 200 m. de longitud.

Con lo que respecta a la primera obra técnica sobre la construcción de túneles, data del año 1556 y fue escrita en latín por el alemán Georges Bauer y posteriormente traducida a varios idiomas; durante tres siglos fue la autoridad máxima en lo que se refiere a minas y túneles.

1.2.- Túneles en Chile y el mundo.

En el siglo XIX con la revolución industrial se producen grandes cambios tanto en lo político, social y económico, pero sin duda uno de los grandes fenómenos es la invención del ferrocarril, este medio de transporte es el principal motivo para la construcción de túneles en Chile y el mundo (La época dorada de la construcción de túneles en Europa), debido a la forma en que se masificó este medio de transporte y por consiguiente la red ferroviaria, que cada vez más extensa debía salvar cualquier obstáculo natural por medio de túneles y puentes.

1.2.1.- En Europa.

Fue George Stephenson, un inglés, quien creó la locomotora a vapor, y se inauguró en Gran Bretaña la primera línea de ferrocarril, por lo tanto, es lógico aceptar que fueran los ingleses los pioneros en la construcción de túneles. El ingeniero británico Marc Isambard Brunel fue el encargado de realizar el primer túnel subacuático de nuestra era, aunque en un principio fue un túnel de uso peatonal que constaba con 366 m. de longitud que se demoró 16 años en realizar (1825-1841), tras algunas largas interrupciones, por falta de fondos o por las inundaciones que producía el río Támesis. En 1865 una compañía ferroviaria londinense compró el túnel y realizó los accesos necesarios para el ferrocarril; la longitud final fue de 459 m. Brunel para la construcción del túnel bajo el Támesis desarrolló la idea de proteger a los trabajadores dentro de un escudo cilíndrico tan grande como el túnel. El cilindro se desplazaba a medida que cavaban, permitiéndoles extraer la tierra a medida que se movían. Detrás de ellos, los canteros construían las paredes del túnel.

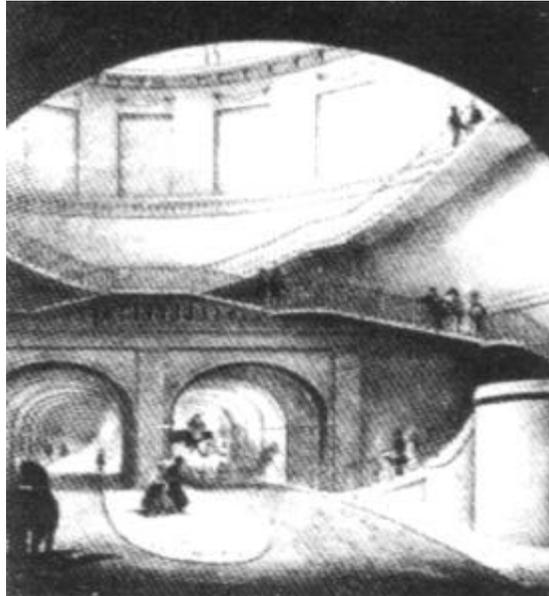


Fig. 1.04 *Túnel de Brunel bajo el Támesis*

La barrera natural de los Alpes, fue la que más retos impuso a los ingenieros del ferrocarril. Los constructores debieron hacer frente a graves problemas, como la falta de ventilación, las altas temperaturas que alcanzaba la roca, las fuentes termales, etc. En la construcción de estos túneles se lograron grandes avances en el perfeccionamiento de los equipos de excavación, como la invención de la máquina taladradora de aire comprimido, ideada por Germain Sommeiller y utilizada por primera vez en Mont-Cenis, que permitió multiplicar el rendimiento.

El primero de los grandes túneles en los Alpes fue el de Monte Cenis, también llamado de Frejus, que enlazaba el ferrocarril de Francia con Turín, en Italia. Su longitud original fue de 12,2 Km., su construcción empezó en 1857 y fue inaugurado en 1871 (14 años más tarde). El ingenio de los constructores consiguió la utilización de los torrentes de montaña para comprimir el aire que servía para que funcionaran los barrenos y para la ventilación.

El siguiente en construirse fue el de St. Gotthard, entre 1872 y 1882. Enlaza Suiza con Italia, desde Zurich hasta Milán. Su longitud, de 14,4 Km, superó la de Frejus; pero las condiciones de trabajo y la mala ventilación produjeron muchas muertes (alrededor de 200).

Para enlazar Suiza con Italia se construyó el túnel de Simplón, entre Berna y Milán, con 19,8 Km de longitud; se diseñó para dos túneles paralelos de una sola vía, separados 17 m y con un cruce en el centro. La excavación se comenzó en 1898, por los dos extremos y los dos túneles simultáneamente, con grandes ventajas respecto a los túneles anteriores en lo que se refiere a las condiciones de trabajo ya que la ventilación era suficiente y las posibles vías de escape o el drenaje en caso de necesidad estaban aseguradas. Se concluyó en 1906.

También fueron los Alpes los que dieron lugar a los túneles más largos para carreteras, como el de Mont Blanc, inaugurado en 1965 y que con 12.650 m. de longitud une Francia con Italia; más actuales son el de San Bernardino, puesto en funcionamiento en 1976, de 6.596 m. de largo y que une Suiza e Italia; por último el largo túnel de St. Gottard, de 16.320 m. que enlaza Suiza con Italia; el de Frejus (Francia-Italia), con 12.901 m., ambos inaugurados en 1980.

Los problemas del tránsito que empezaban a padecer las grandes ciudades se podían solucionar excavando túneles para ferrocarriles urbanos, así nació el Metro. El término "Metro" proviene de los llamados Ferrocarriles Metropolitanos, construidos en Paris (1900) Y Londres (1886-1890, primer ferrocarril eléctrico del mundo). En el primer cuarto del siglo XX ya se habían inaugurado líneas en gran parte de Europa y el mundo.

1.2.2.- En Norteamérica.

En la misma época que el túnel de Monte Cenis, se excavaba en Estados Unidos el de Hoocsa (1855-1876) que conecta la ciudad de Boston con el valle del Hudson; tanto tiempo duró la obra que se le llegó a conocer como la gran perforación o el gran lío; la elevada dureza de la roca hacia abandonar a los contratistas. La longitud del túnel fue de 7,4 Km. y la experiencia adquirida en la excavación en roca de alta dureza fue de gran utilidad para los que le siguieron.

Problemas completamente contrarios se encontraron los constructores del túnel bajo el río Hudson; la ciudad de Nueva York tenía este río como barrera natural para las comunicaciones con el Este y con el Sur, y se dependía de un transbordador para cruzarlo. El túnel se excavó casi completamente en limo, se inició en 1879 y después de numerosos problemas, como derrumbes por el secado del limo o inundaciones, se cerró en 1882 por falta de fondos. Este tramo fue pionero en la utilización de aire a presión, no como fuerza para mover las máquinas escavadoras (unas 7 Atm) sino como la compresión de toda la atmósfera dentro del túnel para conseguir una fuerza que equilibrase los frentes inestables acuosos (1 o 2 Atm). Las obras se reanudaron en 1889 utilizando el aire comprimido aplicado a un escudo (estructura rígida que protegía del colapso de la bóveda, de los hastiales y del propio frente de la excavación) y después de un período de inactividad por falta de fondos se concluyó en 1905.

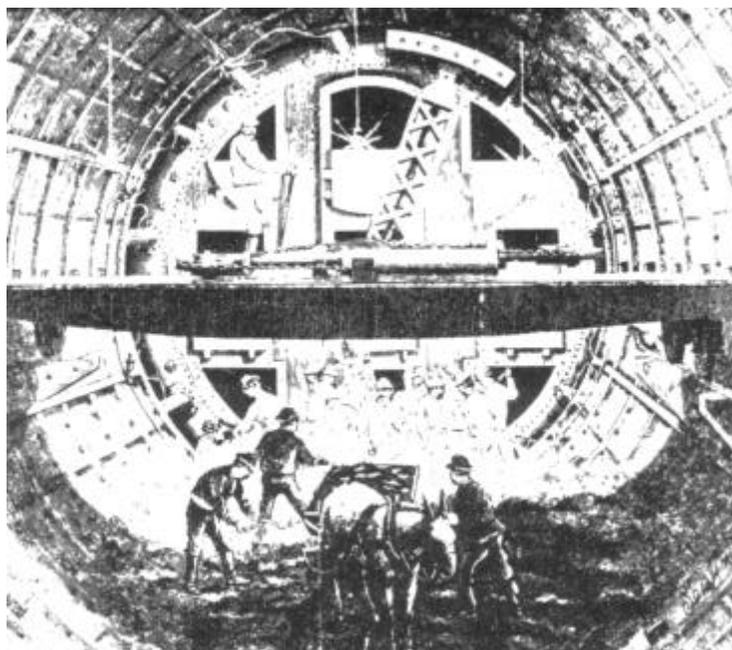


Fig. 1.05 *Túnel del río Hudson*

El primer túnel para vehículos a motor fue el túnel de Holland en Nueva York, túnel de 2.600 m. de longitud que fue abierto al tráfico en 1927. El problema de los humos tóxicos que desprendían los vehículos, después de un elaborado estudio, se solucionó con gran éxito. Otros túneles bajo el mismo río le continuaron.

1.2.3.- En Chile.

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.

El espíritu innato del excavador está muy dentro de la mentalidad nacional, kilómetros y kilómetros de túnel se han labrado en la explotación de yacimientos; incluso bajo el océano, como es el caso del carbón; en las obras de regadío; en las líneas ferroviarias y rutas viales; en las centrales hidroeléctricas y en muchas otras faenas de progreso.

En la red ferroviaria norte, tramo La Calera - Cabildo, se abrió el túnel Palos Quemados, con 1.050 m. de longitud. En la zona de Cabildo se construyeron cuatro túneles, que suman 2.180 m. de los cuales La Grupa y Las Palmas son utilizados por Vialidad desde que dejó de correr el ferrocarril. De Los Vilos al Choapa se construyó el de Cavilolen, de poco más de 1.600 m. de longitud y de Illapel a San Marcos, el de Espino, con cerca de 1.500 m. de longitud.

En la zona central se construyó el túnel Caracoles, del Ferrocarril Transandino, inaugurado en 1910, con una extensión de 3.143 m. (con 1.460 m. en el lado chileno). Al sur, próximo a Lonquimay se terminó el túnel Las Raíces en 1939, con una longitud que alcanzó a los 4.528 m. y que también está a cargo de la Dirección de Vialidad en la actualidad. En Santiago, el túnel de Matucana fue finalizado en 1943 con 2.300 m. de longitud, para comunicar bajo tierra las estaciones ferroviarias Central y Mapocho.

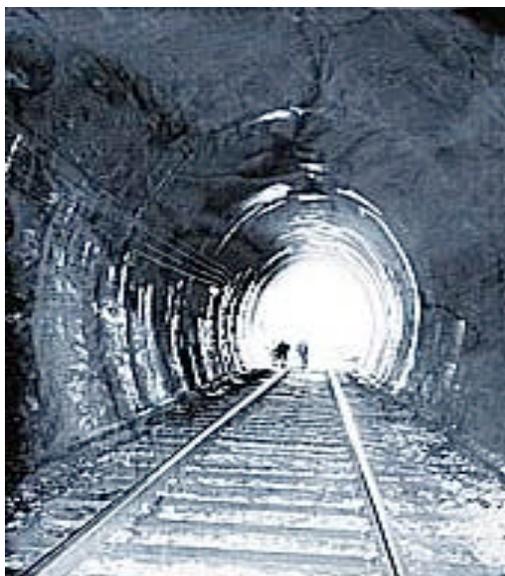


Fig. 1.06 *Túnel Las Raíces*

En cuanto a las rutas viales, el Ministerio de Obras Públicas a ejecutado las siguientes obras: En 1948 túnel Angostura, Ruta 5 en la VI región con 347 m. de longitud, en 1950 túnel La Calavera, Ruta 5 en la V región con una longitud de 298 m., en 1955 se entrega la construcción del túnel Zapata ubicado en la Ruta 68, ruta que une la ciudad de Santiago con la ciudad de Valparaíso, con una longitud de 1.215 m. El túnel Lo Prado, data de 1970, con una extensión de 2.744 m. ubicado en la Ruta 68 y en 1972 la construcción del túnel Chacabuco con 2.045 m. de longitud ubicado en la Ruta 57 CH en la V región.

En cuanto a las obras ejecutadas en los últimos 20 años se cita la construcción del túnel Cristo Redentor en 1980 ubicado en la Ruta Internacional 60 CH en la V región con una extensión de 3.080 m. (con 1.564 m. en el lado chileno), posteriormente en el año 1984 la construcción del túnel El Farellón en Coyhaique, XI región, con 240 m. de longitud y en el norte de Chile en la segunda región de Antofagasta la construcción del túnel Pedro Galleguillos de 793 m. de longitud, construido en 1994. La construcción del túnel El Melón (1995) construido mediante el sistema de concesión, se encuentra ubicado en la Ruta 5, V región, con una longitud de 2.500 m. y permite evitar la cuesta del mismo nombre. Finalmente el reciente inaugurado túnel La Calavera II en la misma ruta.



Fig. 1.07 Túnel del Cristo Redentor

Dentro de la red Vial Básica Nacional, existen en operación 19 Túneles, con una longitud total de 22.091 m, su ubicación, longitud y puesta en operación se indican en el cuadro siguiente.

Cuadro N° 1.1: Nomina de Túneles Chilenos.-

NOMBRE TUNEL	RUTA	KM.	REGION PROVINCIA	LONG. M.	AÑO P.S.
ANGOSTURA*	5 S.	56	RM – VI MAIPO-CACHAPOAL	347	1948
CARACOLES	60 CH	207	V LOS ANDES	1.460	1910
CURVO	D - 37 E		IV	212	1910 aprox.
CHACABUCO*	57 CH	59	RM – V CHACABUCO-LOS ANDES	2.045	1972
DEL CRISTO REDENTOR	60 CH	207	V LOS ANDES	1564 S. CH. 1516 S. AR.	1980
EL MELON*	5 N.	130	V PETORCA- QUILLOTA	2.543	1995
EL FARELLON	245	12	XI AYSEN	240	1988
JARDIN BOTANICO O.	60 CH	8	V	245	1996
JARDIN BOTANICO P.	60 CH	8	V	245	1996
LA CALAVERA*	5 N.	90	V SAN FELIPE	298	1950
LA GRUPA	E – 35	32	V PETORCA	1.277	1910

Cuadro N° 1.1: Nomina de Túneles Chilenos (Continuación).-

NOMBRE TUNEL	RUTA	KM.	REGION PROVINCIA	LONG. M.	AÑO P.S.
LAS ASTAS	D – 37 E		IV	787	1910 aprox.
LAS PALMAS	E – 37 D	20	IV PETORCA- COQUIMBO	980	1910 aprox.
LAS RAICES	R – 953	95	IX MALLECO	4.528	1939
LO PRADO*	68	24	RM STGO. MELIPILLA	2.800	1970
PEDRO GALLEGUILLOS	1	209	II TOCOPILLA	793	1994
PUCLARO	41 – CH	45	IV	370	1997
RECTO	D – 37 –E		IV	142	1910 aprox.
ZAPATA*	68	56	RM – V MELIPILLA- VALPO.	1.215	1955

LONGITUD TOTAL 22.091 M.

*** TUNEL CONCESIONADO**

1.2.4.- Otros Túneles

Existen diversos tipos de túneles que no son ferroviarios ni carreteros que se han construido y es bueno conocer como los túneles para la conducción de agua que hay hoy en día en Norteamérica que conducen agua desde los grandes lagos, o de los grandes ríos hasta las ciudades: al sur de California se construyó un acueducto de 370 Km. de longitud que conducía el agua del río Colorado a varias ciudades, se excavaron 29 túneles (148 Km.) de los cuales los más largos fueron el de East Coachello (29 Km.) y el de San Jacinto (21 Km.). El túnel que lleva agua a la ciudad de Nueva York desde el Delaware, con 137 Km., es considerado el más largo del mundo.

No podemos olvidar las centrales hidroeléctricas, con sus redes de túneles que conducen el agua, las grandes cavernas donde se instalan las turbinas y los túneles de acceso a las instalaciones. Incluso ya no es necesario construir grandes presas, sino que se construyen centrales subterráneas que se abastecen del agua de lagos de montaña, aguas conducidas por largos túneles, con el consiguiente ahorro de hormigón y de acero, como la de Montpezat (Francia) con más de 20 Km. de galerías subterráneas.

Como sistemas de alcantarillado ya Londres había construido el primer proyecto para una gran ciudad en 1865; hubo que construir numerosos túneles para conseguir transportar el agua sucia al Támesis a casi 20 Km. aguas abajo. Pero las demandas de una población e industria creciente hacen necesario un mejoramiento continuo.

Aunque ya desde la antigüedad se construían aljibes para el almacenamiento de las aguas pluviales, se construyen en la actualidad depósitos subterráneos con una finalidad que es la de recoger las aguas pluviales y residuales que desbordan las redes de alcantarillado y las depuradoras durante las tormentas de cierta intensidad; de esta manera pueden ser tratadas posteriormente, evitándose los vertidos directos sin tratamiento. Este problema lo padece la ciudad de Barcelona que actualmente proyecta construir embalses subterráneos para recoger el agua de las lluvias torrenciales y así poder depurarlas después de la tormenta, evitando los vertidos directos al mar que afectan gravemente a las playas, sobre todo en época veraniega.

Se han construido numerosos túneles para el paso de cables y tuberías, e incluso algunos antiguos túneles ferroviarios, sobre todo bajo ríos, se siguen utilizando en la actualidad para llevar este tipo de servicios.

También se excavan grandes túneles para almacenamiento de petróleo y otras sustancias, o como refugio y defensa; y últimamente para el estacionamiento subterráneo de vehículos. Las aplicaciones de la solución túnel no cesan.

1.3.- El futuro de los túneles.

Se puede decir que hoy en día las obras subterráneas experimentan un segundo apogeo con las extensas instalaciones subterráneas para el tráfico, la energía hidráulica, los propósitos militares e incluso para finalidades científicas. También los métodos técnicos se han desarrollado para conseguir una mayor rentabilidad y seguridad, a lo que han colaborado igualmente los nuevos conocimientos sobre la mecánica de rocas que, en general, estudia el equilibrio y las deformaciones de los terrenos bajo la influencia de fuerzas internas o externas.

Todo lo anterior lo demuestran las grandes obras subterráneas que a continuación se van a describir: el túnel de Seikan, inaugurado en 1988, enlaza las islas japonesas de Honshu y Hokkaido; con una longitud, récord hasta el momento, de 53,9 Km., de los cuales 23,3 Km. son subacuáticos, es de los más largos existentes para tren de alta velocidad.

Ya en 1802 se empezó a estudiar, desde Francia, el cruce del Canal de la Mancha por medio de una vía subterránea, idea que emocionó a Napoleón pero que no le dio tiempo a intentar ya que se rompió el tratado de paz con los ingleses. Hubo algunos proyectos más con mayor o menor consistencia y es en 1881 cuando el coronel Beaumont con su nueva máquina tuneladora perforó 1839 m; en 1883 se pararon las obras, no por problemas de la máquina sino por cuestiones económicas y políticas. Hasta cien años más tarde, y después de varios intentos infructuosos de acuerdo entre los gobiernos británico y francés (por razones primero militares y últimamente económicas), no se aprueba la solución de túnel ferroviario cuyas obras se inician en 1987. Es un doble túnel de 50,4 Km. de longitud, 37 de los cuales discurren bajo el mar; una tercera galería paralela a las anteriores y conectada a ellas con otras transversales asegura la ventilación, el mantenimiento y la seguridad. En 1991 se produce el cale de los túneles, y la apertura es en 1993. Los vehículos acceden directamente a vagones de 750 m de longitud, que pueden embarcar cualquier tipo de vehículo a motor.



Fig. 1.08 *Túnel del Canal de la Mancha*

Las aplicaciones del túnel en esta última década han llegado hasta el campo de las investigaciones científicas. Ha sido construido recientemente en Texas (EEUU) el mayor acelerador de partículas subatómicas (protones) del mundo. El anillo principal del SCS (Súper Colisionador Superconductor) es un túnel de 4 m de diámetro y de 87 Km. de longitud, dispone de túneles adicionales con una longitud de 27 Km. y su conexión con la superficie es por pozos verticales. Construido por el Departamento de Energía, tiene por finalidad avanzar en los conocimientos de las propiedades fundamentales de la energía y de la materia, del espacio y del tiempo.

Con la misma finalidad, también en Europa se ha finalizado la construcción del proyecto EUROLEP (Large Electrón Positrón Collider). Situado en la frontera franco-suiza consta de un túnel en forma de anillo circular de 27 Km. de longitud, la sección es de 4,5 m y se comunica con la superficie por medio de 18 pozos de distintos diámetros. Construido por la CERN, Organización Europea para la Investigación Nuclear.

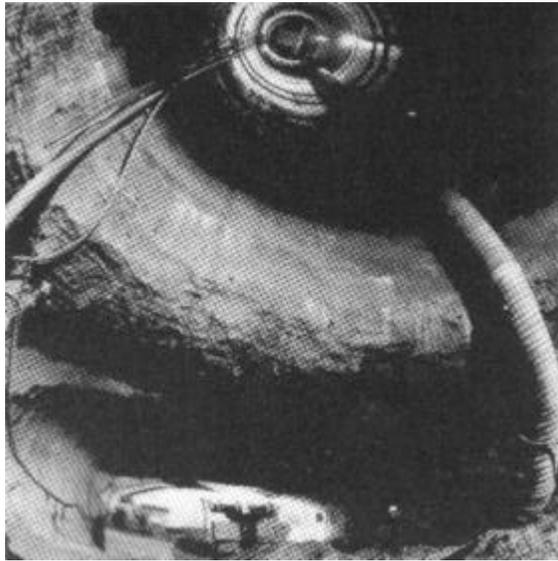


Fig. 1.09 *Proyecto LEP*

De algunas de estas grandes obras, que en este capítulo se describen someramente, se volverá a hablar en temas posteriores. De sus aspectos constructivos hablaremos en el tema “Sistemas de construcción de túneles” y en lo concerniente a los trabajos topográficos y geodésicos en el de “Replanteo de túneles”.

Todavía a finales del siglo XX existen obstáculos naturales difíciles de salvar, no obstante es fácil imaginar que se logren superar en las próximas décadas.

Un separador natural de Francia y España es el macizo de los Pirineos. Son ya varios los pasos por carretera existentes que se adecuan a una circulación intensa fluida y segura. Es de prever que esta infraestructura de comunicaciones a través de los Pirineos siga ampliándose en años venideros.

Con lo que respecta al Tren de Alta Velocidad, ya en plena explotación las redes de Japón, Francia, Italia, Alemania, en menor medida la del Reino Unido, y en inicios la española se prevé un nuevo auge del transporte ferroviario, cuya importancia se había visto eclipsada por el transpone por carretera y el transporte aéreo.



Fig. 1.10 *Túnel AVE*

La unión de estas redes implicará la construcción de grandes túneles. Ya se piensa en túneles alpinos de 30 a 50 Km. para el Tren de Alta Velocidad. Asimismo, la insularidad de Gran Bretaña ha sido vencida con la construcción del llamado Eurotúnel. El ferrocarril, pues, seguirá siendo un medio de transporte perfectamente competitivo.

Ya desde la segunda mitad del siglo XIX se estudiaban soluciones para establecer una comunicación fija a través del estrecho. En la actualidad ya se está trabajando en el proyecto de un gran túnel ferroviario excavado bajo el mar; el túnel tendría una longitud de unos 50 Km., aunque la separación entre las orillas marroquíes y españolas sean de unos 15 Km. en el lugar más estrecho. Actualmente se están llevando a cabo diferentes trabajos como la excavación de pozos y galerías de reconocimiento de hasta 10 Km. de longitud. También se realiza el levantamiento del perfil longitudinal del fondo marino mediante sísmica de refracción y otras técnicas geofísicas.

Parece ser que entre las posibles alternativas, la más viable sería construir un túnel de dos vías y una galería de servicio, suficiente para satisfacer las demandas previstas. Cuando la saturación del túnel lo requiriera se construiría otro paralelo. Actualmente un grupo español y otro marroquí son los encargados de realizar las investigaciones, que son seguidas con gran interés por el resto de países afectados (europeos y norteafricanos).

La congestión actual en el transporte entre la península Escandinava y la Europa Central está en vías de solución por medio de una serie de inversiones, a nivel interestatal y local, en carreteras y túneles.

Actualmente se trabaja en grandes ejes internacionales de carreteras: el eje europeo Escandinavia-Italia, en el que la solución túnel estará presente (tanto subacuáticos para salvar los estrechos de la península como túneles alpinos). Se unirá a este eje la rama Francia-España. Otro eje, de 10.000 Km. de longitud, unirá al sudeste, centro y este de Europa. Habrá también el eje este-oeste mediterráneo y el eje transeuropeo este-oeste. Con esto los Pirineos, los Alpes, los Balcanes y el mar ya no serán obstáculos para la unificación de Europa.

En Chile en la actualidad se está considerando el mejoramiento de la Ruta 68, por la vía de las concesiones; con cargo a este proyecto se están construyendo dos túneles adicionales, uno en Lo Prado y otro en Zapata, a fin de garantizar un mejor nivel de servicio, disminución de los tiempos de viaje y disminución de congestión vehicular en época estival.

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.

CAPITULO 2.- “Funciones y necesidades de los túneles”

2.1.- Principales funciones.

Las funciones del túnel son diversas: se construyen túneles para transporte, para almacenamiento, para albergar instalaciones diversas, por necesidades científicas y túneles para protección de personas.

2.1.1.- Transporte.

Se podría decir que es la función más antigua. La construcción de túneles para salvar obstáculos naturales se practica desde la antigüedad; podríamos resumir diciendo que en un principio fue el transporte de agua lo que necesitó de la solución túnel, debido a los requerimientos de pendiente mínima o nula; más adelante el desarrollo del ferrocarril, y posteriormente el desarrollo de los vehículos motorizados, hicieron necesaria la construcción de túneles por razones parecidas a las anteriores (evitar fuertes pendientes) pero también por razones nuevas: acortar distancias y ganar seguridad.

A continuación se enumeran, a modo de introducción, los distintos tipos de túneles que se construyen para el transporte, cuyas características se describirán más adelante.

Túneles para el transporte de personas y mercancías

- En carreteras
- En líneas del ferrocarril
- En líneas de transporte urbano (Metro)
- Pasos para peatones
- Pasos para ciclistas

Túneles para el transporte de agua

- En canales
- En abastecimientos urbanos
- Para el riego
- En centrales hidroeléctricas
- Para el agua de enfriamiento en centrales térmicas y nucleares

Túneles en sistemas de alcantarillado

Túneles para diversos servicios (cables y tuberías)

2.1.2.- Almacenamiento.

El difícil almacenamiento de determinadas sustancias y materiales se soluciona en ocasiones con túneles, que garantizan las necesarias condiciones de seguridad en unos casos, y evitan en otros el fuerte impacto ambiental que ocasionarían unos grandes depósitos en la superficie:

- Almacenamiento de petróleo
- Almacenamiento de residuos radioactivos
- Almacenamiento de materiales para usos militares
- Embalses subterráneos

2.1.3.- Instalaciones

Aquí se incluyen las grandes instalaciones subterráneas que se construyen por distintos motivos (prácticos, estratégicos, etc).

A continuación se nombran las distintas aplicaciones que con esta función se construyen por medio de túneles aunque, al igual que los de almacenamiento, más que túneles, son por sus dimensiones, verdaderas cavernas:

- Centrales energéticas
- Estacionamiento de vehículos
- Depuradoras de aguas residuales

2.1.4.- Científica

En la actualidad los países más desarrollados construyen túneles para investigaciones científicas de difícil realización en la superficie:

- Acelerador de partículas subatómicas

2.1.5.- Protección

También se construyen túneles cuya función es la protección de las personas, tanto militares como civiles; en los últimos tiempos se han construido para la defensa frente ataques nucleares. En este tipo de túneles el mayor reto es la resistencia de la estructura a los explosivos, así como la preservación de la vida durante un largo período de tiempo:

- Refugios
- Puestos de control

2.2.- Factores relacionados con la función de cada túnel.

Estos factores que se enumeran por separado son, sin embargo, dependientes entre sí, de manera que la acción de unos condicionará la de otros.

- La *ubicación* del túnel, que podrá ir a través de una montaña, ser subacuático o urbano.

- El *terreno* puede ser desde un limo blando hasta una roca dura; la selección que se haga del terreno implicará cambios en la geometría, en la forma de la estructura y por supuesto en el método de construcción.

- Las *dimensiones* del túnel acabado (ancho, altura y longitud), así como los parámetros que definan la planta (curvas circulares, de transición) y el alzado (pendientes máximas); estos límites podrán ser muy reducidos en unos casos, y se podrá disponer de un amplio campo de posibilidades en otros.

- La *forma estructural*, que podrá ser un círculo, rectangular, de herradura, etc. el material utilizado será el hormigón con mayor o menor espesor y el acero. La forma estructural deberá soportar las presiones de los terrenos. Tanto el tipo de terreno como el método de construcción influirán decisivamente sobre la forma estructural.

- El *sistema de construcción* que presenta numerosas posibilidades, desde, la excavación por explosivos hasta las máquinas tuneladoras a sección completa, pasando por los procedimientos de corte del terreno y posterior relleno para los túneles más superficiales. La elección del método vendrá determinada por las condiciones del terreno pero también por los medios económicos de que se disponga.

- El *equipamiento* del túnel ya terminado, las calzadas o las vías de ferrocarril, la iluminación, los sistemas de control, los acabados decorativos en su caso.

Todos estos factores se tienen en cuenta en la planificación y diseño del proyecto de un túnel.

2.3.- Ubicación.

Otra clasificación de los túneles, hablando ahora de los destinados al transporte, podría ser por su ubicación. Los obstáculos naturales que hay que salvar son variados (cadenas montañosas, ríos, estuarios o mares, y en una ciudad las calles, edificios u otras estructuras). Por ello los clasificaremos en túneles de montaña, túneles subacuáticos y túneles urbanos.

2.3.1.- Túneles de montaña.

Si el obstáculo es una cadena montañosa, la construcción de un túnel puede suponer un ahorro considerable de tiempo y energía.

Existen dos soluciones para atravesar con un túnel una cadena montañosa: la de un túnel corto a un nivel elevado, solución más económica pero que exige largas pendientes y curvas cerradas hasta llegar a la altura elegida, o la de un largo túnel a un nivel más bajo, con el que se acortarán distancias y se ahorrará en combustible y tiempo, aunque la inversión de capital será mucho mayor. También su utilización será mucho mayor ya que no se verá afectado por las nieves invernales de los túneles anteriores.

2.3.2.- Túneles subacuáticos.

Optar por un túnel en lugar de por puente para salvar un río o un estuario dependerá de cada caso. Si se precisan numerosas vías para el tráfico y el tipo de navegación permite una luz entre pilares moderada, el puente puede ser la mejor solución; pero si se precisan claros muy largos para la navegación, el costo del puente se encarece de manera desproporcionada, y si además las condiciones de cimentación no son muy buenas, será el túnel la mejor elección.

Por otro lado, con la solución del túnel en el futuro se podrán ir ampliando las vías, según la densidad del tráfico lo requiera, construyendo otros túneles paralelos, mientras que toda la inversión para el puente tiene que ser inicial aunque en el momento de la construcción no se requieran todas las vías para las que se ha construido.

Los largos accesos que precisan los túneles subacuáticos son su gran desventaja, aunque disminuyen con los actuales túneles prefabricados que se depositan en el lecho. Sin embargo son muchas las líneas de Metro que tienen tramos subacuáticos, ya que generalmente se mantienen muy por debajo de la superficie.

En el cruce del Canal de la Mancha fue la solución túnel la aprobada frente a otros proyectos de puente; el Eurotúnel es también un túnel subacuático para ferrocarril de Alta Velocidad.

2.3.3.- Túneles urbanos.

La construcción de túneles bajo las calles de una ciudad es utilizada para casi todas sus aplicaciones al transporte, pero los túneles urbanos más largos son los de ferrocarriles subterráneos, abastecimiento de agua y sistemas de alcantarillado. Túneles más cortos son los de carreteras, debido a los elevados problemas de ventilación y accesos que supondrían largos túneles; otros túneles urbanos cortos son los pasos para peatones.

2.4.- Características de los diversos tipos de túneles.

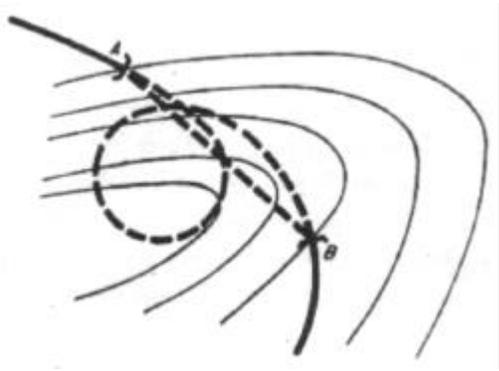
2.4.1.- Túneles para ferrocarril.

La utilización del túnel en las líneas de ferrocarril es para salvar colinas, en zonas costeras, en grandes cadenas montañosas y en cruces subacuáticos.

En los dos primeros casos suelen ser túneles cortos y su definición en planta puede ser recta o curva.

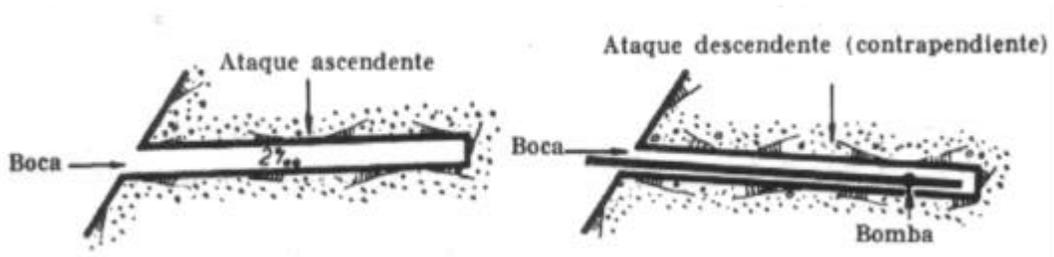
En los túneles más largos se adopta preferentemente el trazado en línea recta ya que es el más económico y también, al excavar desde los dos extremos, el más exacto en el replanteo y por lo tanto en la coincidencia entre ambos ataques, aunque en la actualidad la gran precisión en la medida de la distancia que consiguen los distanciómetros resta importancia a este hecho.

Una excepción a esta regla se da en los túneles que atraviesan grandes cadenas montañosas. Si el trazado general de la línea férrea exige la construcción de un túnel entre los puntos A y B, puede ocurrir que la pendiente del túnel en recta sea superior a la exigida; entonces hay que conseguir aumentar la longitud entre los dos puntos fijos mediante un trazado en curva, que en ocasiones llega a formar un bucle completo (trazado helicoidal).

Fig. 2.01 *Túnel helicoidal*

Ejemplos de túneles helicoidales son algunos alpinos, como el de Simplón y el de San Gotardo.

En cuanto a la rasante del túnel dependerá de la disposición del terreno más conveniente para la excavación y de las pendientes máximas admitidas, aunque se le intentará dar siempre un mínimo de pendiente para permitir la circulación de las aguas hacia la boca del túnel. El 0,3% es suficiente para este fin.

Fig. 2.02 *Ataques en pendiente*

Se intentará que sea ascendente en el sentido de la excavación, ya que la evacuación de las aguas subterráneas estará asegurada durante la construcción. En caso contrario las aguas se concentran en el avance y es necesario evacuarlas por bombeo. En los túneles largos, se suele dar pendiente hacia ambos lados, con un acuerdo parabólico en el centro, para así poder excavar desde las dos bocas y evacuar las aguas por gravedad.

Fig. 2.03 *Túnel de cumbre*

Los factores que controlan la pendiente máxima en una línea de ferrocarril son la potencia de la locomotora y la adhesión del riel, es decir, la capacidad de volver a arrancar el tren; por lo tanto no se puede decidir una pendiente sin conocer éstos factores, ni tampoco a la inversa. Sin embargo, podríamos decir que son pendientes usuales las comprendidas entre el 1% y el 2,5%.

En las líneas de ferrocarril de alta velocidad, donde además de los factores anteriores existe el condicionante de la velocidad a la que debe circular el tren, sí que existen pendientes máximas admitidas, que son del 3,5% en tráfico de viajeros y el 1,25% en tráfico mixto (viajeros y mercancías).

Todas estas pendientes suelen rebajarse de un 10 a un 20% al entrar al túnel, compensando así la reducción de la adherencia al riel que provoca la humedad en la atmósfera y el aumento de la resistencia aerodinámica.

También el radio de las curvas será el que determine la velocidad máxima de circulación de los trenes. En España con un accidentado relieve sólo comparable en Europa al de Suiza, existen tramos con radio de curvas de 300 m, donde la velocidad máxima de circulación es inferior a 110 km/h; alrededor del 5% tiene radios superiores a 1.500 m; y sólo el 64% de la red es en recta, de lo que se deduce la construcción de nuevos trazados, en los que sin duda habrá túneles, para conseguir radios de 4.000 m, los utilizados en alta velocidad. Como ejemplo significativo comentar que Japón, también país de accidentado relieve, posee el récord mundial de líneas de ferrocarril de alta velocidad con mayor porcentaje de obras de fábrica. En la línea de Tohoku (496 Km.) el 23% de su longitud es en túnel y el 72% en viaducto; la de Joetsu (270 Km.), con un 39% en túnel y un 60% en viaducto, sólo tiene un 1% situado en terreno natural.



Fig. 2.04 Secciones transversales de túneles para vías férreas

La sección tipo difiere según el tipo de terreno: en roca se utilizan generalmente muros verticales y la bóveda de medio punto (sección de herradura), en terrenos menos resistentes ésta se aproxima más a una forma ovoidal añadiendo una solera, y en mal terreno se tiende al círculo, con contrabóveda inferior. Su gálibo interior suele ser de 5 m de ancho y 7 de altura para una sola vía, y las vías gemelas suelen tener una anchura de 8,5 m.

2.4.2.- Túneles de carretera.

También los túneles para carreteras pueden ser, al igual que para el ferrocarril, cortos y largos; su definición en planta también tiende a ser en recta por ser el camino más corto y por lo tanto el más económico, aunque al igual que para el ferrocarril se construyen en curva si las condiciones del terreno a atravesar lo recomiendan o por otras causas. Las curvas pueden ser más cerradas (son normales radios de 400 m).

El perfil longitudinal sigue las mismas pautas que los anteriores en cuanto a las condiciones necesarias para la evacuación de las aguas por gravedad, tanto durante su construcción como posteriormente y siempre que sea posible. La diferencia más importante, comparándolos con los de ferrocarril es en la pendiente permitida: son pendientes normales las de 35 y 45 milésimas, e incluso se pueden utilizar en un tramo corto rampas de 65 milésimas, como en el caso de túneles subacuáticos en los que duplicando la pendiente se consigue reducir a la mitad la longitud del descenso hasta el nivel obligado.

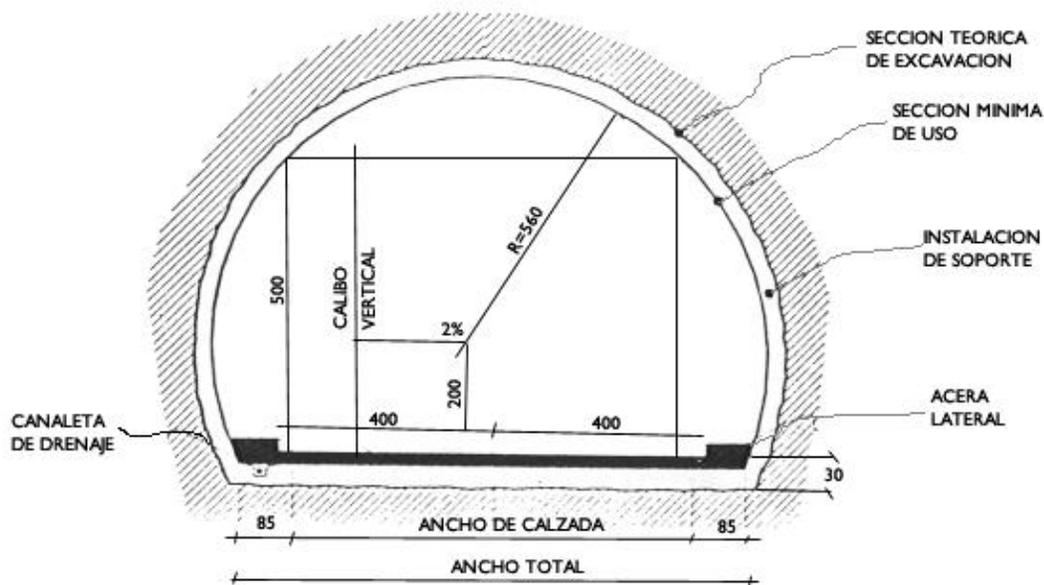


Fig. 2.05 Sección transversal de un túnel de carretera

La sección tipo de los túneles de carreteras es un poco mayor que la del ferrocarril de vía doble. El ancho para dos carriles ronda los 9 m, y la altura libre es alrededor de los 5 m. Lo normal es que se construyan túneles de dos carriles únicamente ya que en todos los túneles el aumento del ancho repercute de manera desproporcionada en el costo, al tenerse no sólo que excavar un mayor volumen sino también aumentar el espesor del revestimiento. Por ello es preferible excavar dos túneles paralelos con dos carriles cada uno cuando las necesidades sean de cuatro vías (dos para cada sentido). Un túnel excepcional en lo que se refiere a la anchura es el de Saint-Cloud en la autopista del Oeste a la salida de París que dispone de cinco vías de circulación.



Fig. 2.06 Túnel de carretera de Saint-Cloud

En cuanto al equipamiento del túnel es necesaria una iluminación que debe ser potente en la entrada, sobre todo de día, y disminuir progresivamente hacia el interior cuando ya el ojo humano se ha adaptado al cambio de luminosidad exterior-interior. La ventilación debe prever hasta las situaciones de emergencia, como colapsos de tránsito e incendios. El proyecto de ventilación tiene gran influencia en el proyecto y la construcción del túnel, pues el paso de los conductos de aire ocasiona problemas de espacio, y los futuros pozos de ventilación del túnel se pueden utilizar durante la construcción para multiplicar los frentes de excavación del túnel y también como ventilación.

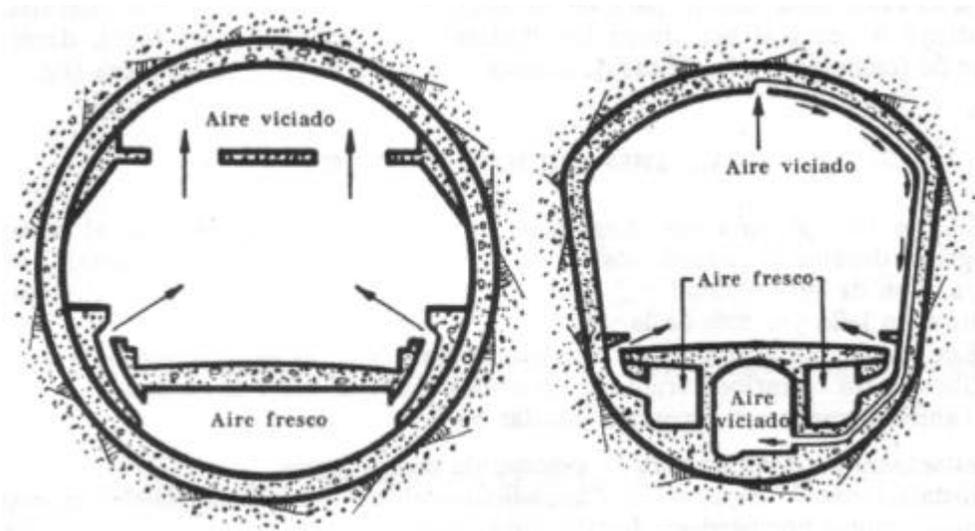


Fig. 2.07 Ventilación del Holland-Tunnel y del Mont Blanc

En algunos túneles de carreteras se permite el paso de peatones y ciclistas, con el inconveniente de que además del aumento de las dimensiones del túnel y su repercusión en el costo, los ciclistas retrasan el flujo total del tráfico y tanto ellos como los peatones requieren unas normas más altas de ventilación, ya que permanecen durante más tiempo en el interior del túnel y además realizan ejercicio. Es por todo ello que se construyen túneles aparte, para peatones y ciclistas, en aquellos países en los que es importante el transporte en bicicleta, o incluso por debajo de la plataforma de la carretera en cortos túneles subacuáticos de algunas ciudades. Estos túneles tienen unas restricciones mínimas, tanto de espacio como de pendientes.

2.4.3.- Transporte urbano (Metro)

Estos túneles difieren en algunos aspectos de los de las líneas de ferrocarril. En primer lugar suelen tener frecuentes secciones subacuáticas, ya que son pocas las grandes ciudades que no tengan ríos o estuarios que cruzar, en este caso no existe el inconveniente de los túneles subacuáticos que precisan descender muy por debajo del nivel del terreno, ya que es por donde suelen discurrir los ferrocarriles urbanos.

Las pendientes pueden ser más pronunciadas, ya que no tienen que transportar mercancías pesadas: son normales pendientes del 3,5%, e incluso en ciudades con terreno más abrupto, como en Montreal, se ha llegado a pendientes de hasta un 6,3% adoptando llantas neumáticas para mejorar la adhesión.

En general son túneles tan poco profundos como sea posible, por la importancia de un rápido y fácil acceso desde la superficie; es por ello que en los tramos donde no se ocasionan excesivos problemas por el corte de calles ni en la corrección o el corte de servicios más superficiales (líneas eléctricas, de gas, de alcantarillado, etc.) se construyen por el método de corte y relleno que, como su nombre sugiere, consiste en excavar desde la superficie para posteriormente y a cielo abierto construir el túnel, y por último rellenar y reconstruir la superficie.

Otro método que afecta en menor grado a la superficie es el denominado por pantallas, muy útil en terrenos inestables o de relleno propios de zona urbanas. Se construyen dos pantallas de hormigón armado en el sentido longitudinal del túnel (en esta fase sólo se han excavado dos estrechas y profundas zanjas verticales), a continuación se excava la zona entre pantallas hasta llegar a la línea curva de la bóveda, sirviendo el mismo terreno de encofrado, y se arma y hormigona dicha bóveda, para por último vaciar el hueco (con maquinaria convencional) y construir la contrabóveda.

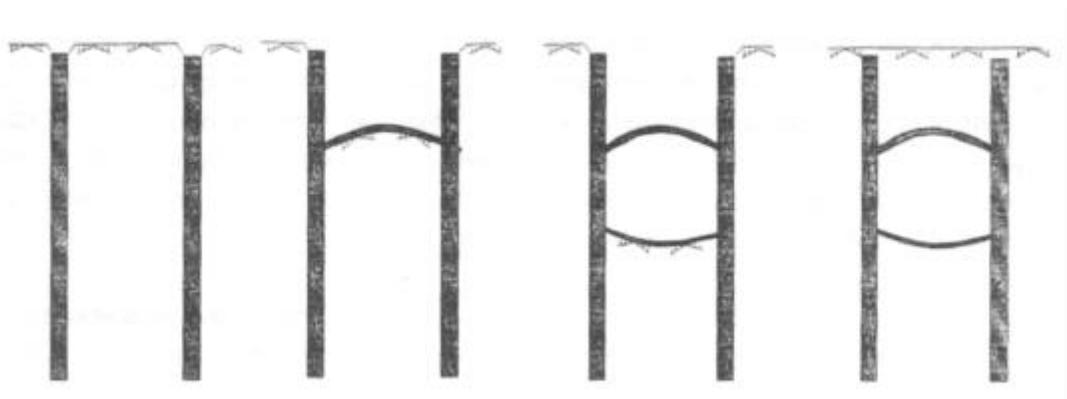


Fig. 2.08 Fases de construcción de un túnel por pantallas

Si el sistema de excavación ha sido el de corte y relleno la sección suele ser rectangular y actualmente a base de piezas prefabricadas de fácil y rápido montaje. En túneles perforados se tiende a la sección circular con el mínimo diámetro, por lo que la exactitud en el replanteo de la alineación es muy importante debido al escaso espacio libre entre el equipo rodante y la estructura. En ocasiones, debido a la falta de altura, se rebaja la bóveda y se aumenta su espesor.



Fig. 2.09 *Distintas secciones para dos vías*

Los túneles en las estaciones son mucho mayores que los túneles de recorrido, y presentan, respecto a su anchura, una sección aún más rebajada. En éstos se exigen normas estrictas de impermeabilización, así como una buena iluminación y unos buenos acabados.

2.4.4.- Conducción de agua.

El abastecimiento de agua potable a las ciudades es una necesidad que se remonta a tiempos muy antiguos. El acueducto desde una presa hasta la ciudad tendrá tramos aéreos, tramos en los que las tuberías se apoyen en la superficie, otros excavados en zanjas y también tramos en túnel.

El túnel se hará necesario para atravesar una colina y también, ya en zona urbana, cuando los excesivos obstáculos aconsejen la perforación de un túnel a mayor profundidad.

En este tipo de túneles no existen limitaciones de curvas y pendientes, las alineaciones podrán ser rectas, lo más largas posibles, o curvas. Incluso puede convenir que sean líneas quebradas si con ello se pasa bajo una depresión o garganta que nos permita abrir nuevos frentes de ataque en la excavación. El perfil longitudinal tendrá todo tipo de inclinaciones incluso la vertical, siempre que tenga un gradiente hidráulico descendente de extremo a extremo. Otras características son que sea liso e impermeable. La impermeabilización es importante en dos aspectos contrarios, por un lado para evitar erosiones importantes por

pérdida de agua en tramos en los que circule a muy alta presión, y por otro lado para evitar infiltraciones que podrían contaminar el agua cuando el túnel fuera parcialmente lleno.

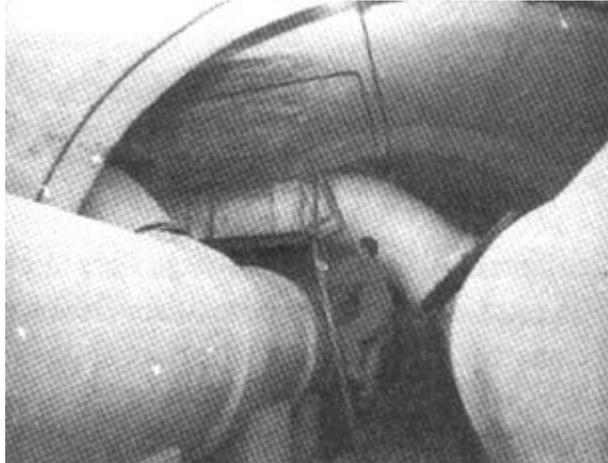


Fig. 2.10 *Distribución del agua potable en la ciudad*

La sección que se adopta normalmente es la circular, que es la que da el máximo caudal de agua y que además mejor resiste los empujes del terreno.

2.4.5.- Centrales hidroeléctricas subterráneas.

Las modernas estaciones generadoras de energía hidráulica son subterráneas; en ellas se construye una compleja red de túneles con distintas funciones: túneles de acceso desde el exterior hasta la sala de máquinas y de transformadores, túneles que conducen los cables, y los propios para la generación de la energía que podemos clasificar, por sus distintas características, en tres tipos: de descarga libre, de alta presión y salas de máquinas y transformadores.

Consideramos túneles de descarga libre al túnel para la captación del agua y al de desagüe; el primero suele estar siempre lleno pero a una presión relativamente baja, y debe tener una pendiente suave para que una vez vacío se pueda realizar su inspección y mantenimiento. El túnel para el desagüe tendrá la mínima pendiente ya que la sala de turbinas conviene situarla al nivel más bajo posible para aprovechar la máxima carga hidrostática del agua. La sección tipo, normalmente circular, y el revestimiento son similares a los de los túneles para abastecimientos urbanos aunque en los de desagüe se debe prever un revestimiento capaz de soportar la erosión bajo cualquier condición de descarga.

Los túneles de alta presión o conducciones forzadas suelen tener una fuerte pendiente, e incluso pueden ser verticales por lo que en su construcción se emplean técnicas propias de la construcción de pozos; es muy importante hacer mínima la pérdida de carga hidrostática por lo

que un revestimiento liso es imprescindible. Se producen muy altas presiones en los tramos próximos a las turbinas, y además en todo el túnel, cuando se cierran o abren los tubos de alimentación de las turbinas según las necesidades de producción, se producen presiones por ondas de choque y oleaje que se controlan construyendo chimeneas o tiros de alivio. El revestimiento debe ser capaz de soportar estas altas presiones y además ser impermeable, por lo que a menudo será de acero o de hormigón con un revestimiento interior de acero. También se puede excavar un túnel en el que se instala una tubería de acero de menor diámetro y al que se puede acceder para su mantenimiento.

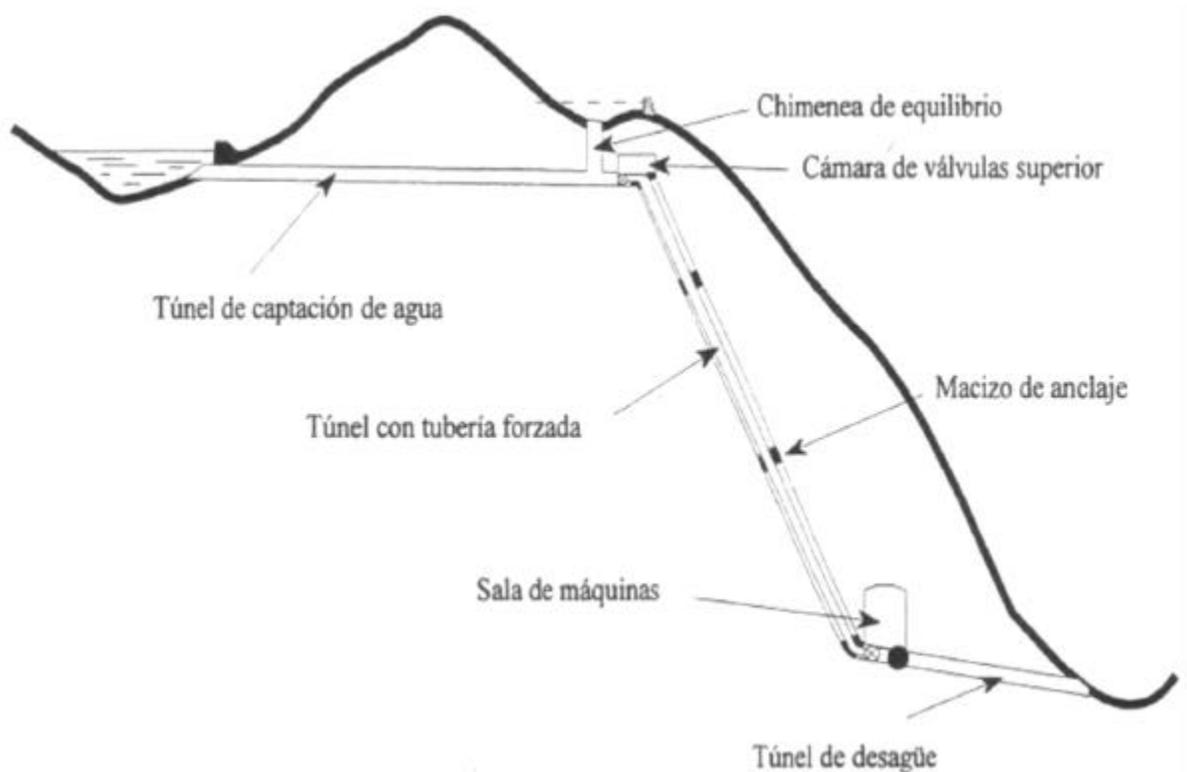
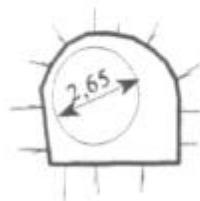


Fig. 2.11 Túneles hidráulicos en una central hidroeléctrica

Circuito hidráulico

longitud galería de abastecimiento	3.600 m
longitud tubería de presión	1.050 m
longitud galería de desagüe	620 m
salto bruto medio	762 m



Túnel con tubería forzada

Fig. 2.12 Características del salto de Moralets

Las salas de máquinas y de transformadores son grandes cavernas que albergan todo tipo de equipos (turbogeneradores, transformadores, tuberías de alimentación a las turbinas, etc.). Suelen tener paredes verticales y techo en bóveda (sección de herradura), y la anchura oscila entre 15 y 30 m. La construcción de estas grandes salas requiere una roca resistente.

2.4.6.- Sistema de alcantarillado.

Se hace necesaria la excavación de túneles en los sistemas de alcantarillado cuando la profundidad es excesiva para la excavación de zanjas o cuando no se puede afectar a la superficie. Las ciudades tienden a ampliar y modificar sus redes de saneamiento que ya no vierten directamente a un río o al mar sino que deben pasar por plantas depuradoras. La sustitución o ampliación de tramos ya antiguos y sin capacidad suficiente a menudo se realiza con túneles más profundos.

Las dimensiones de los túneles son muy variables: secciones inferiores a tres metros cuadrados no son prácticas, por lo que suele ser el mínimo aceptable si se construye con las técnicas clásicas. En su interior se sitúa la tubería que se adecúe a nuestras necesidades. En la actualidad las técnicas del microtúnel consiguen la ejecución de túneles de diámetros inferiores a 3 m y longitudes menores de 200 m, que afectan mínimamente a la superficie (pozos de pequeñas dimensiones). Estas técnicas se describirán en el tema siguiente.

La pendiente será pequeña pero uniforme; el flujo que conducen es muy variable por lo que deberá asegurarse la circulación del agua bruta en tiempo seco, evitando el sedimento de arenas, y en época de lluvias, en la que el colector tendrá que tener capacidad suficiente. La sección podrá ser circular o de herradura. En ambos casos se suele practicar un pequeño canal en la solera para asegurar la circulación del flujo en época seca, aunque la sección que mejor se adapta a estos requisitos es la ovoide. Otro requisito será la impermeabilidad para evitar contaminaciones por pérdida de agua.



Fig. 2.13 Secciones tipo

En cuanto a su definición en planta, podrá ser recta o en curva y muy a menudo su recorrido será quebrado. En los quiebros será obligada la situación de pozos de registro, necesarios para la ventilación (gases tóxicos), para el mantenimiento, e incluso como tiros de carga en casos de grandes tormentas.

2.4.7.- Túneles de servicios.

En la actualidad se está generalizando el uso de túneles para llevar cables y otros servicios mediante tuberías, sobre todo en las grandes ciudades y en pasos subacuáticos.

Las redes telefónicas en túnel permiten el acceso de personal para tender nuevas líneas y para el mantenimiento, sin que se afecte a la superficie. Las redes de gas precisan túneles para su uso exclusivo, con instalaciones para el control de fugas que podrían crear una atmósfera tóxica o explosiva; incluso se proyectan largos túneles como almacenamiento y así evitar la superficie.

Los túneles pueden servir para transportar varios servicios afines, situados convenientemente.

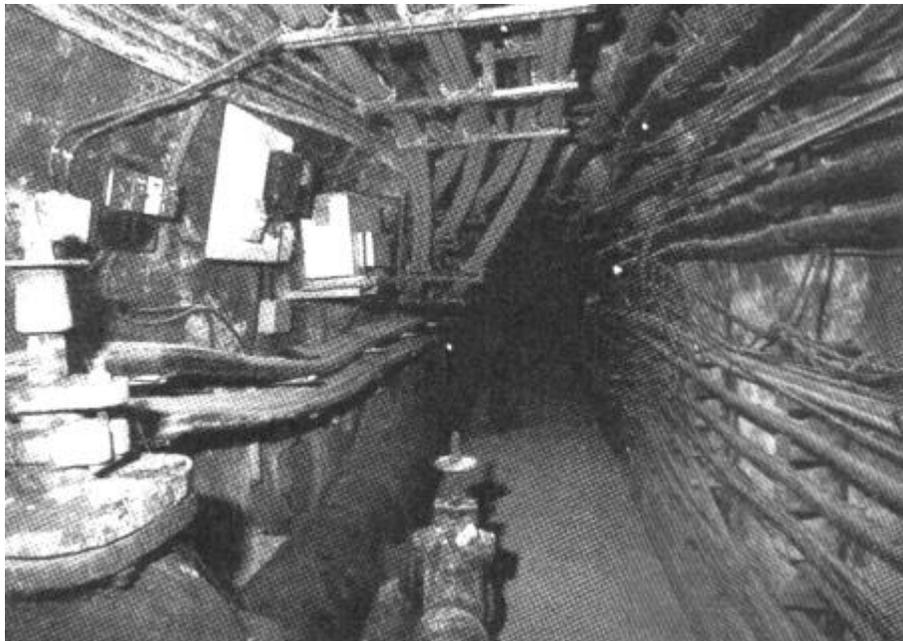


Fig. 2.14 *Galería de servicios*

2.4.8.- Túneles de almacenamiento.

La función del túnel como almacenamiento es antigua, pues era común el almacenamiento del agua de la lluvia en depósitos subterráneos. En la actualidad es el almacenamiento de petróleo crudo el uso más común, siendo su gran ventaja la seguridad contra incendios o daños; son grandes depósitos subterráneos sin revestimiento, de los que se va extrayendo el petróleo que se sustituye provisionalmente por agua para mantener el equilibrio de presiones hasta que se abastece de nuevo el petróleo crudo.

También se utiliza para almacenar explosivos y otros suministros militares y últimamente para eliminar residuos radioactivos. Otra utilidad es, en las grandes ciudades, para el almacenamiento provisional de las aguas lluvia en épocas de invierno, imposibles de tratar en cortos espacios de tiempo en las plantas depuradoras antes de ser vertidas; con este fin se proyecta construir varios embalses subterráneos en Barcelona para evitar de esta manera los vertidos incontrolados al mar.

2.5.- Clasificación de túneles según Manual de Carreteras.

2.5.1.- Según Ubicación.

Los túneles, según su ubicación en relación a las ciudades, pueden ser definidos como:

Rurales

Son túneles ubicados fuera del entorno urbano y que, en general, están destinados a atravesar obstáculos físicos tales como montañas o cuerpos de agua que resultan difíciles o inconvenientes de cruzar mediante puentes.

Los túneles rurales habitualmente tienen pocas restricciones espaciales. Por otra parte, en ellos suele ser más costoso el abastecimiento de agua y electricidad para la operación de los sistemas de incendio, iluminación, ventilación, controles y comunicaciones que puedan requerirse. En general, estos túneles son excavados en roca y suelos residuales (cruce de montañas) o suelos sedimentarios (cruce de ríos y otros).

Urbanos

Son túneles emplazados dentro de los límites de la ciudad y están fuertemente constreñidos espacialmente por las redes de servicios propios de las urbes modernas, como ser: redes de alcantarillado, redes de trenes subterráneos, redes de agua potable, redes de gas, redes de alimentación, eléctrica, teléfonos, fibra óptica, etc.

Los túneles urbanos son frecuentemente del tipo trinchera cubierta y excavados en suelos sedimentarios.

En los túneles urbanos los problemas de ventilación resultan, a veces, dificultados por el hecho de que no siempre se puede expulsar libremente el aire viciado proveniente del interior del túnel, debido a restricciones de carácter ambiental.

2.5.2.- Según Características Constructivas.

Los túneles según sus características estructurales y de construcción pueden ser definidos como:

Túneles en roca (Normalmente a través de una montaña)

Túneles en suelo (Normalmente urbanos)

Túneles falsos (Construidos en hormigón armado y luego tapados con suelo. Generalmente se construyen antes de la entrada a los túneles en roca, para proteger a los vehículos de la caída de rocas).

Trincheras cubiertas (Estructuras de hormigón armado de sección rectangular, construidas en suelo y luego tapadas. Generalmente son urbanas)

Cobertizos (Estructuras de hormigón armado de sección rectangular construidos en zonas montañosas para proteger a los vehículos de las avalanchas de nieve. Estas estructuras generalmente son abiertas en uno de sus costados)

2.5.3.- Según Clima y Altitud.

Resulta de especial importancia la ubicación geográfica (fundamentalmente altitud) en donde se ubique la obra y el clima del sector.

Toda obra localizada en altura considerable y en un clima lluvioso o sectores con filtraciones mayores, requerirá el diseño especial de canaletas conductoras – evacuadoras de aguas, las cuales deberán ser calculadas, dimensionadas y localizadas de manera que cumplan con el objetivo de mantener las pistas secas.

La ubicación geográfica determinará la posibilidad de congelamiento de aguas escurrientes o infiltradas a la obra para lo cual deberá procederse a neutralizar el fenómeno que provoque esta situación.

Hay dos fenómenos, particularmente peligrosos para los conductores, que se producen frecuentemente en túneles cordilleros con exceso de agua, que deben evitarse a toda costa:

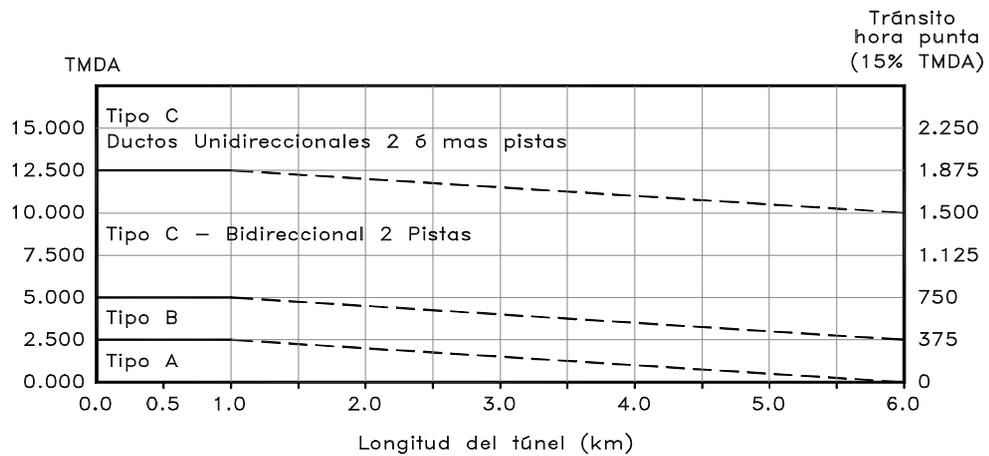
- Pavimentos con una película superficial de agua congelada, que se tornan muy resbalosos.
- Empañamiento repentino del parabrisas al ingresar un vehículo a baja temperatura a un túnel lleno de aire saturado y a mayor temperatura que el vehículo.

Para evitar estos fenómenos se deberá considerar en el proyecto la colocación de láminas térmicas, por ejemplo CARFOAM, las cuales evitan la generación de goteos y su posterior congelación de arriba hacia abajo (estalactitas) o de abajo hacia arriba (estalacmitas).

2.5.4.- Según Equipamiento Según Flujo Vehicular y Longitud.

La Figura A. ilustra una clasificación de los Túneles en función del Tránsito Medio Diario Anual (TMDA) y del Tránsito en Hora Punta asociado a dicho TMDA, versus la longitud del ducto; según ello se clasifican las obras en cuatro categorías, para las que en la Tabla B se indica el tipo de Equipamiento de Seguridad y Control con que debería contar el Túnel. El TMDA se debe considerar al horizonte de diseño de la obra y el Tránsito en Hora Punta como el de la Hora 30 a dicho horizonte.

FIGURA A



Las líneas punteadas de la figura corresponden a la frontera para la cual a un mismo TMDA, túneles de mayor longitud pasan a la categoría superior en cuanto a equipamiento deseable.

Se establece además que según sea la longitud del Túnel, cuando el tránsito de la hora punta es del orden de 1500 a 1900 Veh/h, se deben diseñar ductos unidireccionales de 2 pistas cada uno; pudiendo inicialmente construirse un ducto bidireccional, para luego construir el segundo ducto quedando ambos unidireccionales.

Debe tenerse presente que para los TMDA indicados entre un 20 y 40% son camiones y buses, según el camino de que se trate. En hora punta estos porcentajes suelen bajar a valores comprendidos en el rango de 7 a 18%.

El volumen de 12.500 Veh/día, para un túnel corto, que requeriría Ductos Unidireccionales corresponde al porcentaje menor de camiones y buses. Consecuentemente, para el límite superior de vehículos comerciales la línea divisoria entre túnel bidireccional y de ductos unidireccionales se desplazará hacia abajo, dependiendo entre otros factores de la pendiente longitudinal y del tipo de carretera de que se trate, es decir de la calidad del servicio que le corresponda.

La longitud de un túnel es fundamental en la determinación de las especificaciones de requerimientos de equipamiento, ya sea para implementación inmediata o a futura.

Debe tenerse presente que siempre es posible realizar el equipamiento de un túnel, en forma progresiva. Sin embargo, es necesario tomar las precauciones respectivas en el diseño de

la sección básica y obras civiles, particularmente si se pretende habilitar sistemas de ventilación en etapas posteriores.

En todo caso, la clasificación apunta principalmente al tipo de equipamiento con que deberían contar los túneles y la decisión de construir uno o dos ductos deberá ser tomada tras un estudio técnico económico que pondere adecuadamente todos los factores involucrados.

Un túnel de gran longitud pero de escaso tráfico puede considerar la postergación de cierta implementación, pero debe considerar en su diseño los espacios y/o condiciones específicas para estas implementaciones a futuro.

Según el tipo de túnel que corresponda de acuerdo a lo indicado, quedarán determinados los equipos de seguridad requeridos y/o recomendados en cada caso (Ver Tabla B).

TABLA B

Equipamiento de Seguridad y Control en Túneles Mayores de 200 m.

Equipamiento	A	B	C	Observaciones
Luces de evacuación de emergencia	○	○	●	Luces cada 50 m.
Extintores de incendio	○	●	●	Cada 100 m Tipo C Cada 200 m Tipo B
Teléfono de emergencia	○	○	●	Cada 200 m.
Señales de servicios	●	●	●	En cada servicio.
Marcas en pavimentos				
Ojos de gato	●	●	●	Continuas.
Red de control de incendio	○	○	●	Diseñar ad hoc.
Vigilancia de TV.	○	○	●	Diseñar ad hoc.
Iluminación interior	○	●	●	Diseñar ad hoc.
Equipos eléctricos de emergencia	○	●	●	Diseñar ad hoc.
Control de altura	●	●	●	200 m antes de portales. Con pista auxiliar para detención fuera de la carretera.
●	Obligatorio			
○	Recomendable			

Las principales características de estos Sistemas de seguridad son las que se indican:

Luces de Evacuación de Emergencia

Son luces usadas para indicar o mostrar el camino hacia las bocas de los túneles en caso de presencia de humo. Son equipos activados manual o automáticamente en caso de incendio. Debe tratarse de luz blanca que pueda verse a través del humo, instaladas en las paredes a 1 m sobre el pavimento y a lo menos cada 50 m una de otras, deben tener capacidad para permanecer a lo menos 1 hora encendidas.

Extintores de Incendio

Debe tratarse de equipos puestos en nichos en las paredes del túnel dentro de cubículos iluminados con puerta de vidrio delgado fácil de romper en caso de requerimiento. Deben estar indicados con señalización adecuada, reflectante e iluminación interior.

A lo menos se considera un punto de ubicación cada 200 m.

Teléfonos de Emergencia

Estos teléfonos deben estar destacados, y deben funcionar de manera tal que emitan una señal al controlador con solo levantar el auricular no requiriendo discar ningún número.

Se deben instalar en nichos cubiertos con un semi techo. Su número debe ser uno cada 200 m de longitud de túnel.

Señales de Servicio

Debe considerarse dentro del túnel la instalación destacada de señales camineras que indiquen la presencia de extintores de incendio, teléfono de emergencia, velocidad y otras condiciones especiales de la obra.

Marcas de Pavimento. Ojos de Gato

Debe considerarse la instalación de este tipo de marcas reflectantes en el pavimento igual que su instalación en el camino exterior.

CAPITULO 3.- “Construcción de túneles”

3.1.- Estudios preliminares.

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

3.1.1.- Estudio geológico.

La información geológica se obtendrá de los mapas e informes publicados y será de todo el trazado, incluso de sus posibles variantes. De esta manera se obtendrá una información aproximada de depósitos aluviales y tipos de roca que podremos encontrar en la excavación, así como de fallas y otros accidentes geológicos que habrá que investigar a fondo. Además en estos informes se indicará la posible existencia de napas de agua y cauces subterráneos.

También nos aportarán datos los registros de perforaciones anteriores, como cimentaciones profundas, pozos, túneles anteriores, canteras y minas, e incluso la inspección de acantilados, lechos de ríos y cualquier otro tipo de excavación.

Todos estos datos son de carácter general y pueden ser insuficientes en determinadas zonas, por lo que se deben complementar con sondeos y galerías de reconocimiento.

3.1.2.- Sondeos.

Los sondeos darán información sobre la naturaleza de las distintas capas, su consistencia y su grado de humedad.

La perforación con barrenos es el método más utilizado por razones de flexibilidad, rapidez y economía. El diámetro de los agujeros varía de 100 a 400 mm. y la profundidad puede superar ampliamente los 100 m. Se hace el agujero por métodos de percusión, alzando y dejando caer la herramienta adecuada según el tipo de terreno, o haciendo girar por medio de una varilla una broca de perforar o un barrenador. Se entiba con tubos de acero que se hacen bajar por el agujero. Aunque la barrena haya fragmentado la roca, ésta se puede identificar. Las muestras inalteradas requieren el uso de una broca anular con la que se extrae un núcleo.

Sea cual sea el método los fragmentos excavados se extraen y se examinan en la superficie. Una vez obtenidos deben sellarse inmediatamente para impedir cualquier cambio en el grado de humedad antes de su llegada al laboratorio, donde se obtendrán la mayor parte de las características necesarias para nuestros fines.

Más costosos, pero también más instructivos, son los sondeos por pozos, ya que la observación y toma de datos es directa en las paredes del pozo y por lo tanto no existe contaminación de unos terrenos con otros. En túneles de montaña son de difícil realización debido a la gran profundidad a que habría que excavar; no obstante, conviene hacerlos al menos en la zona de las bocas y alguno intermedio.

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

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

3.1.3.- Túneles de reconocimiento.

Los túneles de reconocimiento son sin duda el método de exploración que da más información para la construcción del túnel. Se pueden excavar partiendo de las bocas del túnel o del fondo de los pozos de sondeo; pueden llevar la dirección del eje como túnel piloto que posteriormente será ampliado, o pueden ir en una dirección paralela y a la distancia conveniente para su posterior utilización como galería de servicios o como túnel de drenaje o de ventilación.

En los terrenos permeables, al igual que los pozos, tienen el inconveniente de servir de drenaje, y si la excavación del túnel definitivo, si éste es el caso, no se lleva a cabo en un tiempo prudencial, cuando se llega a estas zonas pueden haber cambiado sus características por saturación de los terrenos. Sin embargo en terrenos rocosos son muy útiles para determinar el método de arranque más rentable según la dureza de la roca, prever la velocidad de avance y el comportamiento de la roca.

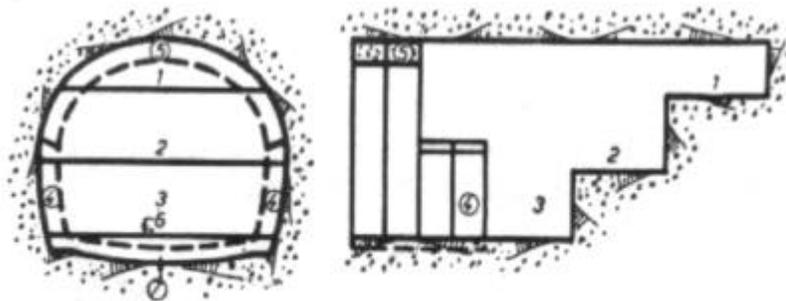
3.2.- Métodos de perforación.

Según la naturaleza del terreno se puede atacar la excavación del túnel con una sección más o menos grande. La roca dura permitirá el ataque a sección completa; sin embargo los terrenos sueltos (arenas, gravas) sólo permitirán avanzar mediante pequeñas secciones y provistos de blindaje. Entre estos extremos existen otros tipos de terrenos en los cuales la perforación se puede realizar por varios métodos que a continuación describimos.

3.2.1.- Método de ataque a plena sección o método inglés.

Suele utilizarse para túneles de pequeña sección (menos de 15 m²), o en muy buen terreno en secciones mayores, y por supuesto en roca.

Una solución para terrenos de inferior calidad es utilizar el ataque a plena sección pero con varios escalones de ataque. La excavación se realiza por franjas horizontales comenzando por la de la bóveda, con el inconveniente de que la evacuación del material requiere varias actuaciones hasta llegar al nivel donde se instala el sistema de transporte al exterior.



Ataque a plena sección con varios pisos.

1, escalón superior; 2, escalón intermedio; 3, escalón inferior; 4, pilares; 5, bóveda;
7, solera (eventualmente).

Fig. 3.01 *Método Inglés*

En el esquema que indica el proceso de actuación, se numeran las etapas por orden de ejecución y se redondea con un círculo la fase de sostenimiento.

3.2.2.- Método de la galería en clave o método belga.

Es uno de los métodos más utilizados. Tiene la característica de ejecutar primeramente la excavación de la bóveda (es lo que se llama avance en bóveda o calota), incluido el sostenimiento que descansa directamente sobre el terreno, pues de esta manera se protege la obra por encima. Después se realiza la excavación de la parte inferior llamada destroza, comenzando por la zona central y siguiendo, en cortos tramos alternativos, por los hastiales, que una vez excavados se revisten; de esta manera no se compromete la seguridad de la bóveda que descansa siempre sobre la destroza no excavada o sobre los pilares ya construidos. Se termina por la construcción de la solera cuando es necesaria.

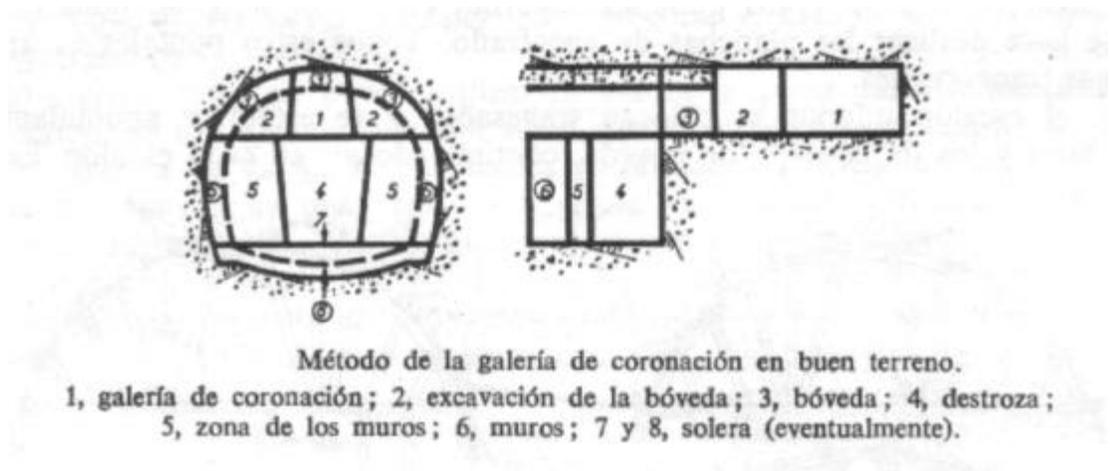


Fig. 3.02 Método Belga

Tiene el inconveniente de que necesita vías de evacuación de escombros a diferentes niveles, con el consiguiente transvase de un nivel al inferior.

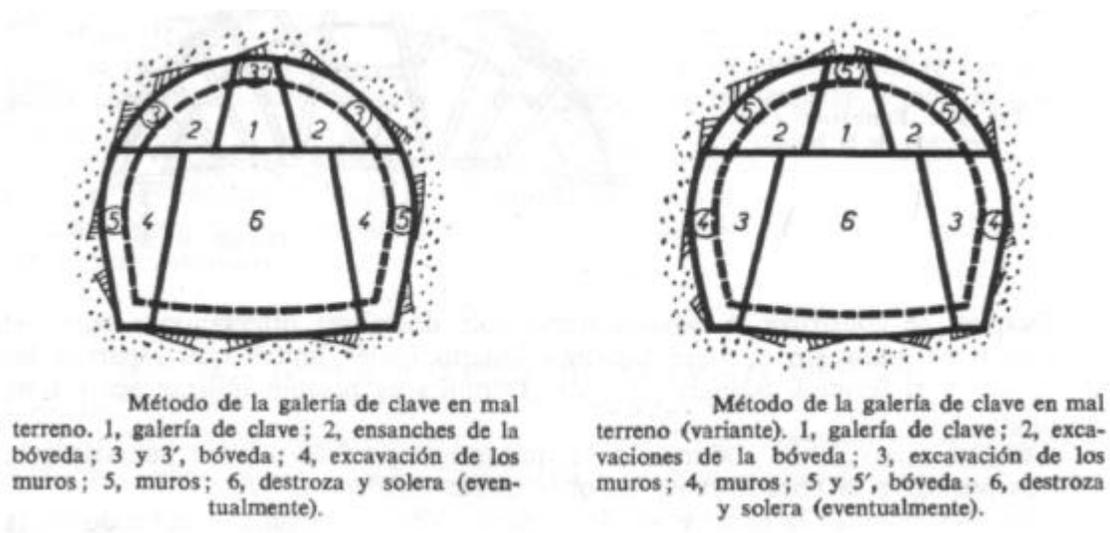
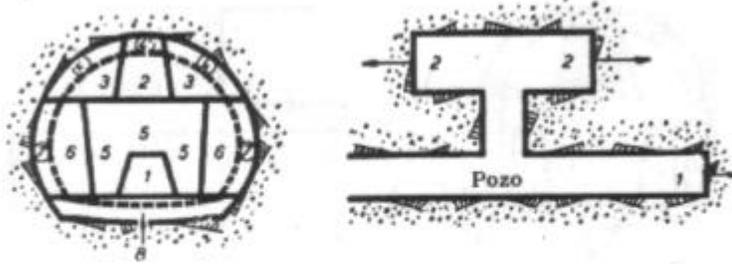


Fig. 3.03 Variantes para el método belga

3.2.3.- Método de las dos galerías o método austriaco.

Este método se caracteriza por el empleo de una galería de avance en el eje y base del túnel, donde se instala una vía de evacuación que se utiliza durante toda la obra.



Método de las dos galerías.

1, galería de base; 2, galería de coronación; 3, excavación de la bóveda; 4 y 4', bóveda; 5, destroza; 6, excavación de los muros; 7, muros; 8, solera (eventualmente).

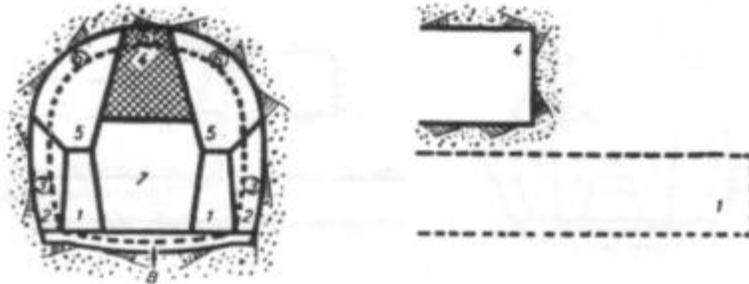
Fig. 3.04 Método Austriaco

Cuando la galería ha avanzado cierta longitud se perfora un pozo hacia arriba y se excava en los dos sentidos una segunda galería. Una vez perforada la galería superior se sigue como en el método belga. Tiene la ventaja de que el transvase de los escombros a la galería inferior se hace por los pozos y sin modificaciones desde su situación original. También, que los múltiples frentes de ataque aceleran la construcción del túnel.

3.2.4.- Método de las tres galerías o método alemán.

Se caracteriza por la conservación de la destroza hasta la finalización del sostenimiento de la bóveda y los hastiales. Se utiliza en secciones superiores a los 50 m².

Se excavan dos galerías en la base y a derecha e izquierda del eje; se ensanchan y se construyen los hastiales. Más atrás se ataca una galería de coronación que a continuación se ensancha hasta construir la bóveda que descansará sobre los hastiales. Por último se excava la destroza, y si es necesario se excava y se reviste la solera.



Método de las tres galerías.

1, galerías de base; 2, ensanches de los muros; 3, muros; 4, galería de clave; 5, excavación de la bóveda; 6 y 6', bóveda; 7, destroza; 8, solera (eventualmente).

Fig. 3.05 Método Alemán

El método alemán es costoso por sus tres galerías, pero seguro en mal terreno.

Ya, a modo de conclusión, cabría comentar que el método belga es muy utilizado en túneles cortos en los que la evacuación de los escombros no es un problema importante; donde sí constituye un problema importante es en los largos túneles de montaña, por lo que se prefiere utilizar el método austriaco, como en los túneles de ferrocarril de Mont Cenis, Arlberg, Simplón y Lötschberg; sin embargo, el de San Gotardo se construyó con el método belga con las dificultades ya comentadas. En túneles con menores secciones el más utilizado es el inglés y en terrenos de baja calidad el austriaco.

3.3.- Operaciones básicas en la construcción.

En cualquier sistema de construcción de un túnel se puede hablar de cuatro operaciones básicas: el arranque, la carga, el transporte y el sostenimiento (o revestimiento).

En las secciones pequeñas, de 3 a 15 m², el espacio disponible es escaso y el trabajo debe obligatoriamente ser repetitivo. Este ciclo se convierte en crítico ya que una vez seleccionado el sistema de construcción es muy difícil modificarlo si surgen imprevistos.

En secciones medianas, de 15 a 50 m², es factible modificar parcialmente el ciclo en caso de una mala elección del sistema.

En las secciones grandes, mayores de 50 m², la dependencia crítica es menor aunque dado el gran tamaño de los equipos que se emplean o por cautela ante los problemas de sostenimiento, se decide la construcción en varias fases, lo cual lleva a la problemática de las secciones medias.

3.3.1.- El arranque.

La excavación se puede realizar por tres métodos que son: manual, con explosivos y mecanizado.

3.3.1.1.- Método manual.

Se realiza mediante herramientas neumáticas, de potencia ligera o media según las necesidades, que van provistas de picas o paletas según sea la dureza del terreno. Con ellas se rompe el frente o se perfila, como complemento a otros sistemas. En la actualidad sólo se utiliza como único método en secciones de túneles muy pequeñas (3 o 4 m²).

3.3.1.2.- Método con explosivos.

En la actualidad el arranque con explosivos es el método que se utiliza más frecuentemente cuando el terreno es roca, ya que se adapta a cualquier tipo de dureza (roca blanda, media o dura).

La excavación utilizando la perforación y los explosivos produce inevitablemente una operación cíclica y no continua que consta de los siguientes pasos:

- Perforación del frente, siguiendo un patrón y con la profundidad adecuada para el avance previsto en la voladura (plan de voladura o tiro).
- Retirada del equipo perforador.
- Carga del explosivo y retirada del personal.
- Detonación de las cargas.
- Ventilación para eliminar humo, polvo y vapores
- Desprender la roca suelta.
- Realización de la entibación provisional si es necesario.

En secciones grandes, como ya se ha comentado, el avance del túnel se establece al menos en dos fases: en primer lugar la semisección superior, también llamada avance en bóveda o calota, y en segundo la semisección inferior o destroza. Si las dos fases se excavan con explosivos el ciclo se complica aún más, pero normalmente esta segunda fase se excava con maquinaria convencional, si la dureza de la roca lo permite. Este tipo de maquinaria se describirá más adelante en los métodos de excavación mecánica.

Para la perforación del frente se utilizan perforadoras neumáticas que operan con aire a presión y que pueden ser de percusión, de rotación o combinación de ambas; las hay manuales y otras que son máquinas pesadas montadas sobre jumbos (grúas móviles de caballete).

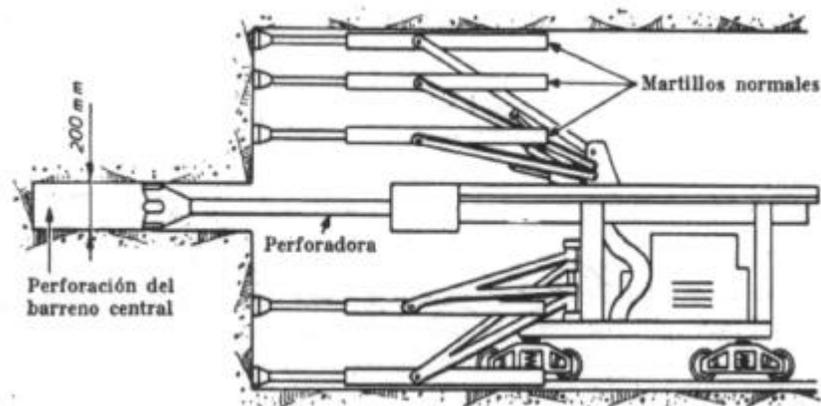


Fig. 3.06 Perforadora Ingersoll

En el método con explosivos es importante el llamado plan de voladura. En la figura 3.07 el punto negro representa el taladro cargado de explosivo y la numeración indica el orden en el que se hace explotar a cada uno de ellos, lo que se consigue con detonadores retardados que se activan eléctricamente (microretardos)

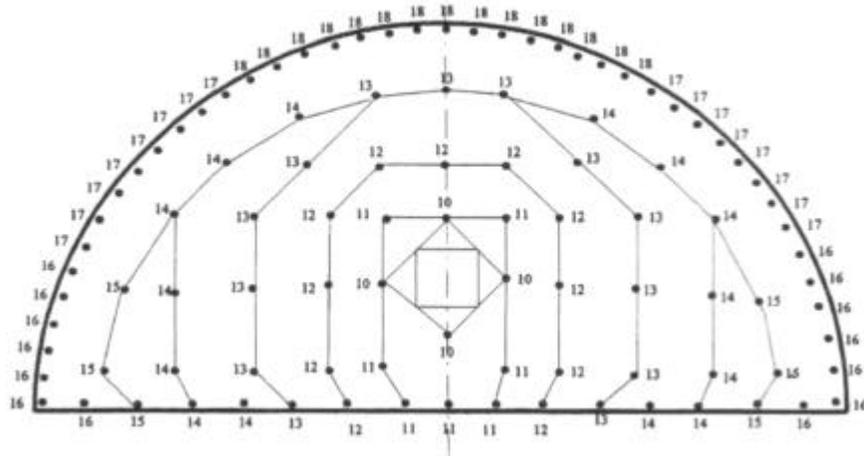


Fig. 3.07 Esquema del plan de voladura

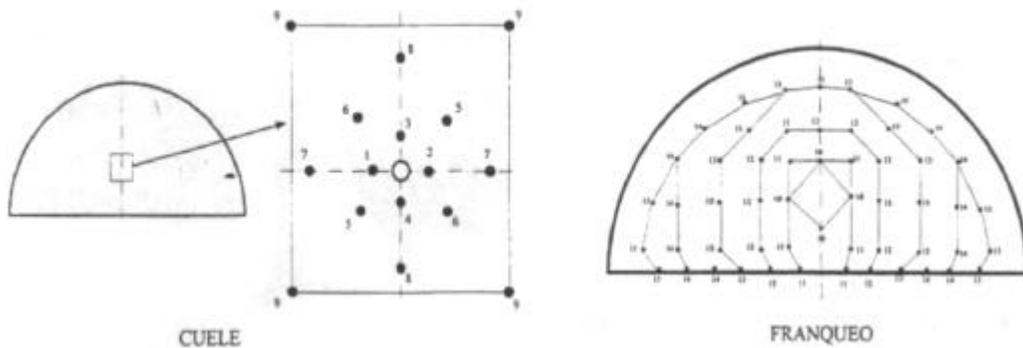


Fig. 3.08 Detalle del plan de voladura

Según el esquema, en el plan de voladura se distinguen las siguientes partes esenciales:

- El cuele que está situado en la parte central del esquema de tiro (ver ampliación) y es la parte que primero sale en la voladura, con objeto de facilitar la salida al resto de la pega (volumen total que se pretende derribar con una voladura). En el cuele cabe destacar el taladro central, de mayor diámetro, que no se carga con explosivo y cuyo objeto es dar escape al cuele.
- El franqueo sale inmediatamente después del cuele y es el que rompe el mayor volumen de roca.
- Las zapateras son los barrenos situados en la parte central y en los extremos de la línea más baja de la sección (puntos 11 y 16).

- El recorte, es la última fase de la pega y tiene por objeto, como la propia palabra indica, recortar el terreno circundante. Esta última fase adquiere hoy en día una mayor importancia debido a la utilización del Nuevo Método Austriaco (NMA), que se explica en el apartado 3.4, por lo que hay que cuidar mucho el no dañar la roca durante la voladura, pues dicho método se basa en la propia autoresistencia del terreno.

La situación y profundidad de los taladros que se quieran efectuar está claramente acotada en el plan de tiro, de manera que, una vez marcado en el frente al menos un punto de referencia tanto altimétrica como planimétrica por el técnico topógrafo, el encargado del tajo marque mediante una plantilla dichos puntos para que sean taladrados y posteriormente cargados. Una vez efectuada la voladura, el técnico responsable de la topografía deberá comprobar la situación real del nuevo frente de excavación resultante de la voladura.

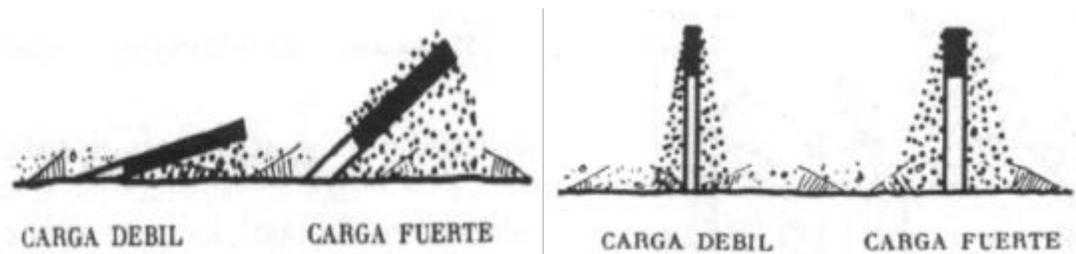


Fig. 3.09 Tipos de barrenado

3.3.1.3.- Métodos mecanizados.

Distinguiremos los métodos en los que se utiliza la maquinaria convencional, las tuneladoras y las rozadoras.

a) Con máquinas convencionales

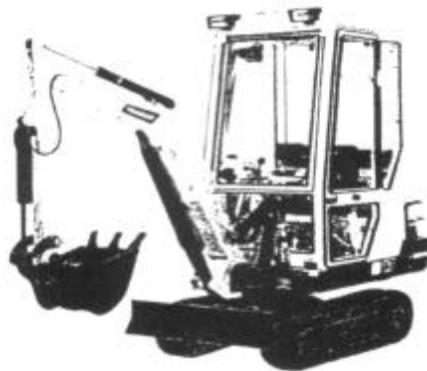


Fig. 3.10 *Miniexcavadora*

En terrenos de roca media o blanda, y en secciones medias y grandes, un método mecanizado es el convencional con tractores (bulldozer) dotados de ripper, y para terrenos de mayor dureza, palas cargadoras. Existen también versiones de estas máquinas, de gálibo mínimo o brazos cortos, que solucionan los problemas de espacio.

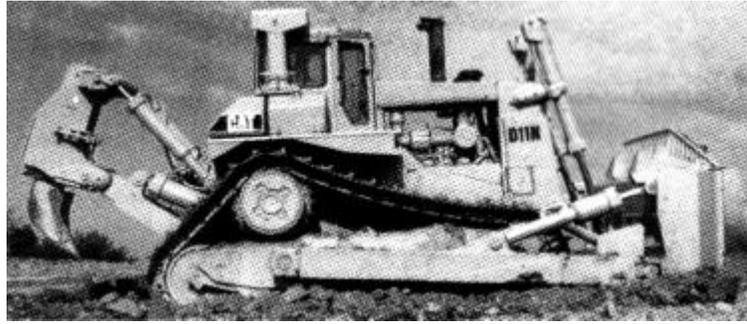


Fig. 3.11 Bulldozer con ripper

b) Con tuneladoras

Podemos definir la tuneladoras como máquinas que realizan la excavación a plena sección mediante la acción directa y continuada de útiles o herramientas de corte.

Este tipo de máquinas llevan integrado desde el primer momento el revestimiento al proceso constructivo, mediante la colocación sistemática del mismo detrás de la máquina. Se dividen en dos tipos:

b.1) Máquinas topo (TBM, Tunnel Boring Machine)

Se utilizan para excavaciones en roca de dureza baja, media o alta. Podemos decir que excavan el frente de roca a plena sección mediante la acción combinada de la rotación y el empuje continuados de una cabeza provista de herramientas de corte convenientemente distribuidas en su superficie frontal. El dispositivo de empuje acciona contra el frente y reacciona contra unos codales extensibles o grippers.

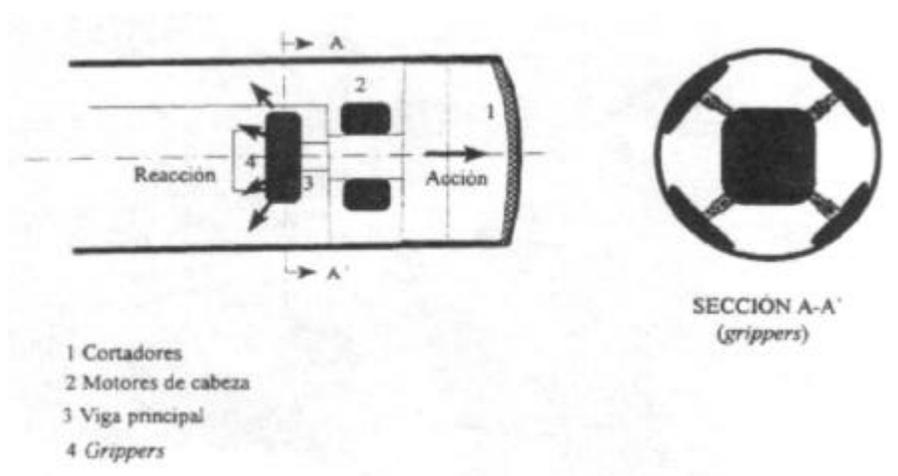


Fig. 3.12 Esquema de un topo

Los útiles de corte van montados en la cabeza que gira y empuja contra la roca y que desmenuza el material en fragmentos. Estos son cargados en el frente mediante unos cangilones y depositados en la parte trasera de la cabeza sobre una cinta transportadora que lo transfiere a otro sistema de transporte que lo extrae al exterior.

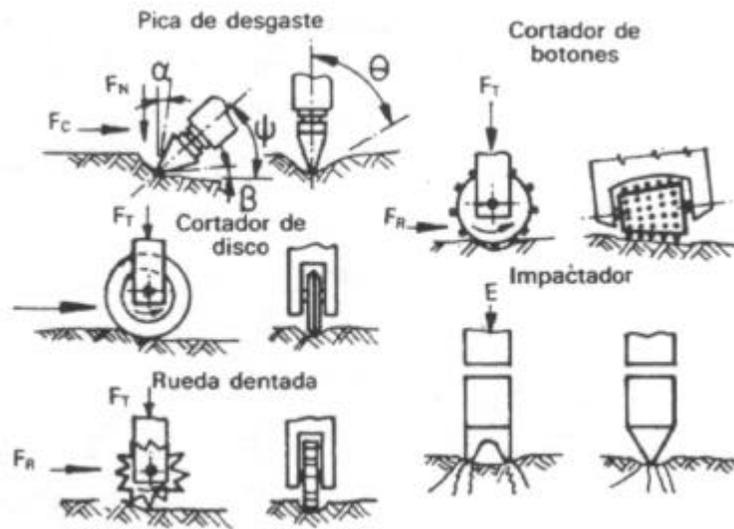


Fig. 3.13 Tipos de cortadores

La tecnología actual permite fabricar topos desde 2,5 m de diámetro hasta 12 m, también se fabrican topos dúplex formados por uno piloto de 3 a 4 m de diámetro combinado con una cabeza ensanchadora de hasta 12 m. Son muy útiles en galerías de pendiente muy inclinada en las que la excavación se realiza de abajo hacia arriba con el topo piloto, para posteriormente ser ensanchada en la dirección contraria.

Un topo puede llevar bulonadoras o empernadoras que trabajan según se avanza, o mecanismos para colocar cerchas metálicas. También se puede preparar para el revestimiento con dovelas prefabricadas de hormigón en el caso de que se esperen grandes deformaciones de la roca.

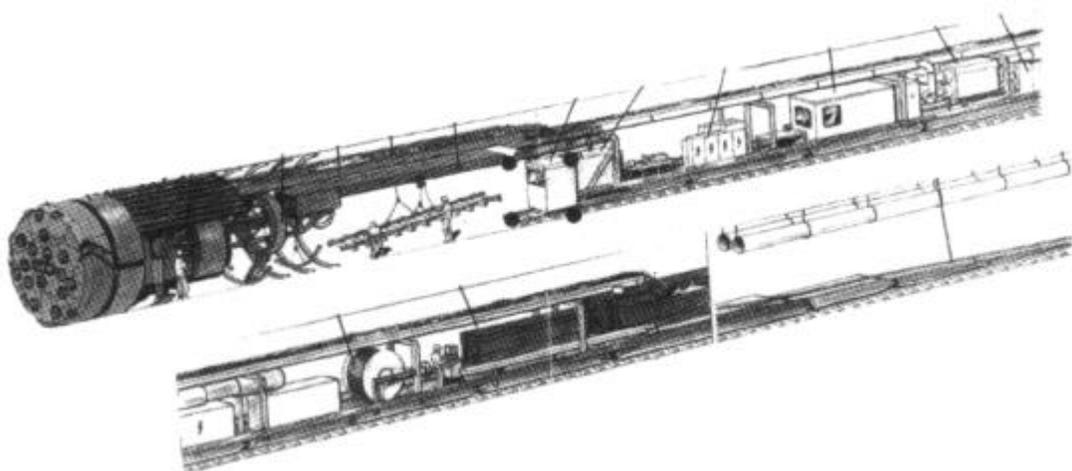


Fig. 3.14 Máquina topo

El rendimiento del avance con topo suele estar entre 1,5 y 2,5 m/h. Sin embargo una de las desventajas mayores que presenta respecto a otros métodos es la falta de flexibilidad cuando se producen incidencias por accidentes geológicos o por fuertes aportaciones de agua, debido a la longitud importante de toda la estructura que le acompaña (hasta 300 m). Esta longitud es la que limita el radio de las curvas, que no conviene que sean menores de 100 m.



Fig. 3.15 TBM usada en el Canal de la Mancha

En cuanto a pendientes, un topo puede trabajar en condiciones óptimas no sólo con las pendientes usuales para el transporte sobre vía (el más usual, con pendiente media del 3% y hasta del 7% en rampas cortas) sino bastantes superiores, llegando hasta el 15 y el 20%.

b.2) Los escudos

Se utilizan para la excavación de roca con dureza muy blanda y suelos. Como su propio nombre sugiere, un escudo es una estructura rígida y resistente que, introducida dentro del túnel, proporciona, un área estable y segura en la zona del frente de trabajo, protegiendo a éste contra el colapso en la bóveda y los hastiales e incluso contra el colapso del propio frente de excavación.

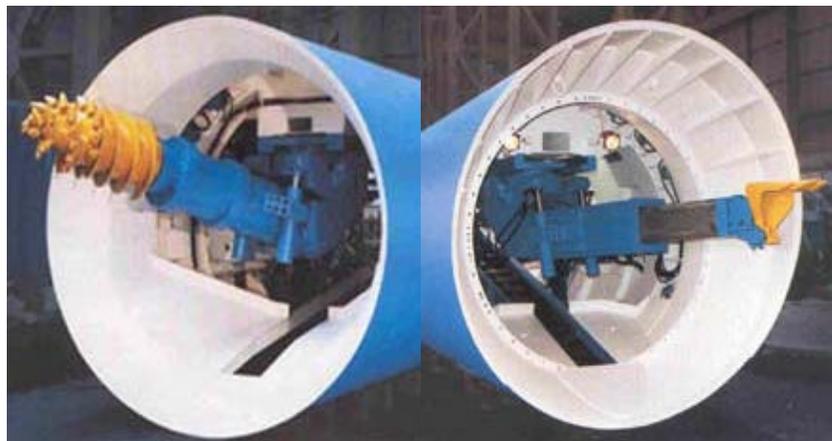


Fig. 3.16 Escudos con rozadora y con excavadora

Este concepto se ha ido transformando a lo largo de los años en un nuevo concepto y diseño de escudo-máquina que realiza también la excavación mecánica del terreno.

Al ser el terreno en el que se mueven inestable, el sostenimiento se va colocando en el propio frente y son, sin excepción, prefabricados y formados generalmente por dovelas de hormigón.

Los escudos consiguen el empuje longitudinal mediante reacciones contra el último anillo del revestimiento, por medio de gatos hidráulicos situados alrededor de la periferia de la parte trasera.

Cada gato hidráulico puede funcionar independientemente o en grupo, lo que permite hacer correcciones a la alineación de avance si es necesario. Están contruidos de modo que sean capaces de hacer avanzar el escudo una distancia igual al ancho de los anillos del revestimiento.

Una vez completada esta parte del ciclo se coloca el revestimiento en la zona que ha quedado libre detrás de la cola del escudo.

A los escudos se les puede acoplar distintos sistemas o útiles de excavación según el tipo de terreno (brazo excavador con cuchara, con martillo, cabeza giratoria circular, rozadoras, cuchillas), e incluso permiten la excavación manual en secciones de pequeño diámetro.

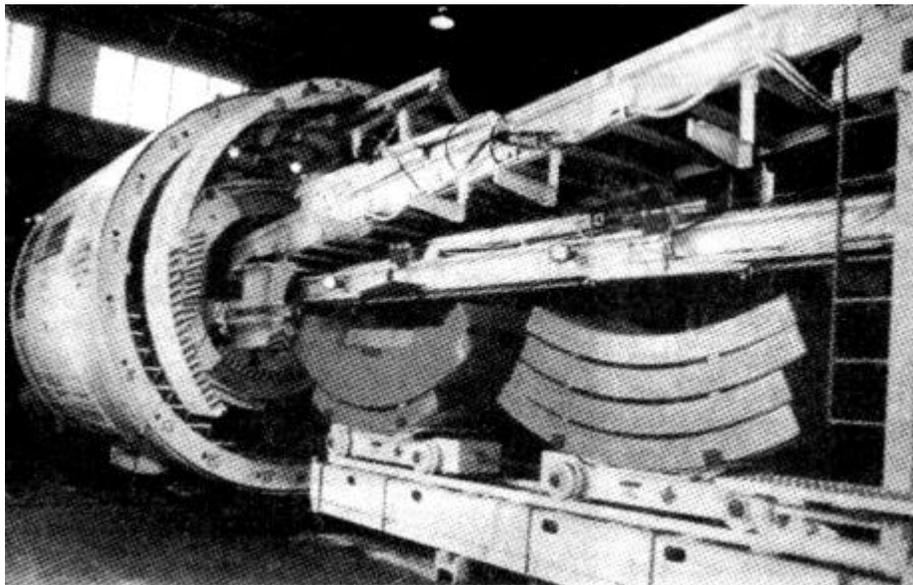


Fig. 3.17 Escudo con las piezas de un anillo de revestimiento

Las limitaciones de pendiente vienen impuestas por el sistema de transporte del escombros elegido, siendo válido lo dicho anteriormente para los topes.

En cuanto a las curvas, los escudos con longitudes similares a las de la estructura que les acompaña, son más problemáticos que los topes, pues los radios muy cortos obligan a un diseño sofisticado de dovelas. Como criterio general puede decirse que un escudo de determinado radio puede admitir radios del trazado iguales o menores a 80 veces el suyo propio.

Y por último cabe señalar el equipo de desescombrado. Los escombros son arrastrados por una cinta transportadora a la parte trasera del escudo, donde son cargados en el sistema de evacuación que los extrae al exterior y que suele ser un tren de vagones sobre carriles, ya que al ser el revestimiento de dovelas es fácil fijar a ellas una vía pesada para el uso de vagones de gran capacidad.

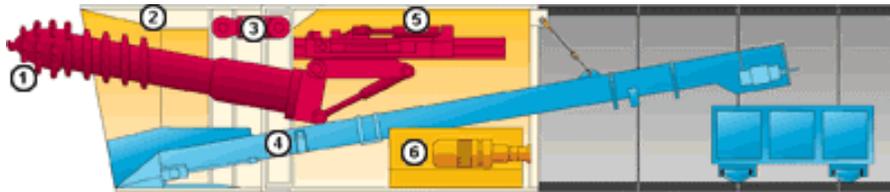


Fig. 3.18 Esquema de un escudo con rozadora

- | | |
|------------------------|--------------------------|
| 1. Rozadora. | 4. Cinta transportadora. |
| 2. Escudo. | 5. Tubo de la máquina. |
| 3. Cilindros de mando. | 6. Grupo hidráulico. |

c) Con rozadoras

Una rozadora es una máquina excavadora provista de un brazo articulado en cuyo extremo va montado un cabezal rotatorio que dispone de herramientas de corte de metal duro llamadas picas.

Estas máquinas, denominadas de ataque puntual, producen la desagregación de la roca con las picas que van situadas en la cabeza rotativa, que se mantiene presionada contra el frente con toda la potencia del motor de corte, actuando como fuerza de reacción el propio peso de la máquina.

Existen dos sistemas distintos de corte, el llamado de ataque frontal (Ripping) y el de ataque lateral (Milling). En el primero el cabezal de corte gira perpendicularmente al brazo soporte, por lo que la fuerza del corte se aplica principalmente de un modo frontal permitiendo atacar rocas de dureza alta.

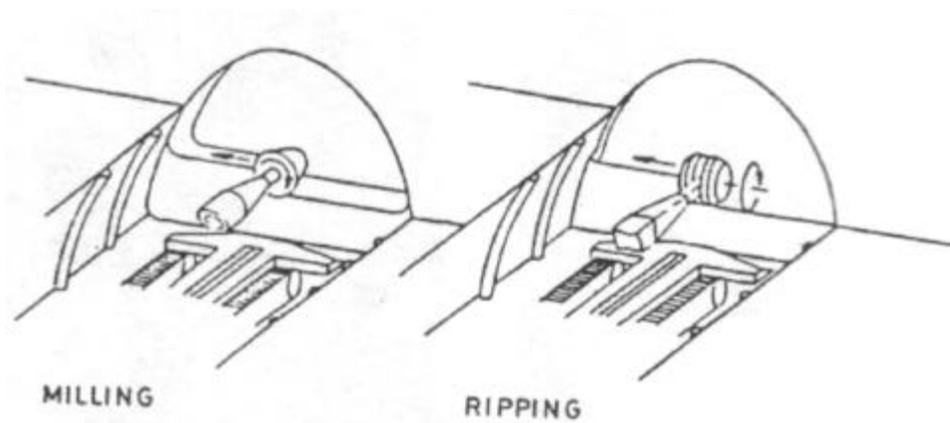


Fig. 3.19 Sistemas de corte de rozadoras

En el ataque lateral el cabezal es cilíndrico o tronco-cónico y gira en línea con el eje del brazo soporte, por lo que la fuerza de corte se aplica lateralmente, no aprovechándose todo el peso de la máquina como fuerza de reacción; sin embargo, para la minería tiene la ventaja de poder extraer el mineral en vetas estrechas sin afectar a la roca encajante, ya que el cabezal de corte tiene dimensiones más reducidas. No hay que olvidar que el desarrollo de estas máquinas proviene de la minería.

Las rozadoras disponen de distintos sistemas de recogida de escombros que, complementados con la utilización de pequeñas cargadoras, los traslada a la parte trasera de la máquina para ser cargados y extraídos al exterior, normalmente por maquinaria sobre neumáticos (palas cargadoras y camiones).

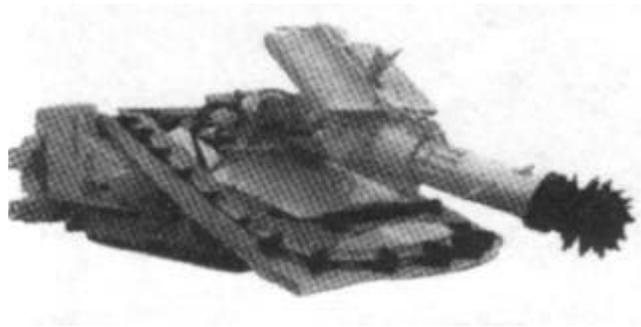


Fig. 3.20 Rozadora (Milling), carga de escombros de carrusel con paleta

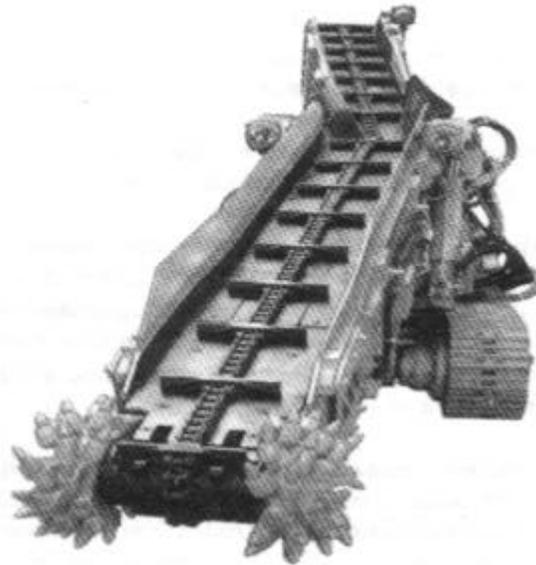


Fig. 3.21 Rozadora (Ripping) con brazo rozador y recolector

En relación con las condiciones anormales del terreno, las rozadoras presentan indudables ventajas frente a otros sistemas mecanizados, por su gran movilidad. Tanto si la máquina se ve rebasada por una excesiva dureza de la roca, que obliga al empleo de explosivos, como si aparecen rocas muy blandas, que recomiendan el empleo transitorio de excavadoras o métodos manuales, las rozadoras permiten dar paso inmediato a estos sistemas. También se adaptan fácilmente a cualquier tipo de sostenimiento.

3.3.2.- La carga.

En secciones pequeñas, las palas de volteo de accionamiento neumático, sobre vía o sobre rueda, fueron los equipos aplicados inicialmente a los túneles de pequeña sección y, por supuesto, siguen empleándose. Hay versiones eléctricas que siguen el mismo principio, combinadas con grupos hidráulicos para el volteo de cuchara. La carga se hace por descarga del cucharón sobre el vehículo, en general vagones metálicos sobre vía.

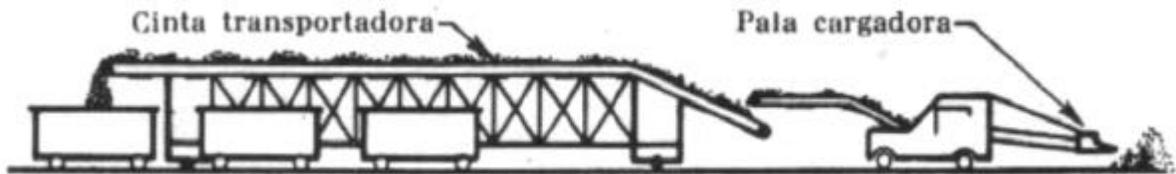


Fig. 3.22 Esquema pala-cinta

Las palas de volteo se fabrican en gamas desde los 150 litros de capacidad de cuchara, adecuadas para secciones pequeñas, hasta los 700 litros, para secciones medias.

Otro equipo de carga lo forman los cargadores de racletas, que penetran en la parte inferior del montón de escombros y lo van recogiendo por medio de dos o más paletas conduciéndolo hacia una cinta transportadora que lo eleva a la altura conveniente para el llenado del vehículo.

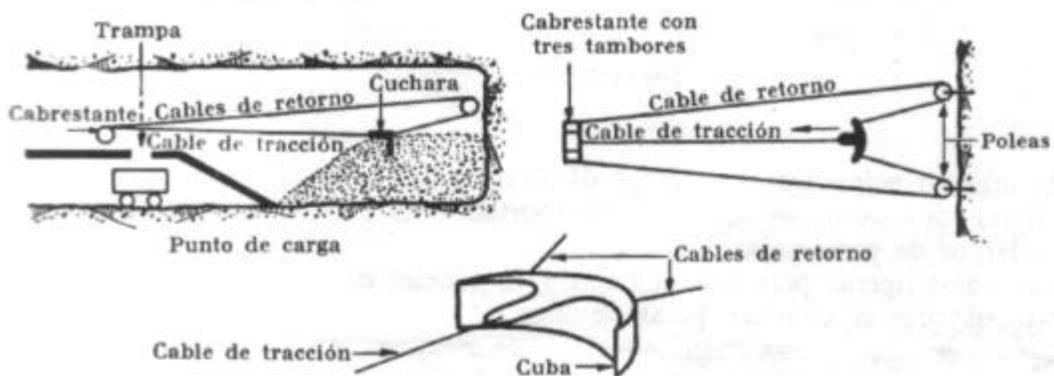


Fig. 3.23 Racleta o trailla

Sin embargo en casos extremos de sección mínima o en fases de sección mínima, no hay más remedio que cargar manualmente el escombros, si bien suele hacerse sobre cimbras que lo elevan al nivel conveniente.

En secciones grandes la carga de escombros se suele hacer con equipos totalmente convencionales, como ya se ha indicado al hablar del arranque.

3.3.3.- El transporte.

3.3.3.1.- Palas rápidas.

Desde hace alrededor de 25 años vienen utilizándose con éxito palas cargadoras de estricto gálibo y alta velocidad de desplazamiento que efectúan la carga y el transporte conjuntamente, con capacidades de cuchara de 6 hasta 11 m³ y velocidades de hasta 50 km/h.

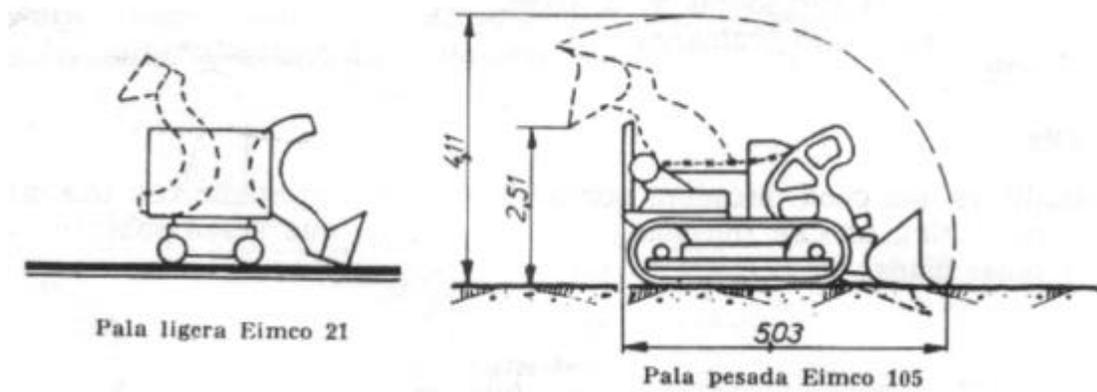


Fig. 3.24 *Palas Eimco*

En lo que a rentabilidad se refiere, las palas rápidas pueden ser la solución ideal para túneles de hasta 600 o 700 m de longitud. Si la sección es grande y pueden cruzarse dos palas en pleno recorrido, son rentables para longitudes de 1.200 a 1500 m.

3.3.3.2.- Transporte sobre vía.

Es una alternativa que se puede considerar en secciones pequeñas y medias. La tracción puede ser de gasóleo o eléctrica, en función de los requerimientos de ventilación.

Las pendientes no deben rebasar el 3% ascendente pero están permitidas las rampas de hasta el 7% si son cortas.

Las operaciones de carga y transporte tienen una gran influencia en el ciclo total de la excavación del túnel (en el caso de adoptar la excavación con explosivos estas operaciones representan como mínimo el 50% del ciclo). Es por ello que adquiere gran importancia una buena conservación de la vía y una adecuada elección del sistema de cambio de vagones (vacíos-cargados) en el frente.

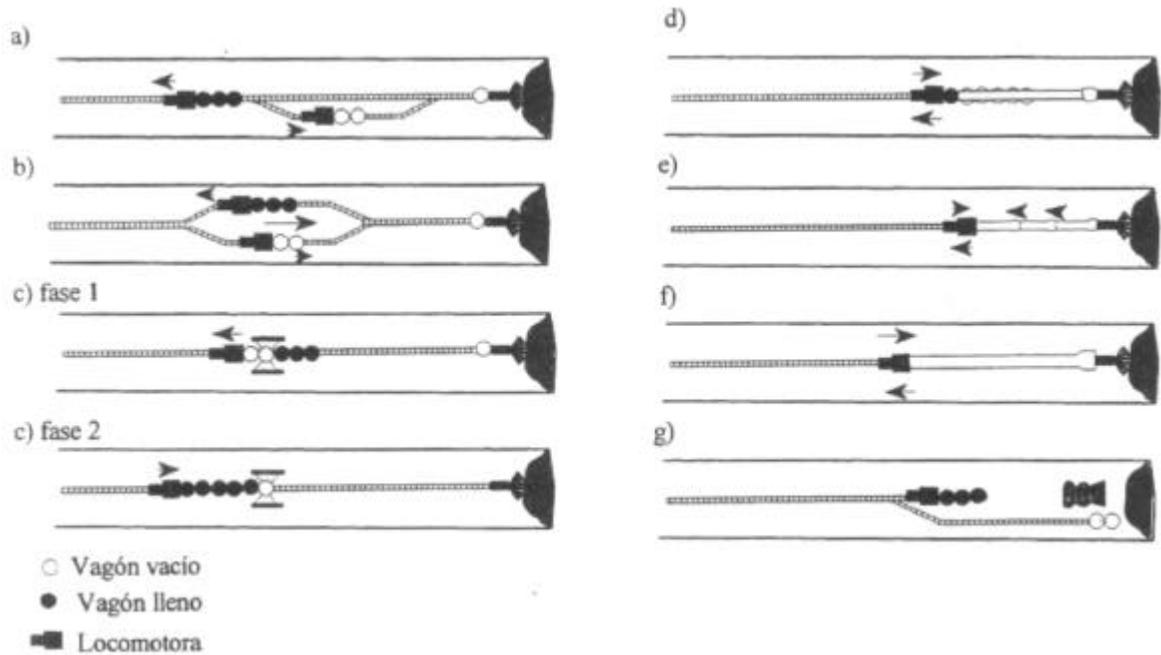


Fig. 3.25 Soluciones para el cambio de vagones

Según la figura 3.25, se puede hablar de siete variantes para el cambio de vagones:

- a) Se dispone un apartadero fijo lo más próximo al frente.
- b) Es el llamado cambio californiano que dispone de dispositivos hidráulicos para adelantarlo según progresa el frente.
- c) Proviene de la minería y se trata de un elevador de vagones vacíos, que permite el acceso de éstos a la zona de carga. Su limitación es la falta de gálibo en secciones pequeñas.
- d) Una cinta elevada bajo la cual se sitúa el tren de vagones vacíos. Es la solución más frecuentemente adoptada cuando el arranque se hace con tuneladoras.
- e) y f) Vagones autocargables que transvasan el escombro de uno a otro, o bien, monovagones de gran longitud y fondo móvil; son soluciones útiles para secciones pequeñas.
- g) El transporte se realiza en vagones pero la carga se hace con palas cargadoras de vuelco lateral.

3.3.3.3.- Transporte sobre caminos.

Se utilizan vehículos pesados tipo dumper que unen a la rapidez de descarga por basculado una gran maniobrabilidad. Existe una gran gama que se adaptan a las limitaciones de sección y a las características de la cargadora adoptada.



Fig. 3.26 *Dumper autocargante*



Fig. 3.27 *Dumper y pala excavadora (al fondo)*

3.3.4.- Revestimiento.

3.3.4.1.- Bulones.

El bulonado o empernado hoy en día está universalmente aceptado como método de sostenimiento provisional o definitivo.

Los bulones utilizados normalmente son barras de acero de 25 a 32 mm. de diámetro y de 3 a 4 m. de longitud y tienen como misión unir los estratos alrededor de la sección excavada para formar una bóveda natural. Los bulones quedan anclados por adherencia del mortero o resina que se introduce en el fondo y a lo largo del taladro. El extremo que queda en el exterior del taladro dispone de rosca para tuerca y arandela plana que se ajusta contra la superficie de la roca.

También existen en el mercado variantes para el bulonado provisional, como por ejemplo los bulones de agua, tubos metálicos cuyas paredes se deforman contra las del taladro al inyectar agua a presión. Este sistema permite una actuación muy rápida en terrenos inestables, o bien en un bulonado previo si hay agua que dificulta el fraguado de morteros o resinas. También como bulonado provisional en frentes inestables, existen los bulones de fibra, que en general se fabrican con materiales plásticos fibrosos que logran un simple armado o cosido compatible con la posterior excavación del macizo.

3.3.4.2.- Cerchas.

La entibación con madera pasó de la minería a la construcción civil y, de la misma forma, los arcos o cerchas metálicas empleadas hoy en día en ingeniería civil fueron aplicados antes en la minería.

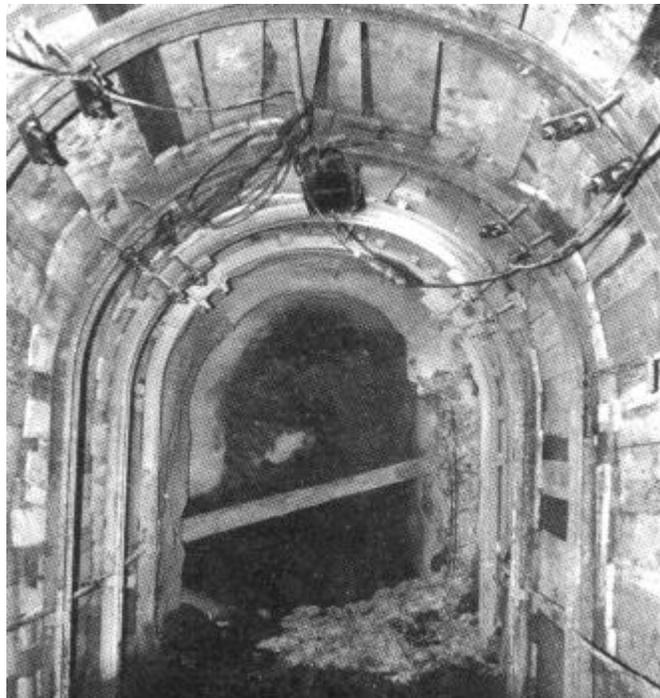


Fig. 3.28 *Cerchas con tablonas en el sostenimiento provisional de una galería de avance*

Son viguetas de acero con sección en H y curvadas a la sección transversal del proyecto del túnel, de manera que normalmente con tres cerchas, dos en los hastiales (pies de

marco) y una en la bóveda (corona), se puede cubrir la sección completa. Si hay roca poco compacta o suelta entre dos secciones con cerchas se pueden añadir tablonés (si es temporal) o planchas de acero entre éstas.

3.3.4.3.- Hormigón proyectado.

El hormigón proyectado se ha convertido en una técnica que cada vez se utiliza más para el sostenimiento del terreno, solo o en combinación con bulones, cerchas o con refuerzo de malla de acero.

Antes que el hormigón proyectado, se empezó a emplear el mortero (arena + cemento + agua) proyectado, para crear un anillo protector de la roca en las formaciones susceptibles de meteorización rápida. Fue a finales de los 50 cuando se empezó a utilizar hormigón proyectado, es decir, mezcla con áridos de hasta 16 o 18 mm., con la consiguiente problemática de los aditivos para la aceleración del fraguado.

El árido, el cemento y el agua se mezclan por distintos procedimientos. Esta mezcla llega por una gruesa manguera hasta la pistola que, manejada por el operador, dispara fuertemente contra la roca limpia. La mezcla se introduce en las grietas y fisuras y forma sobre la superficie de la roca una capa fuertemente adherida. Con el hormigón proyectado se pueden obtener con rapidez espesores de 10 a 15 cm., resolviendo no sólo los problemas de meteorización sino evitando los desprendimientos en zonas muy fracturadas.



Fig. 3.29 *Sostenimiento mixto (cerchas, mallas y hormigón proyectado)*

3.3.4.4.- Preanillos de hormigón.

a) Preanillos sobre chapa desplegada (método Bernold):

Se conoce también como método Bernold, puesto que fue ésta la marca suiza que desarrolló las chapas desplegadas o acuchilladas. La idea es hormigonar sobre un encofrado formado por cerchas metálicas y placas acuchilladas que quedan incorporadas al hormigón y que cumplen una triple función, de protección contra la caída de piedras sueltas, como encofrado y como armadura del hormigón de relleno.

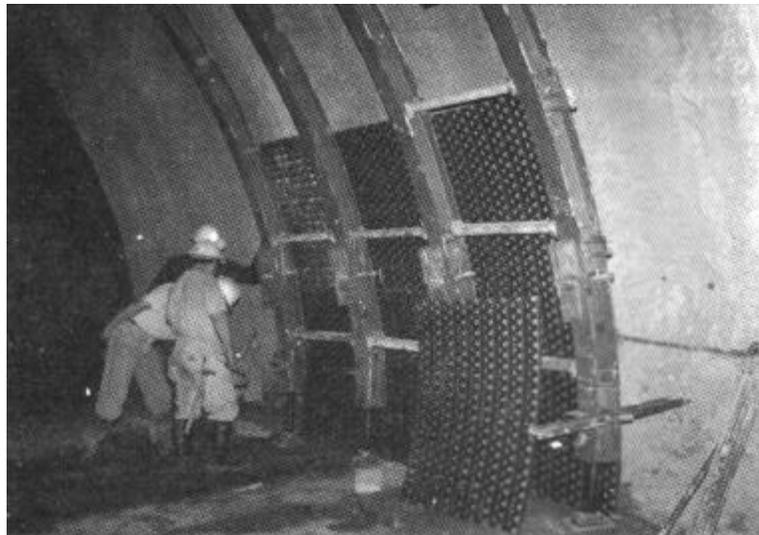


Fig. 3.30 *Método Bernold antes del hormigonado definitivo*

b) Preserrado de la roca:

Con el preserrado se construye un preanillo, como sostenimiento provisional, encofrado por el propio terreno y hormigonado por proyecciones. Consiste en cortar, con sierras mecánicas de cadena, similares a las empleadas en trabajos forestales, un anillo de un espesor entre 15 y 20 cm. y una anchura alrededor de los 50 cm. Si en vez del anillo completo se actúa con dovelas sucesivas, en terrenos inestables el tiempo en que el hueco está abierto es mínimo.

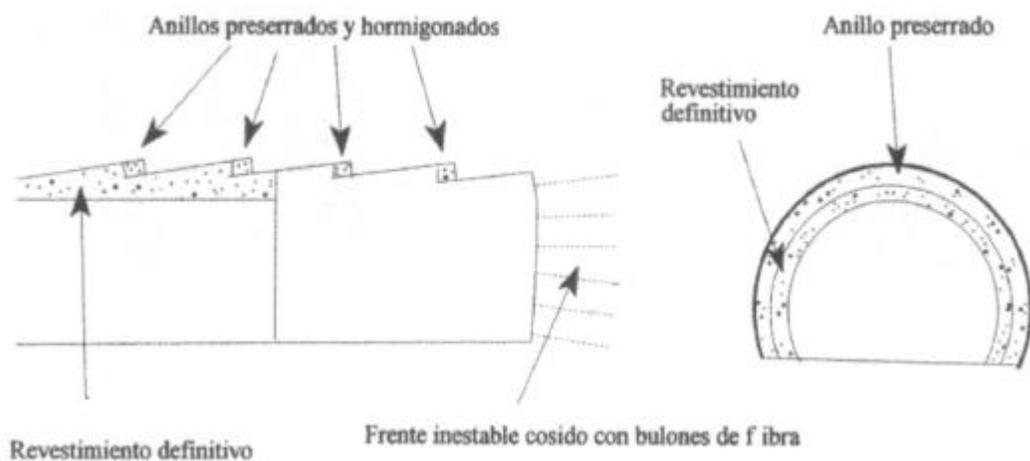


Fig. 3.31 *Preserrado en rocas blandas*

Este método se usa también para rocas duras que han de tratarse con explosivos, como una técnica más para resolver los casos en que las limitaciones por vibraciones son muy estrictas.



Fig. 3.32 Preserrado en rocas duras (explosivos)

3.3.4.5.- Dovelas.

Son anillos circulares segmentados, normalmente de hormigón más o menos armado. Como revestimiento permanente tienen la ventaja de que inmediatamente después de que se han colocado proporcionan una fuerte estructura de soporte, siempre que la inyección de hormigón en el trasdós (entre el terreno y el anillo) se realice lo antes posible. Se fabrican distintos tipos de dovelas:

a) Dovelas ordinarias inyectadas

Son de hormigón medianamente armado que usan llaves sencillas para su unión. El trasdós debe inyectarse inmediatamente a su colocación.

b) Dovelas expandidas

Son dovelas de hormigón en masa o ligeramente armadas. Un erector las coloca sobre el anillo metálico de soporte, y con una dovela en forma de cuña se provoca la expansión o aumento del diámetro hasta el contacto total con el terreno. No precisa, por lo tanto, inyección en el trasdós.

c) Dovelas atornilladas

Son de hormigón fuertemente armado o de acero fundido; se atornillan entre sí y al anillo anteriormente colocado. La geometría que se logra es perfecta y la inyección en el trasdós se realiza en condiciones óptimas.

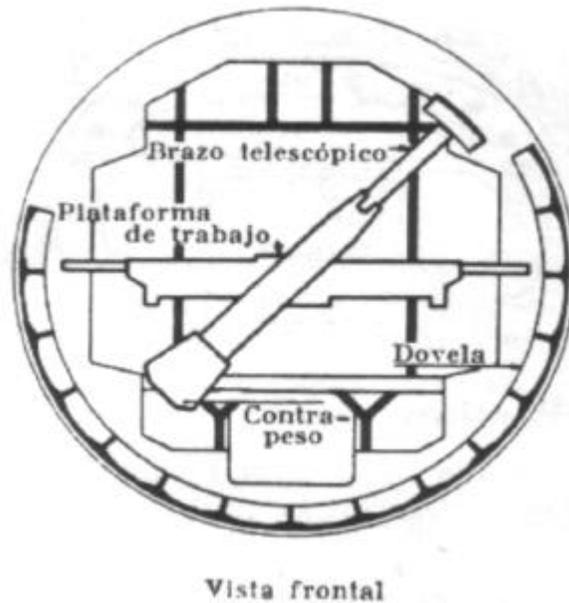


Fig. 3.33 Máquina para colocar dovelas

3.4.- El nuevo método austriaco (NMA).

Cuando se empezó a aplicar el método austriaco, se vio pronto que no sólo es un sistema sino una metodología de construcción que persigue un objetivo básico: la roca debe ser el propio elemento resistente, para lo cual hay que alterarla lo menos posible, y su capacidad debe ser mejorada mediante la utilización de elementos de sostenimiento con aplicaciones sucesivas en función de las deformaciones que se vayan observando durante la construcción.

El bulón trabaja unido al mortero, a la cercha o a ambos, como elementos de una estructura resistente añadida al anillo rocoso, para crearle o aumentarle una capacidad de autosostenimiento en función de una deformabilidad controlada.

Ideas fundamentales del NMA:

- Obligar al terreno a colaborar en su propia estabilidad, reduciendo al máximo la pérdida de sus características iniciales.

- Permitir una cierta deformación (convergencia) controlada, con objeto de disminuir las necesidades de sostenimiento.
- En terrenos con fuertes convergencias, la puesta en obra del sostenimiento debe ir orientada hacia la consecución de una rigidez progresiva.
- En túneles urbanos con poca cobertura en los que no se pueden tolerar convergencias que ocasionarían asentamientos en la superficie, la tecnología del NMA sigue siendo aplicable, pero buscando la máxima rigidez en el menor plazo posible.
- El NMA tiene la ventaja de su fácil adaptación a condiciones de terreno cambiantes o inciertas pues permite, si el terreno así lo aconseja, variar el sostenimiento sin mayores dificultades.
- Por lo que respecta a las fases de excavación suele atacarse en sección dividida (media sección superior y destroza), aunque en terrenos de baja calidad, con convergencias importantes, la distancia entre ambos frentes debe reducirse al máximo, buscando en el menor plazo posible una sección lo más cercana a la circular.

3.5.- Auscultación.

3.5.1.- Finalidad.

Es necesaria una auscultación para poder seguir la evolución en el tiempo de los fenómenos mecánicos que acompañan la construcción de un túnel.

El papel de la auscultación será necesario desde la fase de proyecto, por ejemplo efectuándola en la galería de reconocimiento, con lo que se podrá observar in situ el comportamiento del terreno y aplicar las conclusiones obtenidas a la definición del proyecto.

También durante los trabajos de construcción del túnel se requiere una auscultación continua con el fin de verificar la eficacia del sostenimiento utilizado, así como supervisar la influencia de los trabajos en el entorno, como son los asentamientos en superficie o la afectación a túneles o galerías vecinas.

Por último la auscultación debe permitir garantizar la seguridad de la obra en explotación realizando medidas periódicas durante toda la vida del túnel.

3.5.2.- Tipos de medidas.

3.5.2.1.- Medidas de convergencia.

La medida a la vez más simple y más representativa es la de la convergencia de una sección. Con ella se obtiene el desplazamiento relativo de dos puntos situados en las paredes del túnel.

Para ello se colocan inmediatamente después de la excavación, una serie de clavos en la sección transversal al eje longitudinal del túnel. Según la importancia del túnel los puntos de control de una sección transversal pueden ser tres o más. Habitualmente son uno en la clave, dos en los riñones y dos en los hastiales, se mide la variación de longitud entre puntos opuestos y se nivela el punto en clave para tener constancia del movimiento (vertical) absoluto de éste.

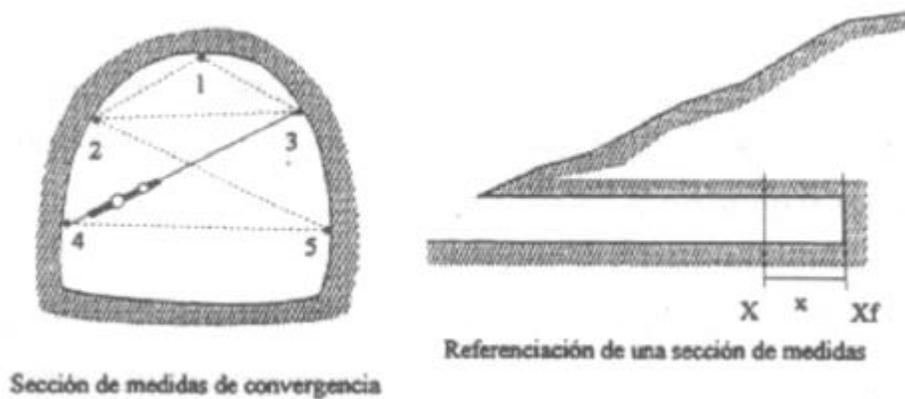


Fig. 3.34 *Medidas de convergencia*

Para la medida de longitudes se pueden utilizar aparatos, llamados extensómetros y que con ayuda de hilos invar mantenidos a presión constante por un dinamómetro consiguen precisiones de la décima de milímetro, precisiones utilizadas en la fase de construcción, y hasta de la milésima de milímetro para túneles en explotación. La cinta metálica milimetrada puede ser utilizada cuando la precisión exigida es menor. La nivelación del punto en clave será geométrica y de precisión.

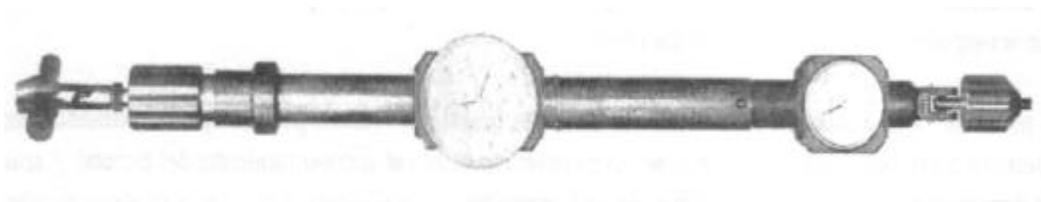


Fig. 3.35 *Extensómetro*

La distancia entre secciones de convergencia depende de la naturaleza y heterogeneidad del terreno: habitualmente se suelen disponer cada 20 o 30 m, aunque en tramos delicados esta distancia puede reducirse considerablemente. Será necesario conocer también la distancia al frente de excavación (x) en cada toma de medidas de convergencia.

El estudio detallado de la convergencia de la sección de un túnel se hace con la ayuda de tres gráficos:

- En el primero se representa la distancia al frente de excavación (x) en función del tiempo (t). La convergencia de una sección crece más rápidamente cuando el frente de excavación se aleja; por lo tanto es necesario hacer la medida de referencia lo más cerca posible del frente.
- El segundo y el tercero dan respectivamente las variaciones de la convergencia (c) en función del tiempo (t) y en función de la distancia x .
- En la fase inicial suelen efectuarse lecturas diarias que se van espaciando progresivamente en función de la evolución de la curva convergencia-tiempo.

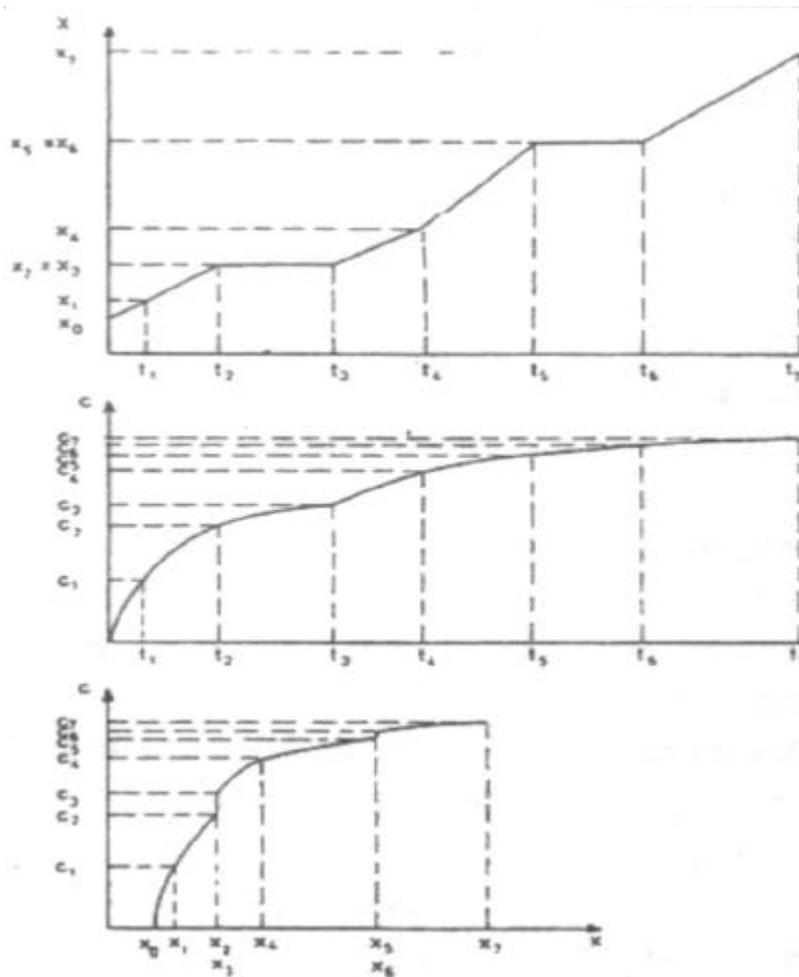


Fig. 3.36 Estudio de la convergencia

3.5.2.2.- Medida de desplazamientos absolutos.

La medida de convergencia de una sección puede ser útilmente completada por la medida de desplazamientos absolutos de puntos situados en el interior del macizo gracias a los extensómetros colocados en sondeos perpendiculares al eje de la obra.

De esta manera se realizan medidas de variación de distancias entre un punto situado en la pared de la excavación y otro “supuesto fijo” situado en el fondo de un taladro y suficientemente lejos del túnel para salir de su zona de influencia.

Es posible implantar en estos aparatos varios puntos anclados a distintas profundidades. De esta manera se puede obtener la ley de desplazamiento del macizo en función de la profundidad. Los extensómetros utilizados pueden ser hilos tensos o barras ancladas al fondo del taladro.

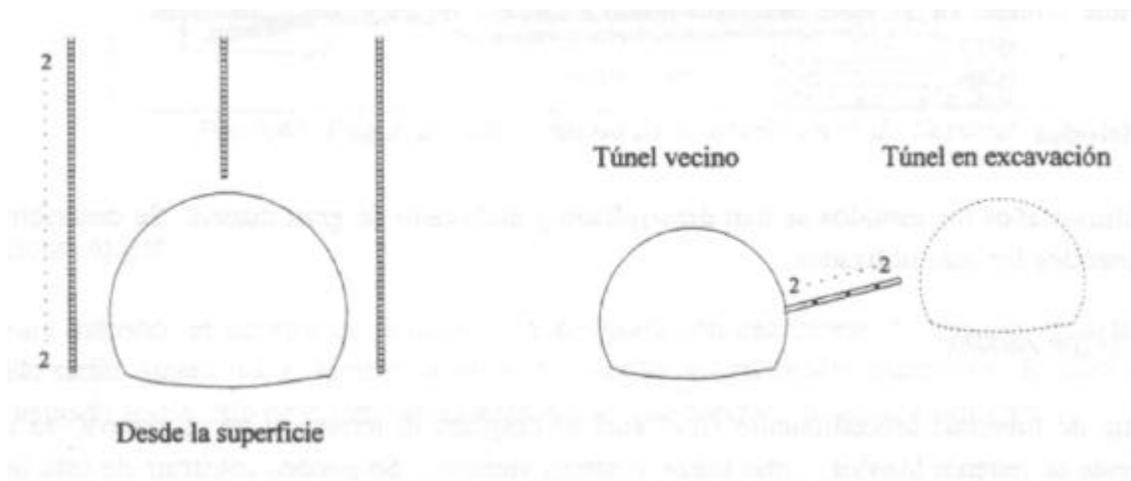


Fig. 3.37 Ejemplos de utilización de extensómetros en un taladro

En túneles urbanos o en zonas de poca cobertura, pueden ser muy útiles los extensómetros colocados desde la superficie, antes del paso del frente, con puntos de anclaje a distintas profundidades, combinados con una nivelación de precisión de secciones transversales en superficie.

También desde túneles vecinos se sitúan extensómetros y así se consigue, al igual que en el caso anterior, el desplazamiento absoluto a partir del estado virgen del terreno.

3.5.2.3.- Otras medidas.

- Medidas de la presión en el revestimiento: se consiguen mediante la colocación de células de presión total situadas entre el revestimiento y el terreno. La presión se transmite a un manómetro y se controla de esta manera la evolución de cada medida en función del tiempo.

- Medidas de la deformación del revestimiento: la deformación se puede controlar con las medidas de convergencia ya explicadas y también con algunos tipos de extensómetros colocados en el interior del revestimiento, teniendo de esta manera bases más cortas.
- Medida con inclinómetros: se mide el desplazamiento longitudinal y transversal al taladro donde se ha situado el inclinómetro. Estas medidas son utilizadas sobre todo en túneles de poca cobertura para determinar los efectos en la superficie.

3.6.- Las técnicas del microtúnel.

3.6.1.- Introducción.

Las técnicas del microtúnel están encaminadas a la perforación de túneles de diámetro pequeño (menor de 3 m) y de corta longitud (menor de 200 m), con el objeto de proporcionar un método no destructivo para la instalación de tuberías y conductos subterráneos en comparación con la apertura de zanjas (método Cut and Cover).



Fig. 3.38 *Diferentes técnicas del microtúnel*

El campo de utilización de esta técnica se extiende a la renovación y a la implantación de conducciones de todo tipo (agua, gas, electricidad, colectores, etc.). El método Cut and Cover, en ciudades de gran densidad demográfica, plantea problemas como consecuencia de asentamientos en superficie, vibraciones, ruidos, obstáculos al tráfico; las técnicas del microtúnel afectan mínimamente la superficie urbana, ya que sólo necesitan pozos de acceso de pequeñas dimensiones.

3.6.2.- Métodos.

En los últimos años los métodos se han desarrollado y elaborado de gran manera. Se describirán en líneas generales los más utilizados.

a) Empuje (Pipe Jacking)

El empuje de tuberías, procedimiento en el cual se desplaza el terreno y no se excava, se utiliza generalmente en terrenos blandos, como suelos y bancos arenosos. Se pueden construir de esta manera alcantarillas u otros cruces bajo un ferrocarril o un terraplén de carretera o debajo de un canal u otro obstáculo.

El pozo de empuje se sitúa a la profundidad del túnel y en él deben poder situarse los gatos con los que se efectúa el empuje, el anillo inicial de empuje y el primer tramo de tubería. El muro posterior del pozo debe tener la suficiente resistencia para soportar el máximo empuje producido por los gatos.

Los gatos hidráulicos se instalan en el fondo del pozo y actúan sobre la parte posterior de la tubería por medio de un anillo de empuje. Los tubos suelen ser de hormigón reforzado (en ocasiones de acero) y se suelen lubricar para disminuir la fricción con el terreno. El cilindro cortador es el que inicia la perforación, va provisto de una cuchilla de corte de forma circular y suele disponer de gatos de empuje que reaccionan contra un anillo de acero al que le sigue la tubería definitiva.

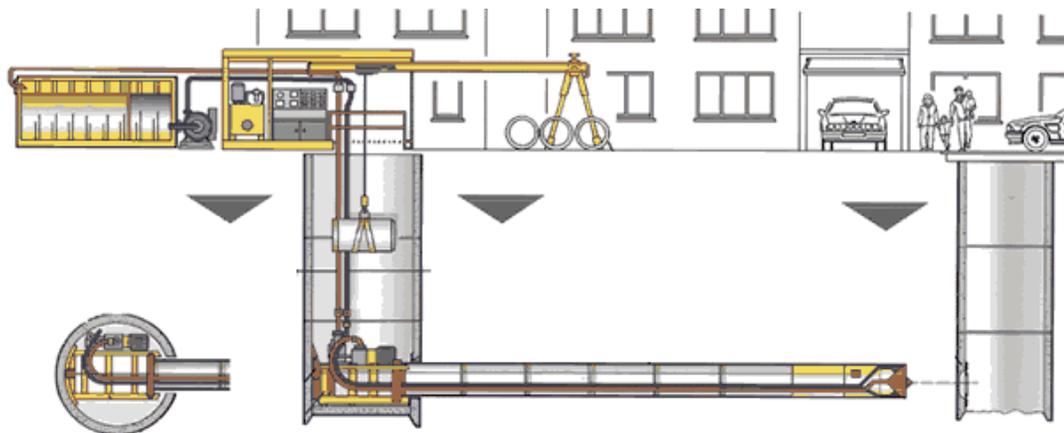


Fig 3.39 *Hinca del tubo (pipe jacking)*

La extracción del escombros se suele realizar con un tomillo sinfín o lodo presurizado con agua a presión.

Existen variantes de éste método, como el de la tubería piloto, de menor diámetro, que se empuja hasta el pozo de llegada para a continuación acoplar una cabeza ensanchadora e introducir la definitiva.

b) Método Auger

En este método, el interior de la tubería va equipada con una cabeza de tornillo excavadora y un tornillo sinfín Auger, que al girar excavan y transportan los materiales excavados. El tubo de avance es empujado hacia delante e inmediatamente detrás va conectada la tubería principal.

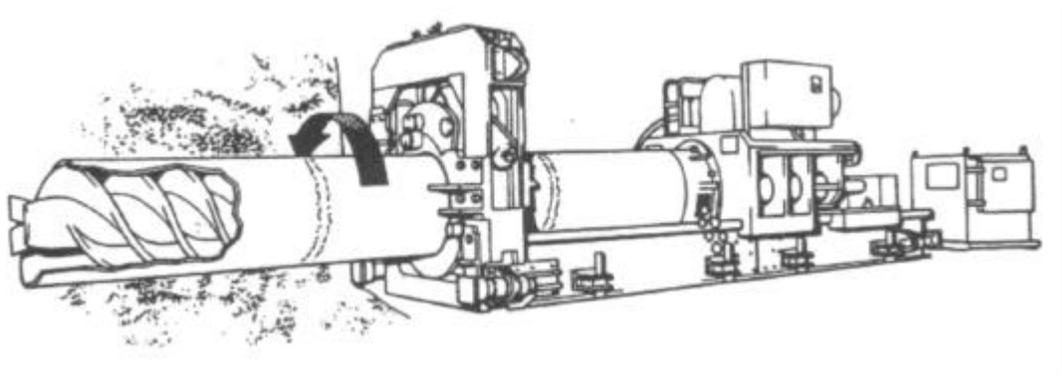


Fig. 3.40 Método Auger (Maquinaria)

c) Con escudo de lodos (EPB, Earth Pressure Balance)

En aquellos estudios geotécnicos donde se detecten terrenos cohesivos, es recomendable el empleo de un escudo EPB (Earth Pressure Balance). Sus ventajas: un elevado rendimiento de extracción, la rentabilidad de su funcionamiento y su respeto al medio ambiente.

Mediante este método se realiza la perforación del túnel con el control remoto de un escudo de lodos. Emplea una cabeza rotativa para la excavación y el escombros es convertido en lodo y conducido a la superficie por tuberías. Dicho escombros es después separado mediante un tratamiento específico y el lodo recuperado y reciclado. El lodo, además, actúa como elemento estabilizador del frente. El control de la dirección es constante, mediante una cámara de televisión.

Estas microtuneladoras se fabrican para diámetros superiores a 1400 mm. Si fuera necesario, estas máquinas están equipadas para inyectar agua o espuma al frente para tratar así el terreno para su excavación.

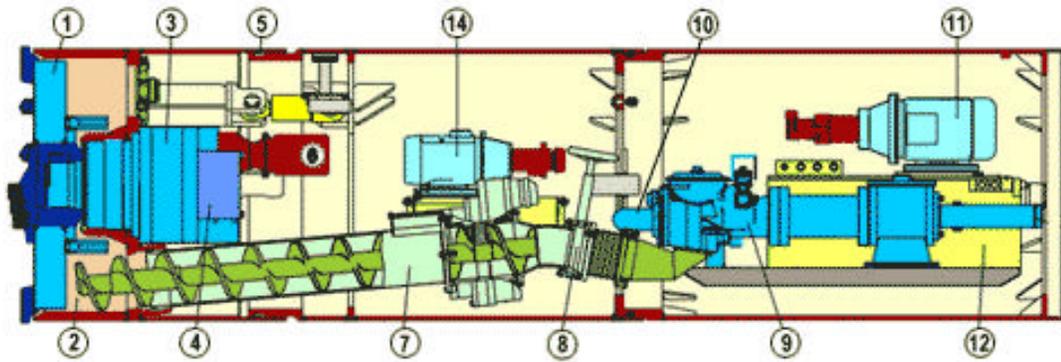


Fig. 3.41 Esquema de una máquina EPB

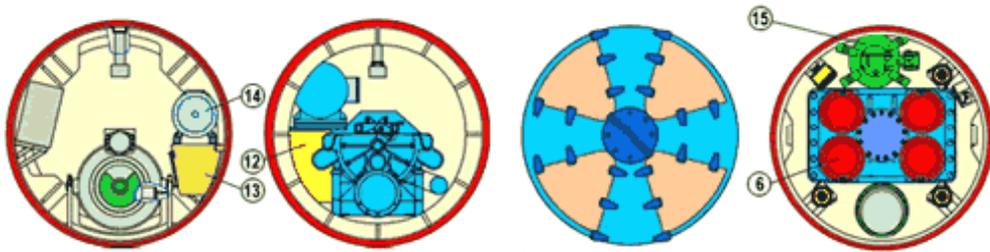


Fig. 3.42 Detalles

- | | |
|---------------------------------|---------------------------------------------------|
| 1. Rueda de Corte. | 9. Bomba de extracción del material. |
| 2. Cámara de excavación. | 10. Circuito de extracción. |
| 3. Accionamiento principal. | 11. Motor de la bomba de extracción del material. |
| 4. Accionamiento. | 12. Depósito hidráulico de bomba de extracción. |
| 5. Junta articulada. | 13. Depósito hidráulico de bomba de máquina. |
| 6. Motor principal. | 14. Bomba hidráulica para máquina. |
| 7. Tornillo sinfín. | 15. Pared de presión. |
| 8. Desagüe del tornillo sinfín. | |

CAPITULO 4.- “Replanteo de túneles”

4.1.- Proyecto de un túnel.

Antes de que un túnel se pueda planear en líneas generales y diseñar en detalle, se deberá reunir información sobre los aspectos físicos del proyecto. Se deberá contar con la topografía del área en cuestión, así como con los datos geológicos y geotécnicos. En el proyecto de un túnel la necesidad de una detallada y extensa investigación es probablemente mayor que para la mayoría de los otros tipos de construcción.

Al proyecto general de las posibles rutas y rasantes basados en la topografía del terreno, le sigue un examen detallado de las posibles alternativas, cuya finalidad es la mejor elección de la alineación. El primer enfoque del proyecto de un túnel se realiza utilizando la cartografía existente, a la mayor escala disponible y con curvas de nivel. Aún en una etapa posterior se puede cambiar considerablemente la rasante o la alineación, cuando por ejemplo se localiza una roca más conveniente o un terreno más adecuado para el equipo que se utiliza.

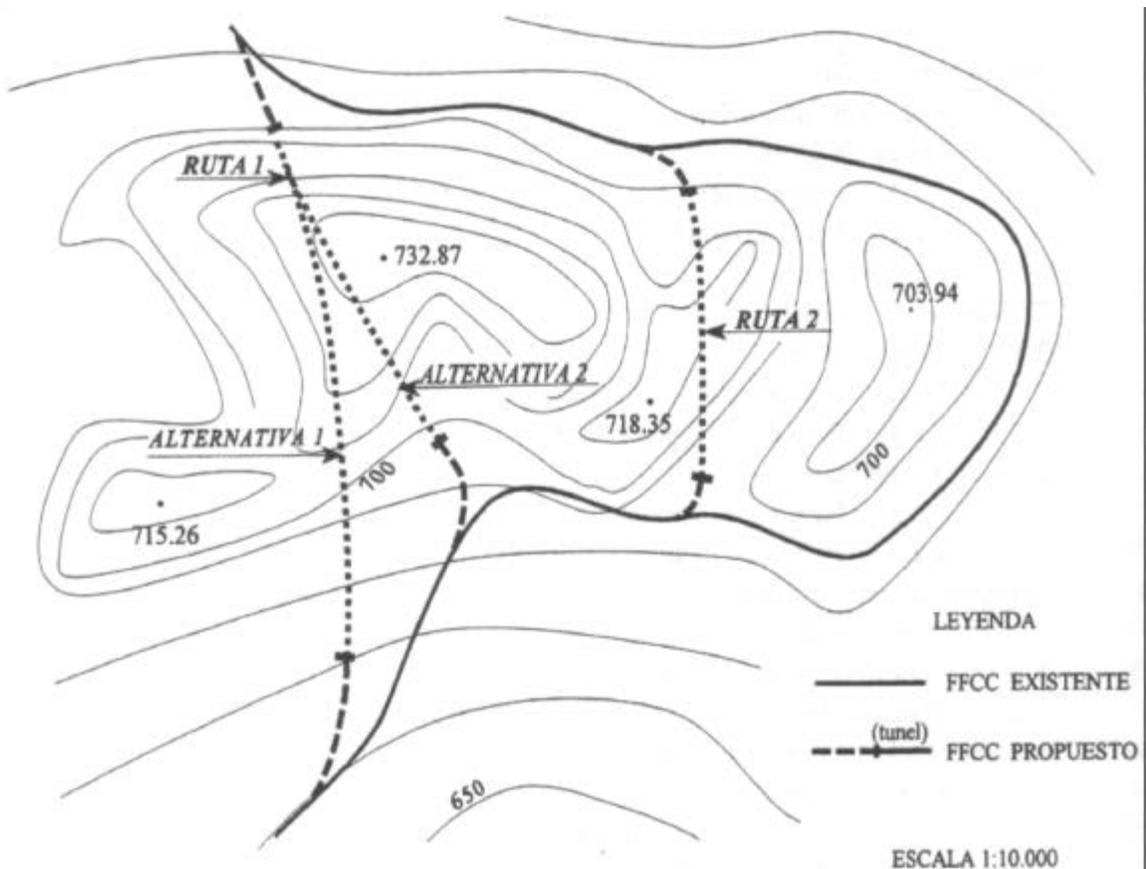


Fig. 4.01 Plano general

4.1.1.- Plano topográfico base.

Desde las primeras rutas del túnel que se proyectan sobre el mapa se hace evidente la necesidad de un levantamiento topográfico más detallado.

Una obra del tipo túnel se puede realizar en un espacio abierto, montañoso, en un centro urbano, en una zona suburbana, o industrial; por tanto la toma de datos del levantamiento debe adecuarse a cada caso. Por ejemplo, en una zona urbana será de vital importancia la exacta localización de los túneles de todo tipo ya existentes, ya sea para evitar la interferencia o para unirlos entre sí. También se deberán tomar las fachadas de las calles y los sótanos, construcciones que posiblemente habrá que controlar durante la construcción del túnel si se prevén posibles asentamientos.

Por lo que respecta a la localización de las construcciones subterráneas, las oficinas de servicios públicos disponen de planos en los que normalmente se representa el servicio acotado planimétricamente respecto a líneas de fachadas y esquinas, y altimétricamente respecto al nivel de la acera. Estos planos raras veces poseen la precisión requerida, ya sea porque haya habido modificaciones posteriores que no están representadas o por cambios en el nivel de la calle y de las edificaciones. No obstante, con la ayuda de estos planos, la inspección de los pozos de registro y de válvulas y la excavación de pozos, se localizarán y situarán de una manera precisa en el levantamiento.

Si el levantamiento se va a realizar por fotogrametría son útiles los puntos de apoyo situados en lo alto de los edificios, aunque hay que tener en cuenta que los edificios muy altos se puede mover por los cambios de temperatura y los fuertes vientos, aparte que es difícil bajar con precisión los puntos al nivel del suelo.

Por otro lado, el levantamiento topográfico abarca generalmente un área limitada en la que se puede considerar despreciable la curvatura de la tierra así como la convergencia de meridianos. No obstante, en el caso de túneles muy largos, los aspectos de la curvatura podrán ser significativos para el control altimétrico, del mismo modo la convergencia de meridianos se deberá tener en cuenta en lo que se refiere al control planimétrico, si es que trabajamos con el norte verdadero.

4.1.2.- Planos de proyecto.

El proyecto de un túnel, como cualquier proyecto de construcción, consta de distintos documentos necesarios para la realización de la obra, estos son:

- Memoria y Anexos: la memoria es la exposición detallada del proyecto. Los anexos son el complemento justificativo de cualquier afirmación emitida en la memoria.
- Planos: son la representación gráfica y numérica del proyecto.
- Especificaciones Técnicas: Es el conjunto de especificaciones (constructivas, de calidad, de medición, etc.) que se deben cumplir.
- Presupuestos: es el apartado donde se valora el costo total de la obra. En él se incluyen desde las mediciones y cubicaciones hasta el presupuesto general, pasando por la justificación de precios y los presupuestos parciales.

Desde el punto de vista constructivo, en el documento de planos es donde encontraremos más peculiaridades con respecto a otros proyectos de obras lineales, por lo que nos detendremos en el estudio de este apartado.

Los planos que definen el proyecto de un túnel son diversos, a continuación se enumeran para posteriormente describir con detalle los que más nos interesan.

- Planta de ubicación y emplazamiento: muestra la ubicación de la obra en relación con su entorno. Suele ser de escala pequeña.
- Topografía y replanteo: plano topográfico de la zona con curvas de nivel, en el que se sitúa el emplazamiento de la obra por coordenadas, y se marcan los puntos de las poligonales y triangulaciones efectuadas. Las coordenadas de estos puntos suelen venir en recuadros junto a los planos.
- Geología y geotecnia: suelen ser planos en planta y cortes en alzado con la estructura geológica del terreno detallada. Se marcan, en la planta, los puntos donde se han realizado sondeos.
- Planta general: indica a escala reducida el proyecto completo.

-Plantas: de zonas específicas de la obra.

-Alzados: se representan las caras exteriores de la figura proyectada.

-Secciones: son cortes verticales. La sección tipo es la representación de una forma que se repite en casi toda la obra.

-Perfil longitudinal: es una sección paralela al alzado de mayor sección. Se representa con escalas distintas en horizontal y vertical, y con una información suplementaria al pie del perfil.

-Detalles: la escala será mayor que la de cualquier planta o sección, y representarán lo que en otros planos, por su escala, no se ve con claridad.

4.1.2.1.- Planta.

- General de replanteo

Se realiza sobre el plano topográfico base, y suele requerir escalas del tipo 1/2000, 1/1000 o 1/500 con altimetría acorde a la escala.

En el proyecto de un túnel, la conformación de la planta dependerá de las alineaciones de entrada y de salida, así como del estudio geotécnico de la zona que atraviese. La planta será como la de cualquier obra lineal en recta, en curva o como combinación de ambos tipos de alineaciones.

En la planta general se sitúan los puntos definitivos del estado de alineaciones. Estos se especifican por su PR (punto de referencia) y sus radios (en curvas circulares) o parámetros de entrada y salida. También se marcan los PR, normalmente cada 20 m y se numeran los múltiplos de 100 m.

Otras plantas generales en el proyecto de un túnel podrán ser las de drenaje, alumbrado eléctrico, ventilación, instalaciones eléctricas, etc.

- Parcial

Las plantas parciales y de detalle se realizan a escalas del tipo 1/200, 1/100 y generalmente abarcan las zonas de acceso al túnel, como son las boquillas y las rampas y pozos de ataque intermedios.

4.1.2.2.- Perfil longitudinal.

Como se ha definido anteriormente es una sección en el sentido longitudinal del trazado de la obra. En ella se representa tanto la rasante del túnel como el longitudinal del terreno a lo largo de todo su trazado, a este último se le suele denominar perfil por montera. También se representarán, sobre todo en el caso de túneles urbanos, todos aquellos túneles o conducciones subterráneas con los que se cruce o transcurra el proyectado, siendo de gran importancia la exacta situación de éstos.

En la parte gráfica del plano perfil longitudinal se añade información numérica definitoria de la rasante, como pendientes, puntos de referencia y cotas de entrada y salida de los acuerdos parabólicos, así como los datos de los acuerdos. También aparecen acotados los tramos de cambio de la sección tipo.

La información suplementaria que se coloca al pie del perfil suele ser:

- Distancias: Al origen o punto de referencia (PR)
Parciales
- Cotas: Terreno
Rasante
- Diagrama de curvaturas
- Diagrama de peraltes

4.1.2.3.- Secciones.

La sección tipo de un túnel dependerá del estudio geotécnico del terreno en su aspecto constructivo y de las características de la obra en cuestión, variables según sea una carretera, un ferrocarril un canal, etc.

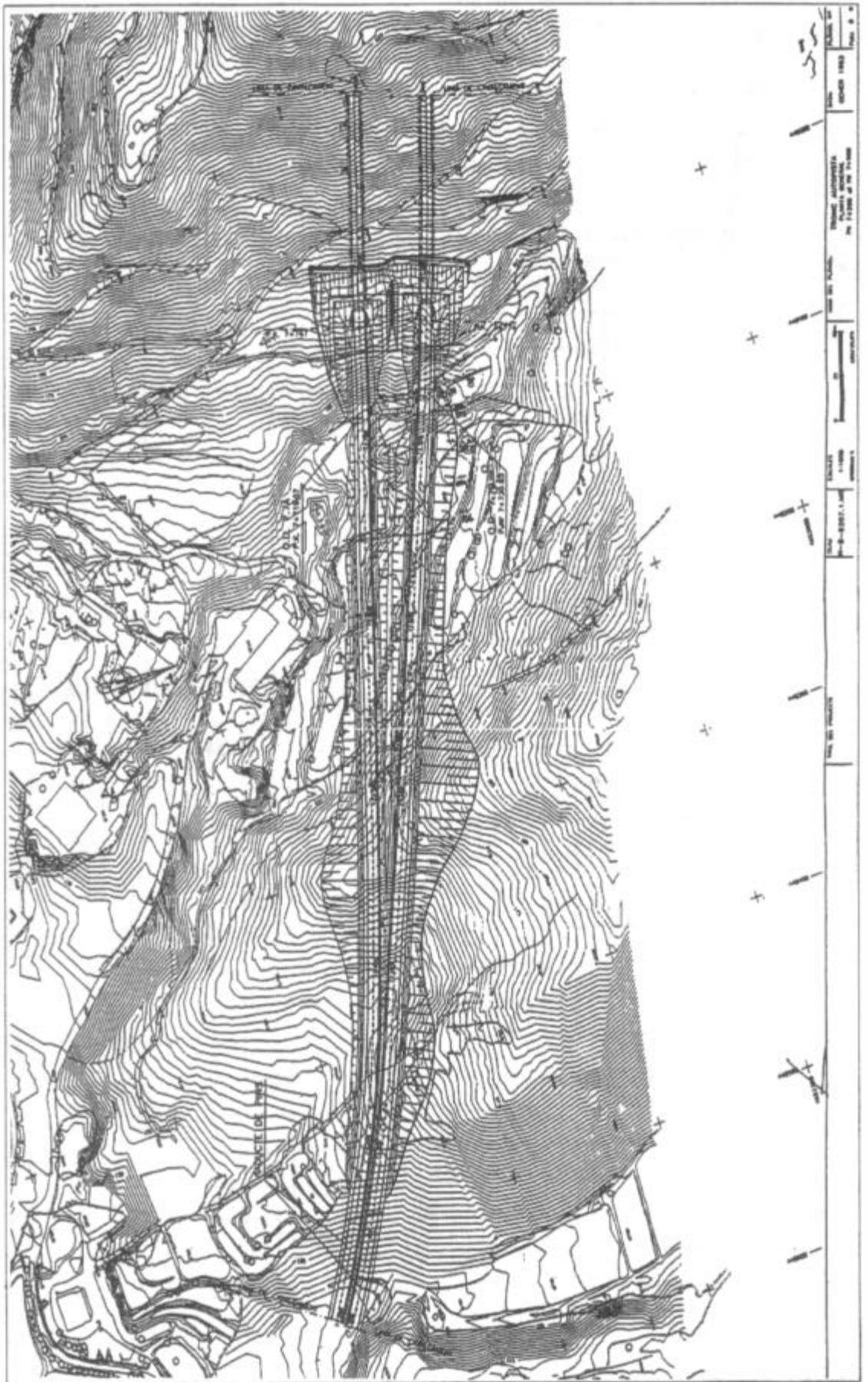


Fig. 4.03 *Planta (Proyecto Autopista)*

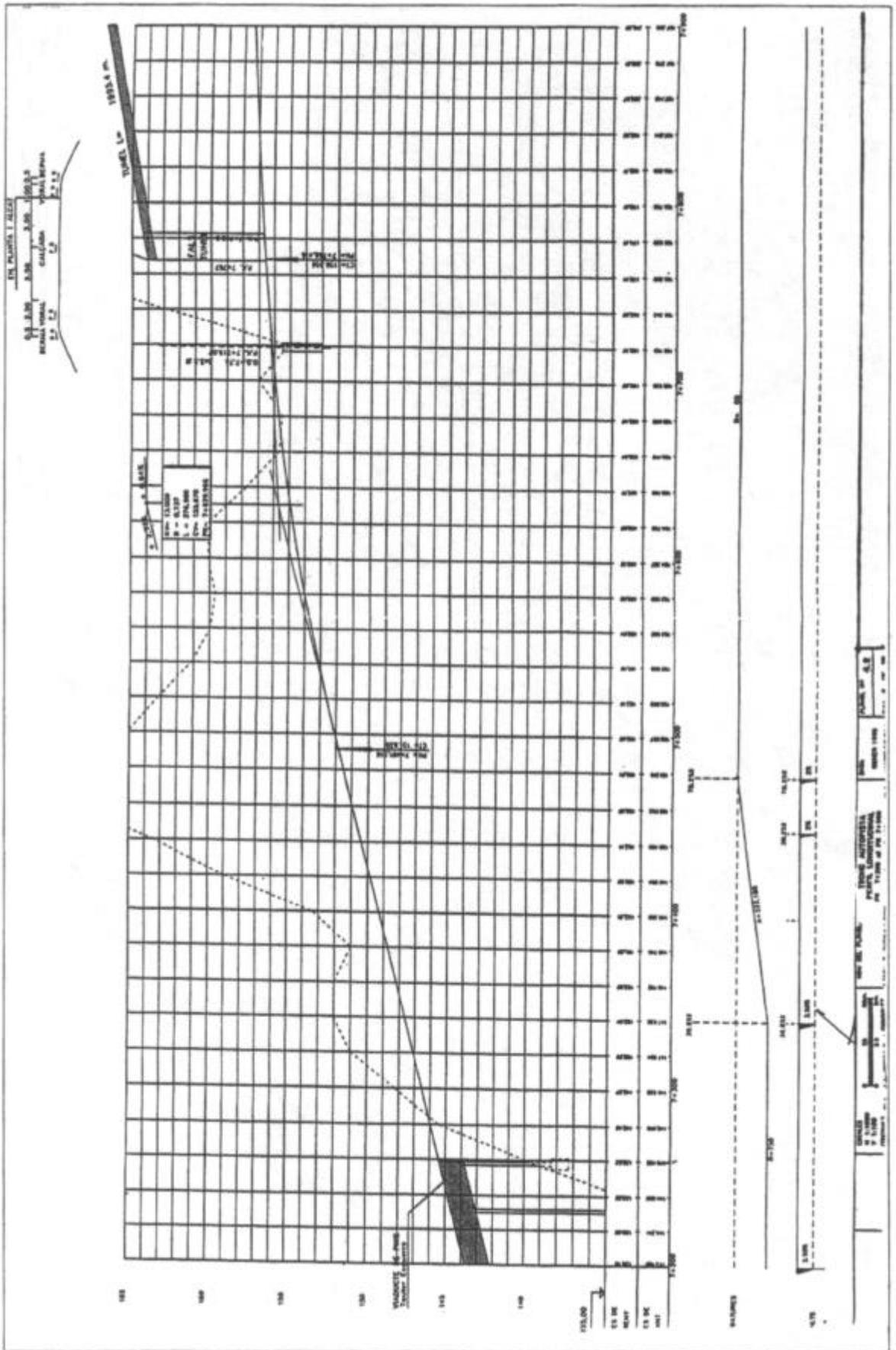


Fig. 4.04 Perfil longitudinal (Proyecto Autopista)

4.2.- Trabajos en el exterior.

El replanteo de un túnel o de una galería se compone de dos partes claramente diferenciadas: la superficial y la subterránea. Como se explica en capítulos anteriores, la excavación de un túnel se realiza generalmente, y al menos, desde dos frentes de ataque que suelen ser las boquillas, y éstos incluso se multiplican por medio de pozos de ataque; la finalidad es duplicar o multiplicar la velocidad de excavación del túnel o galería.

Los trabajos en el exterior tienen por finalidad enlazar tanto planimétricamente como altimétricamente las boquillas entre sí, así como situar los posibles pozos de ataque; todo esto se entiende que es necesario e imprescindible para el perfecto encuentro de los distintos frentes de excavación en el ulterior.

4.2.1.- Planimétricos.

4.2.1.1.- Red de enlace entre bocas.

Consta de una serie de trabajos de precisión entre los que destaca la triangulación. Actualmente se puede sustituir por un itinerario de precisión debido a los potentes y precisos distanciómetros de los que dispone el mercado. Otra posibilidad es una triangulación en que se realicen comprobaciones de longitudes con distanciómetros, evitando así tener que depender totalmente de una sola longitud de base. También se comercializan en la actualidad sistemas de posicionamiento global (GPS) con precisiones adecuadas para estos trabajos. La gran ventaja de este último sistema es la rapidez y comodidad debido a que no es necesaria la visibilidad entre puntos, por lo que el trabajo se realiza en las zonas de las boquillas y de los posibles pozos de ataque.

También la zona en la que nos movamos nos obligará a escoger un método u otro: la triangulación se adaptara mejor a un terreno despejado, pero en las calles de una ciudad los itinerarios serán mucho más adecuados.

Cualquiera que sea el método utilizado la finalidad será situar a cada lado del túnel unos puntos que definan la posición y dirección del eje y fijar la posición de los pozos de ataque, así como los puntos de referencia necesarios para posteriormente situar y prolongar el eje del túnel en el fondo del pozo.

4.2.1.2.- Paso de línea por montera.

Otro de los trabajos topográficos que se deben realizar con anterioridad al comienzo de la excavación del túnel, y si las condiciones del terreno lo permiten, es el denominado paso de línea por montera. Supongamos un túnel en recta: conocidas las coordenadas de los puntos que definen los extremos del túnel, una vez realizado el enlace entre bocas, calculamos el acimut de la alineación recta boca norte-boca sur.

Si estacionando en boca norte y orientando el aparato prolongásemos dicho acimut, con las estaciones intermedias que fuesen necesarias, deberíamos llegar al punto boca sur, suponiendo nulos los errores accidentales propios de la prolongación de dicha alineación. Sin embargo es muy posible que lleguemos a un punto separado transversalmente del teórico una magnitud "d". Esto es debido a que las coordenadas de estos dos puntos no están exentas de pequeños errores residuales.

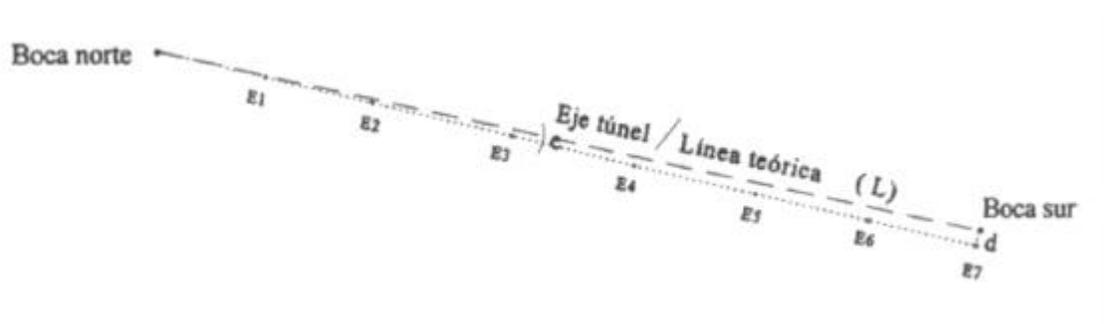


Fig. 4.07

Según el dibujo, conocida la longitud total "L" y la distancia "d", podemos calcular el error en el acimut y modificar el calculado.

Con este nuevo acimut repetiremos la operación de prolongación del acimut a cielo abierto las veces que sea necesario, hasta que el valor de "d" se pueda atribuir a la suma de los errores accidentales que previamente se han calculado.

Si la definición del eje del túnel fuese en curva o combinación de rectas y curvas, se replantearían dichas alineaciones y, calculada la longitud total (desarrollo) procederíamos de la misma manera que en el caso descrito.

Se puede decir que el paso de línea por montera es una comprobación a cielo abierto del cierre en dirección del trabajo que posteriormente se realizará en el interior del túnel.

4.2.2.- Altimétricos.

4.2.2.1.- Nivelación entre bocas.

Desde el punto de vista altimétrico también se deberán enlazar las dos bocas del túnel efectuando una nivelación geométrica de precisión, que a ser posible empezará y concluirá en puntos de la nivelación oficial de alta precisión (NAP), sea como fuere siempre deberán ser cerradas. Se recuerda que los desniveles obtenidos por nivelación trigonométrica no tienen la precisión requerida para este tipo de trabajos.

Al efectuar esta nivelación se dejarán las señales necesarias que sirvan de partida a las nivelaciones secundarias, necesarias por ejemplo para llevar cota a la zona del pozo o rampa proyectada para multiplicar los frentes de excavación. Las señales deberán estar situadas lejos de la zona de influencia de la excavación del túnel y cimentadas sobre un estrato que no pueda ser afectado por las operaciones del túnel.

Por lo tanto la misión de estas nivelaciones es la de relacionar las cotas de ambas bocas así como la de dejar cota próxima al pozo o rampa proyectada, que sirva de base para la posterior medida de la profundidad del pozo o la prolongación de la nivelación por la rampa. También, en algunos casos, estos datos servirán para proyectar la rasante definitiva del túnel.

4.2.2.2.- Perfil longitudinal por montera.

El perfil longitudinal por montera se puede obtener directamente desde el plano topográfico sobre el que se ha proyectado el túnel, pero cuando se pretende multiplicar los frentes de excavación por medio de pozos o rampas de ataque intermedios es necesaria una mayor precisión y por lo tanto el levantamiento del longitudinal por montera, al menos en las zonas en las que se prevea que pueda situarse el pozo o rampa.

Una función más de los trabajos planimétricos que se describen en apartados anteriores es la de situar en la superficie del terreno tantos puntos del plano vertical que pasa por el eje del túnel como sea posible o necesario para el levantamiento del perfil longitudinal exterior. Estos puntos se replantearán desde los utilizados en la red de enlace entre bocas.

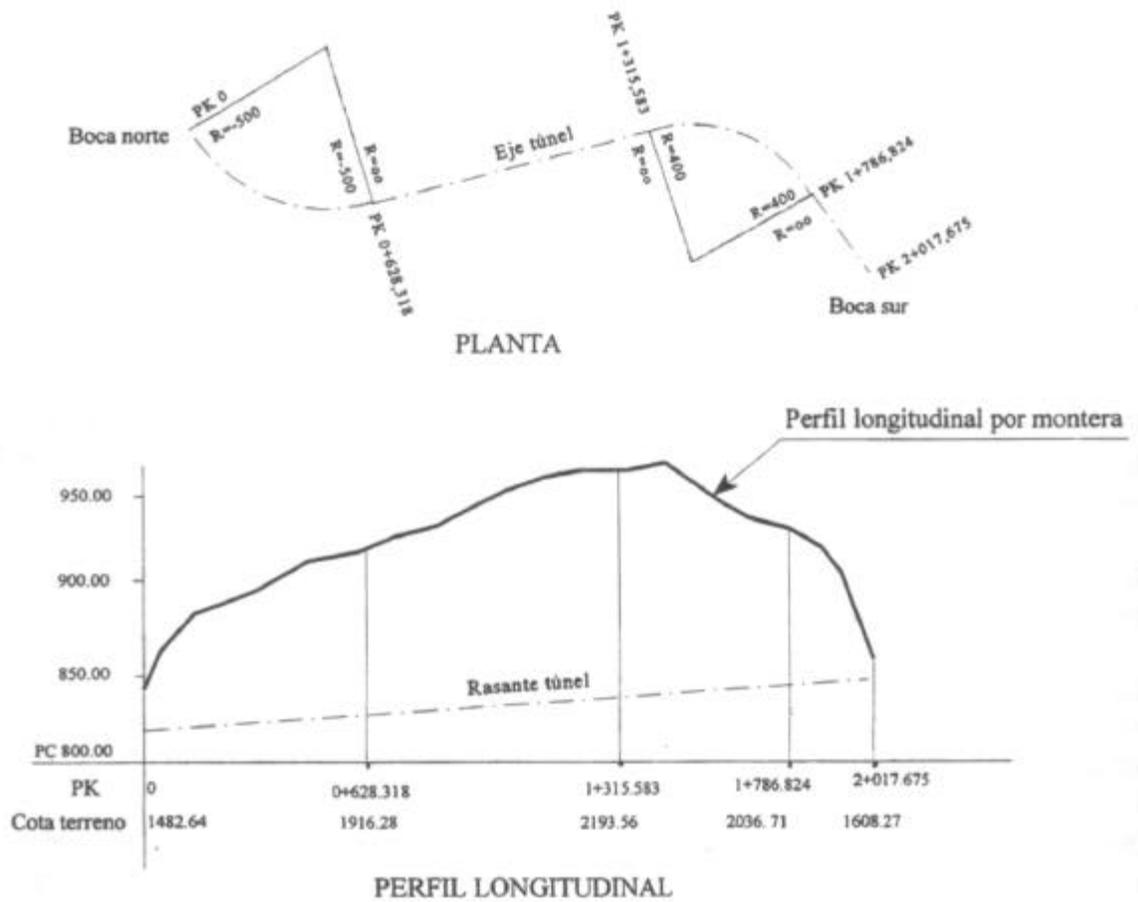


Fig. 4.08 Perfil longitudinal por montera

No obstante, si la definición planimétrica del túnel es recta, se pueden obtener los datos del perfil longitudinal a la vez que se realiza el paso de línea por montera.

4.3.- Replanteo de pozos y rampas de ataque.

Dentro de este apartado vamos a diferenciar los trabajos a realizar cuando el enlace con el interior es a través de rampas o a través de pozos. Este último caso es el que presenta mayores dificultades, como se verá mas adelante.

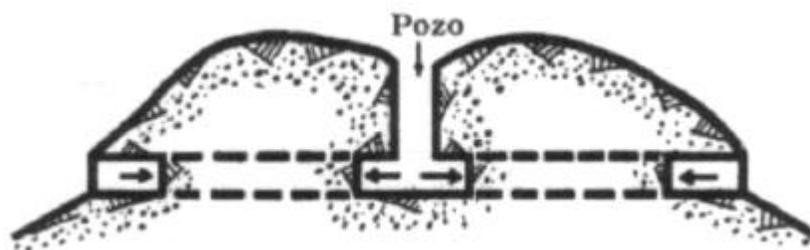


Fig. 4.09 Túnel con cuatro frentes de ataque

Con el fin de multiplicar los frentes de ataque en la construcción de un túnel se suelen excavar, sobre todo en los túneles largos, pozos y/o rampas intermedias.

Si el túnel pasa próximo a una ladera o bajo un collado puede ser más cómodo y rentable la excavación de una rampa de acceso en lugar de un pozo. En zonas urbanas también suele ser la solución única de acceso directo para la construcción de un túnel, por ejemplo en el Metro.

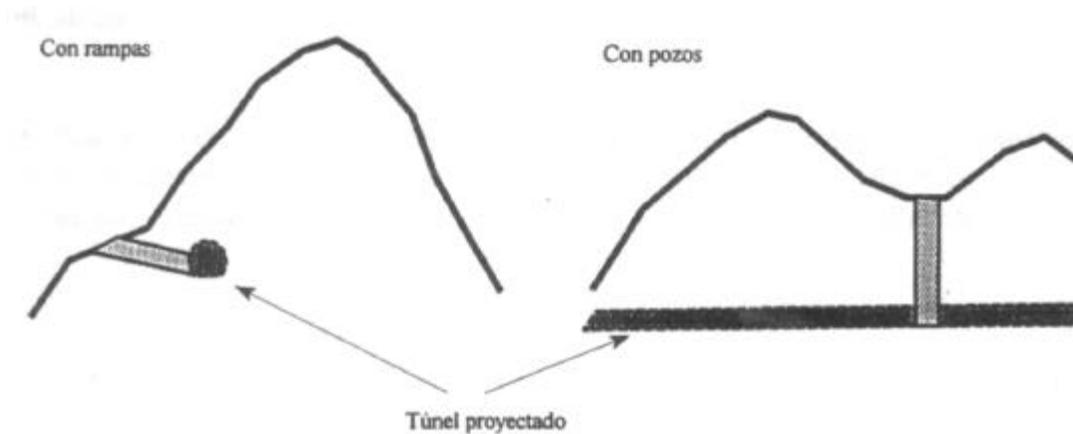


Fig. 4.10 Apertura de frentes de ataques intermedios

Sobre el topográfico base, o mejor aún sobre un levantamiento a escala mayor (1:200), se proyecta dicha rampa, definiendo el punto del eje del túnel al que debe acceder y el punto de inicio en la superficie. La definición en planta suele ser una recta, por ser el trayecto más corto entre dos puntos, y la rasante dependerá del tipo de vehículos que deban circular por ella.

El proceso de replanteo será similar al del replanteo del túnel, que se describirá en apartados posteriores, aunque las tolerancias en la ejecución pueden ser mayores; no obstante habrá que ser metódico y preciso a la hora de transmitir la planimetría y la altimetría del túnel que se pretende excavar.

El replanteo y control de la excavación de un pozo tiene características singulares que se describen a continuación.

4.3.1.- Replanteo exterior.

Una vez decidida la situación del pozo de ataque a la excavación, normalmente sobre el eje del túnel, tendremos que marcar en las proximidades de su boca y fuera de los posibles movimientos de tierras, cuatro puntos como mínimo en los que nos apoyaremos para el trazado futuro del eje del túnel. De estos cuatro puntos, se procurará que dos de ellos estén en el plano vertical del eje del túnel y los otros dos en un plano perpendicular que corte al primero en el eje del pozo.

Calculadas las coordenadas de estos puntos se replantearán desde vértices de la red exterior, teniendo en cuenta que la precisión necesaria, aunque variará según la tolerancia requerida en el encuentro futuro de frentes y de la longitud de túnel a excavar, deberá ser alta, ya que la longitud del tramo a transmitir estará obligada por el diámetro del pozo, con el consiguiente peligro del error de dirección al que ya hemos hecho referencia en el capítulo anterior.

Por lo que respecta al replanteo altimétrico se situará en las proximidades de la boca del pozo un punto con cota conocida, para ello se habrá realizado una nivelación secundaria partiendo de la principal. Calculada la rasante del túnel en el fondo del pozo deduciremos fácilmente la profundidad de éste.

4.3.2.- Control de la excavación.

Los pozos excavados para la construcción de un túnel no son tan profundos como los utilizados en explotaciones mineras: las profundidades mayores se encontrarán generalmente en las construcciones hidroeléctricas, pero lo normal es que no superen los 100 m debido al alto costo de este tipo de excavaciones. El diámetro del pozo no debe ser menor de una vez y media el diámetro del túnel, ya que resulta difícil construir la abertura que se forma con la intersección de dos cilindros casi iguales.

Al excavar un pozo uno de los requisitos más importantes es el control de la verticalidad. El tiempo transcurrido entre la entibación provisional y la definitiva es mínimo, incluso la definitiva tiene lugar al mismo tiempo que la excavación, por lo que no habrá más que una sola operación de guía.

Un sistema habitual de control de la verticalidad es por medio de plomadas de gravedad: se sitúan al menos tres o mejor cuatro plomadas (dependiendo del diámetro del pozo) suspendidas de un hilo o alambre y a una distancia fija del revestimiento definitivo (alrededor de unos 30 cm.). Desde el hilo se toman medidas a las paredes del pozo para verificar la verticalidad requerida.

Los puntos de la superficie por donde se hace pasar el hilo de las plomadas se pueden fijar en una ménsula (apoyo) y situarlos, basándose en los del replanteo exterior, en las mismas direcciones, de manera que se puedan conservar para usos futuros.

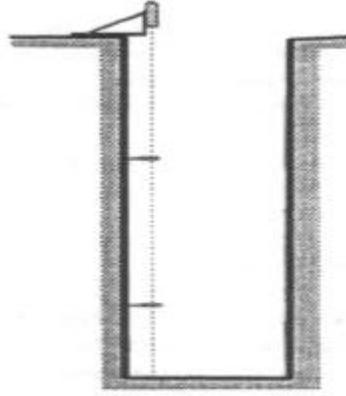


Fig. 4.11 *Emisor láser sobre apoyo y placas de control*

En la actualidad el uso del rayo láser ha sustituido a las plomadas para el control de la verticalidad, que se realiza efectuando la medida desde la pared del pozo al rayo interceptado por una pantalla como un punto luminoso. Se debe tener especial cuidado en comprobar la verticalidad del rayo, efectuando el giro de 360° (si el aparato lo permite) y comprobando que el punto en el blanco inferior permanece estacionario. En esta posición se fijan unas placas a las paredes del pozo, con un orificio central por donde debe pasar el rayo. Estas placas permitirán situar el emisor láser en su posición original, en el caso de haber tenido que quitarlo, o bien revelarán al instante si éste ha sido movido o desplazado por cualquier causa.

De la misma manera que se utilizan las plomadas de gravedad y el emisor láser, se pueden utilizar las plomadas ópticas al nadir, con el inconveniente de la necesidad de la presencia física del técnico cada vez que se requiera hacer una medición que consistirá simplemente en leer una cinta o mira en posición horizontal y en contacto con la pared del pozo.

4.3.3.- Transmisión de la planimetría y altimetría.

Ya se ha hablado extensamente de la transmisión de la planimetría y de la altimetría al fondo de un pozo en el tema “Levantamientos subterráneos”. Los métodos aplicados para la transmisión de estos datos en el replanteo del túnel en principio pueden ser los mismos, en el caso de transmisión de la planimetría:

- Por medio de plomadas (ópticas o de gravedad)
- Con taquímetro o teodolito
- Con rayo láser
- Con brújulas o declinatorias
- Con teodolito giroscópico (giroteodolito).

Las particularidades en el caso de replanteos es que los dos puntos transmitidos suelen ser los que definen el eje del túnel y si son cuatro los otros dos definirán la perpendicular que pase por el centro del pozo, teniendo de esta manera comprobación en el fondo del pozo de la transmisión efectuada.

Por otro lado, al ser por lo general los pozos poco profundos, comparados con los de las explotaciones mineras, muchos de los inconvenientes se reducen: las visuales ópticas suelen ser buenas, la estabilidad de las plomadas de gravedad se consigue con mayor rapidez; sin embargo las brújulas y declinatorias no suelen ser útiles debido a la alta presencia de elementos perturbadores. El giroteodolito, debido a su alto costo, sólo se suele utilizar en proyectos de gran envergadura.

Se recuerda la importancia de la transmisión de la orientación, que posteriormente será prolongada en el interior del túnel, y que si no se obtiene con la precisión deseada provocará errores inadmisibles en el futuro encuentro de los frentes. La precisión obtenida dependerá en parte del método utilizado, pero también del cuidado y meticulosidad con que se haya realizado la observación.

En cuanto a la transmisión de la altimetría también se enuncian los distintos métodos que se pueden utilizar:

- Medida con cinta
- Método de Firminy
- Con distanciómetros.

En la medida de la profundidad con cinta las lecturas se realizan con nivel. Dos niveles estacionados uno en la superficie y otro en el fondo toman la lectura en la cinta. El de la superficie previamente observa la base de nivelación situada próxima a la zona, y el del fondo a la primera del itinerario interior, a la que de esta manera se transmite altimetría.

4.4.- Replanteo del túnel. Metodologías.

Podemos decir que conviven en la actualidad dos metodologías aplicables al replanteo de túneles. La primera es heredada de los primeros largos túneles, construidos entre finales del siglo pasado y comienzos de éste, época en la que se disponía de teodolitos ópticos de precisión pero no de aparatos para la medida electrónica de distancias (MDE), es la de replanteo por el eje.

Actualmente el avance técnico en la instrumentación para la medida de distancias y su costo asequible permiten su utilización en cualquier tipo de replanteo, fabricándose de las precisiones necesarias para cada caso. Por lo que se suele replantear estacionando el aparato en puntos fijos (bases de replanteo, BR) de coordenadas conocidas y obtenidas por métodos topográficos ademados a la precisión requerida (triangulación, itinerario, intersecciones, etc.).

Esta metodología se aplica también en el replanteo de túneles, siendo el segundo método que se describe (replanteo desde una red subterránea).

Puede que se obtenga mayor precisión en el replanteo del eje desde redes interiores que por el propio eje, debido a que en el primer caso la misma estación o base de replanteo se puede comprobar por separado, volviéndose a comprobar las veces que sean necesarias, mientras que el replanteo por el eje es esencialmente la operación de fijar un punto base de estación y marcarlo de una vez por todas. Es bien sabido que se consigue mayor precisión angular y en distancia en la observación de un punto materializado en el terreno, que en su replanteo. Del mismo modo se consigue mayor precisión en las lecturas angulares leídas en el aparato que en las introducidas fijas para el replanteo.

No obstante en túneles cortos puede resultar más eficaz el replanteo por el eje; incluso en túneles de mayor longitud pero con largas alineaciones rectas puede ser más precisa la prolongación de la dirección por el eje que el replanteo de la recta desde bases.

4.4.1.- Replanteo por el eje.

Se planifica en distintas fases que a continuación se describen:

4.4.1.1.- Replanteos en las boquillas.

Una vez efectuada la reobservación de la red incorporando los puntos definitivos de las bocas del túnel, si ha sido el caso, y realizado el paso de línea por montera si las condiciones del terreno lo permiten, se fijarán fuera de cada boca y en la alineación del eje del túnel al menos tres puntos, a partir de los cuales comenzarán las operaciones de replanteo subterráneo.

Estos puntos se deben materializar de manera permanente, por ejemplo con postes de hormigón en los que se embute una chapa metálica con la señal grabada, o con algún otro sistema que garantice la inmovilidad de la señal. Deben estar fuera de la zona que se tema que será afectada por el movimiento de tierras, y separados entre sí la mayor distancia posible compatible con el alcance del aparato.

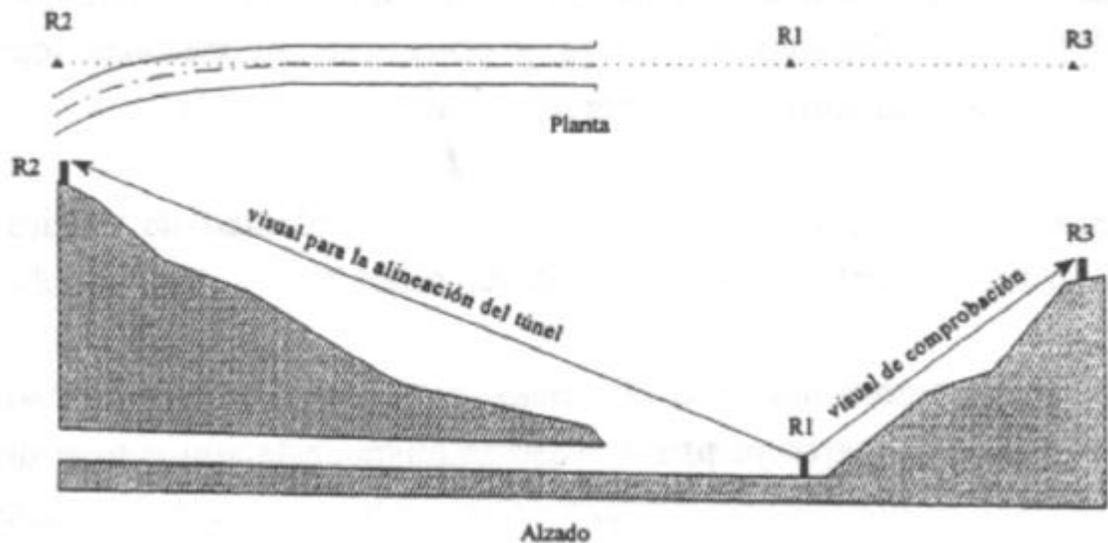


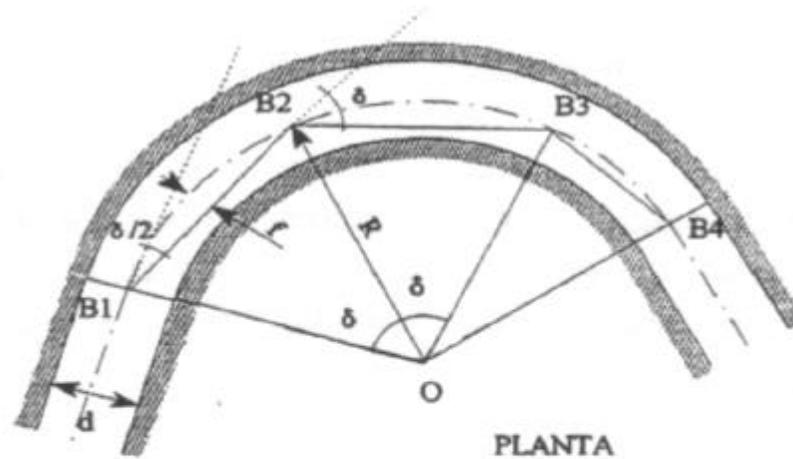
Fig. 4.12 *Replanteo en boquillas*

El aparato se colocara en el punto central, de coordenadas conocidas. El punto anterior se debe situar a ser posible encima del propio túnel y en zona que no vaya a modificarse en los trabajos de construcción de las boquillas, y sirve para fijar en cualquier momento la dirección del eje del túnel. El posterior servirá de comprobación.

Una vez abierta la excavación se establece un nuevo punto, a unos 10 o 15 m de la boca, para desde él marcar la zona de la galería que el alcance del aparato y las condiciones de visibilidad permitan. Posteriormente hay que ir estableciendo otras estaciones interiores, pero siempre -este primero- junto con los tres exteriores, servirán de origen a las comprobaciones periódicas que deben realizarse.

4.4.1.2.- Cálculo del replanteo óptimo.

Las condiciones de espacio físico en las que se trabaja, obligan a un estudio del replanteo que permita visuales lo más largas posibles, siempre dependiendo del alcance del aparato. Si tanto la definición en planta del túnel como la de su rasante son rectas, el replanteo no tendrá dificultades de espacio y visibilidad. Pero cuando la planta es en curva y la rasante parabólica, hemos de diseñar un replanteo que se ciña al eje del trazado y que dependerá de la anchura libre del túnel.



- d** : Ancho útil del túnel
R : Radio de la circular
f : Flecha óptima
δ : Ángulo en el centro óptimo

Fig. 4.13 Optimización del replanteo (caso de una curva circular)

Según la figura, se diseña una poligonal óptima por el eje, también llamada poligonal de cuerdas o del polígono inscrito, adaptada al ancho del túnel, de manera que la flecha sea algo menor que el semiancho del túnel. En estos tramos se tenderá a que tengan la misma longitud para un mismo radio, de manera que una vez calculado el replanteo de uno de ellos, sea repetitivo para los restantes.

Esta poligonal óptima es en la que nos basaremos para el mareaje de la alineación en la zona del frente, y también para la colocación del revestimiento.

Entre cada dos de estos puntos óptimos será necesario calcular otros intermedios, según las necesidades del sistema de excavación utilizado. Si es con explosivos se consultará el avance previsto en el plan de tiro y esa longitud deberá ser la del cálculo del replanteo de los puntos intermedios, aunque luego durante la construcción se pueda simplificar recurriendo a otros métodos como los replanteos con láser o por métodos expeditos, que se describirán más adelante.

El cálculo de estos puntos intermedios se podrá preparar por distintos métodos, que se suponen conocidos por el lector, como pueden ser por abscisas y ordenadas sobre la tangente, o sobre la cuerda, o por polares, siempre con estación en el vértice de la poligonal óptima anterior y orientando a la última dirección replanteada.

Se ha descrito el proceso aplicado a una curva circular, de igual manera se prepararía el replanteo de una clotoide, conocidos su parámetro, longitud y tangente de entrada y salida.

En cuanto a la altimetría, se calcularán a la rasante de excavación sobreelevada una magnitud constante h , por motivos prácticos y de visibilidad (de 1 a 1,5 m), tanto los puntos básicos como los intermedios, y en sus extremos izquierdo y derecho.

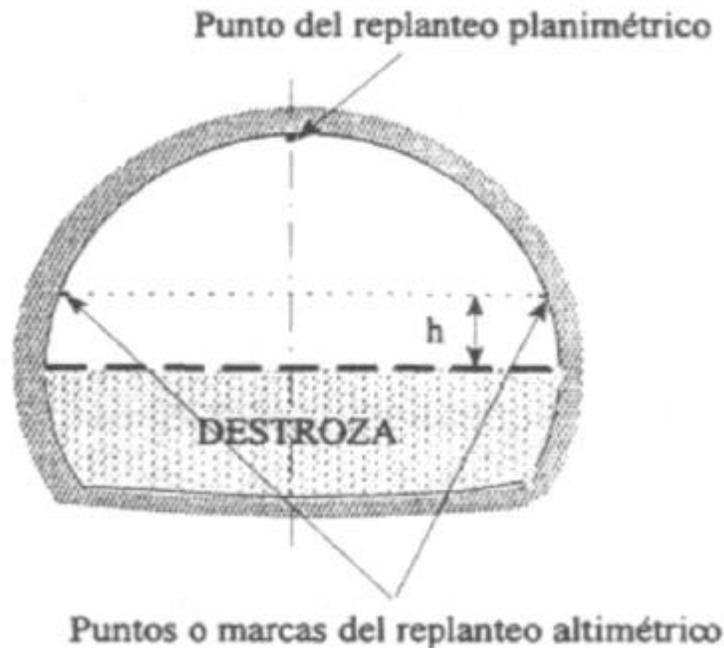


Fig. 4.14 *Replanteo en el frente, en calota*

Generalmente la excavación se realiza en dos fases: semisección superior o avance en bóveda y semisección inferior o destroza. En la primera fase normalmente la rasante de excavación no tiene pendiente transversal, a no ser que existan problemas de filtraciones de agua que obliguen a la construcción de una cuneta por donde tenga que circular, y se deba excavar la sección con una pendiente transversal que se dirija hacia ella.

Se dispondrá por lo tanto de unos listados para los puntos básicos en los que aparecerán, entre otros datos, la denominación del punto básico de estación y del que se replanteó, los PR (o desarrollo desde el origen) de ambos, los datos de replanteo y los datos de la rasante.

De la misma manera se confeccionan otros listados para el replanteo de los puntos intermedios, que en el caso de la curva circular podrá ser repetitivo entre dos puntos básicos.

4.4.1.3.- Replanteo de los puntos básicos y de los intermedios.

Desde el punto situado en el interior y próximo a la boca del pozo se comenzarán los trabajos de prolongación de la alineación del túnel. Si se trata de una recta la prolongaremos a medida que avance la excavación, proyectándola sobre el frente y arrastrando cota de la nivelación exterior que se va prolongando al interior según se necesite.

Se procede de este modo hasta llegar a la tangente de entrada de la curva que se trate. Para mayor simplicidad de la explicación se describirá el caso de que la curva sea circular.

Cuando el frente de excavación se encuentre situado en la tangente de entrada de la circular, éste se replanteará como uno intermedio más. Incluso desde el punto básico anterior aún se han de replantear algunos intermedios que lo sobrepasen, con el fin de que el frente se aleje lo suficiente del nuevo punto básico y permita su replanteo con la precisión requerida.

Una vez alejados los trabajos de excavación del nuevo punto básico, se replantea con precisión, para continuar desde aquí el replanteo del eje.

Existen en el mercado regletas de contraje o ajuste que permiten, efectuando varias lecturas con el anteojo en círculo directo y en círculo inverso sobre una regleta graduada, obtener un promedio y situar con exactitud el punto a replantear. Las hay que disponen también de regleta para el ajuste en distancia.

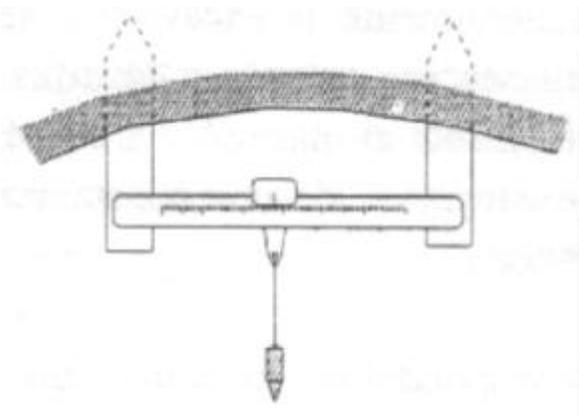


Fig. 4.15 *Regleta de ajuste de la alineación*

Una vez estacionados en el nuevo punto base y orientando al anterior, se replantean los puntos intermedios por cualquiera de los métodos enunciados. Ya se ha comentado que el replanteo en planta se suele hacer en la bóveda y el replanteo de la rasante de excavación sobreelevada se replantea normalmente con nivel y partiendo de bases de la nivelación geométrica interior.

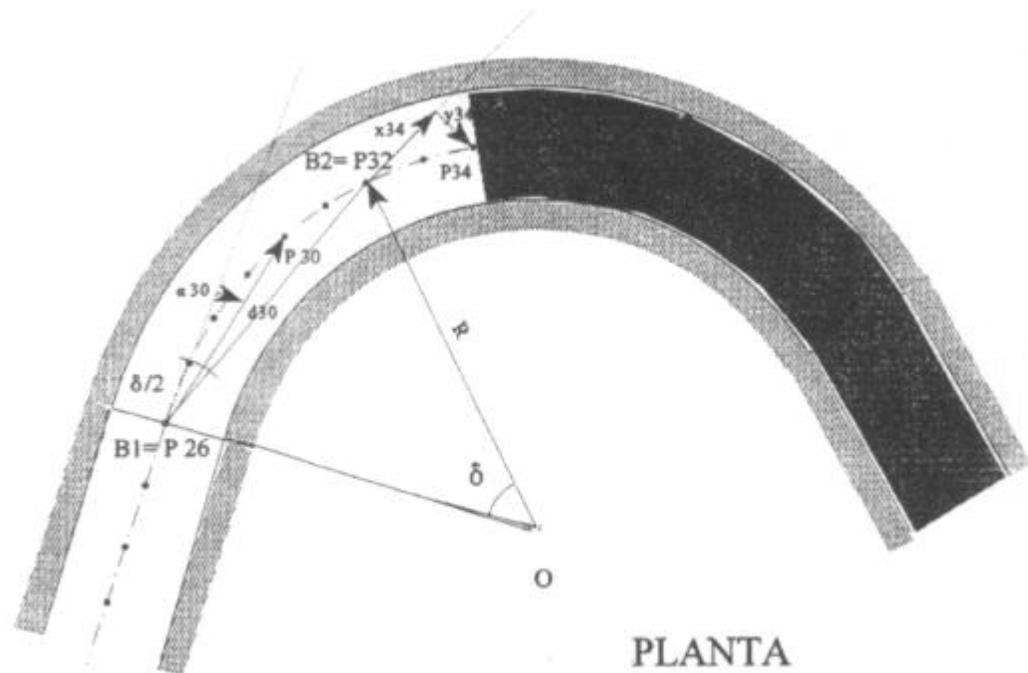


Fig. 4.16 Replanteo de puntos intermedios

En el esquema de la figura 4.16 aparece representado el perfil o punto P30 replanteado por polares desde la prolongación de la tangente. Sin embargo el P34 se ha debido replantear por abscisas y ordenadas sobre la prolongación de la cuerda, por la imposibilidad de estacionar aún el aparato en el punto B2.

4.4.1.4.- Comprobación. Replanteos dobles.

A medida que progresa la excavación será necesario comprobar que los replanteos efectuados se mantienen dentro de la precisión requerida y que la situación de los puntos no se ha visto afectada por asentamientos del terreno excavado. Por ello se debe realizar el llamado replanteo doble que, basándose en los puntos básicos anteriores o en otros nuevos, realizará los ajustes precisos.

Uno de los métodos usuales para el replanteo doble, en el caso de una curva circular, es el del polígono circunscrito, que comprueba los puntos básicos primarios por estar geoméricamente situados en la misma alineación y en el punto medio.

Otra de las funciones de este replanteo doble es dejar las bases de apoyo necesarias para la construcción del revestimiento si es el caso, o para el montaje posterior de vías o cualquier otro tipo de equipamiento del túnel proyectado.

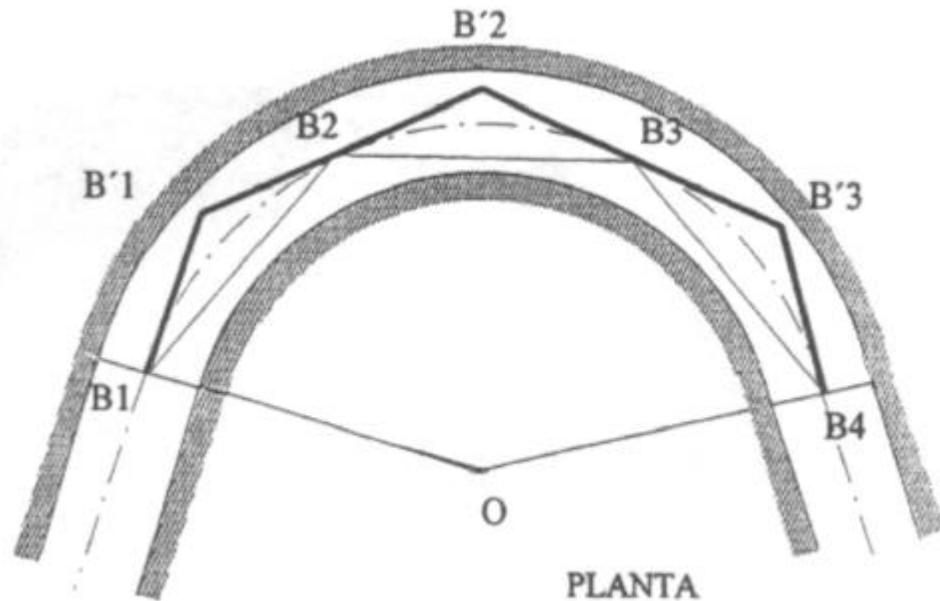


Fig. 4.17 Poligonal base para el replanteo doble

También se comprobará y ajustará la red altimétrica inicial, por nivelación geométrica de precisión; ambas redes altimétricas deberán ser cerradas periódicamente con puntos de la red exterior.

Las precisiones de la nivelación suelen ser del orden de 3 mm. para un recorrido de un kilómetro. En itinerarios más largos será proporcional a la raíz cuadrada del número de visuales.

4.4.2.- Replanteo desde una red subterránea.

La red superficial, utilizada en el enlace entre bocas, se deberá prolongar en el interior del túnel según avance la excavación, para utilizarla en el replanteo del eje en la zona del frente, y también en la colocación del revestimiento: es la que llamaremos red inicial.

Esta red subterránea deberá someterse repetidas veces a sucesivas comprobaciones y ajustes, para mantener la precisión deseada. Estos trabajos son los que se describen en la red de control.

4.4.2.1.- Red inicial.

A partir de la red superficial se establecen unas estaciones en el interior del túnel. Deben ser estaciones sólidas y que fijadas a los hastiales o a la bóveda del túnel garanticen su inmovilidad frente a golpes propios de las condiciones del trabajo en espacios reducidos. No

obstante, convendrá realizar una cuidadosa reseña del punto. Se deberá tener en cuenta a la hora de elegir su situación, que el sistema de excavación, el de revestimiento y el de transporte del escombros no puedan obstaculizar las observaciones.

Convendrá que la base sobre la que se sitúe tanto el aparato como las señales y los prismas sea de contraje forzoso, con la ventaja de la eliminación de los errores de estacionamiento y puntería.

Para evitar los errores en la dirección de las visuales, producidos por la refracción que origina la superior temperatura de la roca, las consolas o plataformas para el estacionamiento no deben estar excesivamente pegados a ésta, e incluso puede ser conveniente diseñar la red en zig-zag (tramos de hastial a hastial contrario).

La longitud de las visuales estará limitada por la atmósfera del túnel y por la geometría de la traza, aunque no suelen superar los 150 m.

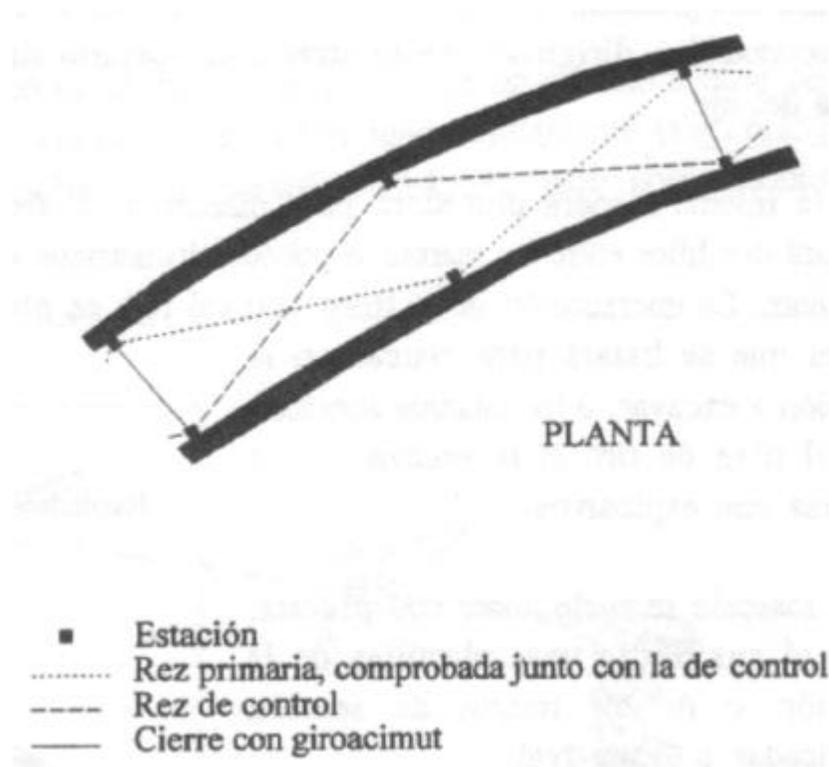


Fig. 4.18 *Replanteo mediante redes*

4.4.2.2.- Red de control.

La roca e incluso el revestimiento no están inmunes a los movimientos, por lo que se hace imprescindible el control y la verificación constante de la red inicial.

Se podrán utilizar las mismas estaciones que en la red primaria o disponer unas nuevas que mejoren la distribución. Incluso en ocasiones se proyecta una red cruzada con la primaria, ambas en zig-zag, y se efectúa el control de ambas.

Los instrumentos utilizados en la observación de esta red serán, a ser posible, teodolitos de 1° de apreciación con distanciómetro de precisión, aunque siempre dependerá de la longitud del túnel y de la tolerancia admitida en el encuentro, como ya se ha comentado.

En túneles de gran envergadura se suele disponer de gíroteodolito, considerado como instrumento de control puntual, y se utiliza para el cierre en dirección por anillos. Los teodolitos giroscópicos deben calibrarse en bases exteriores de acimut astronómico conocido antes y después de cada sesión de observaciones en el túnel.

Se volverá a observar, y en su caso a reponer, la red de control para hacer un levantamiento del túnel terminado y verificar las tolerancias de su diseño.

4.4.2.3.- Control del frente.

Consistirá en asegurar que tanto la excavación como el revestimiento estén dentro de los límites requeridos.

Desde las estaciones de la red primaria se establecerán unas líneas de referencia en cada zona del trabajo que podrán ser el propio eje del túnel o uno desplazado. En ocasiones se estacionará en estos puntos desde los que se prolongaran dirección y distancia al frente, pero frecuentemente se replanteará los puntos del eje basándose en la red primaria.

En cuanto a la red de nivelación interior y al replanteo altimétrico se procederá de igual manera que la descrita en el método de replanteo por el eje.

4.4.3.- Replanteos expeditos.

Sea cual sea la metodología empleada en el replanteo del eje del túnel, basándose en los puntos replanteados, situados normalmente cada 20 m, el encargado del tajo podrá marcar tanto eje como rasante en el frente de una manera expedita.

Para ello utilizará los últimos dos puntos replanteados, situados en el techo del túnel, de los que colgara una plomada. La alineación definida por los hilos de las plomadas la

proyectará en el frente de excavación, dirigiendo desde atrás a un operario situado en el frente que será el que marque la línea del eje.

De la misma manera procederá para marcar en el frente la rasante de excavación sobreelevada, tensara dos hilos entre las marcas o puntos altimétricos de los hastiales, para proyectar ese plano en el frente. La intersección de la línea vertical (eje en planta) con la línea de la rasante será el punto en el que se basara para marcar en la sección a excavar, o los taladros acotados en el plan de tiro si la excavación se realiza con explosivos.

Este mareaje se suele hacer con pintura, con el auxilio de unas plantillas de la sección o de los tramos de sección fabricadas a escala real.

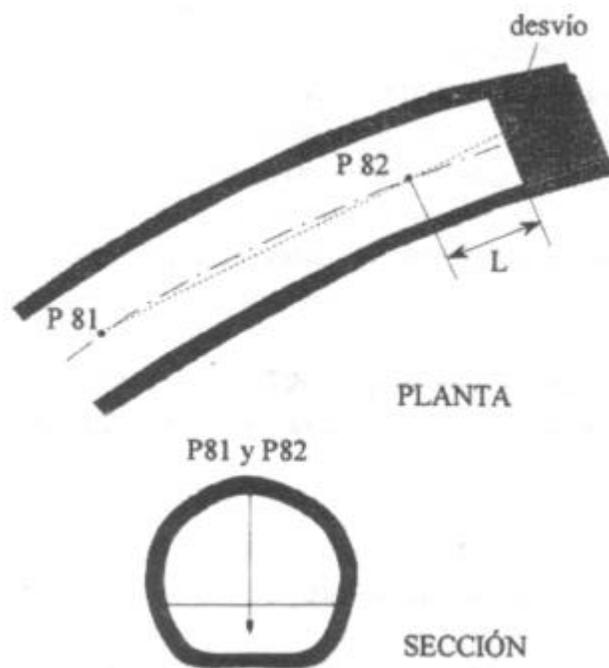


Fig. 4.19 *Replanteo expedito en el frente*

La descripción anterior serviría para una definición de eje, tanto en planta como en alzado, en recta, o para curvas de gran radio en las que la flecha se pueda considerar despreciable en una prolongación de algunos metros.

Sin embargo el replanteo expedito se puede utilizar incluso en curvas más cerradas calculando y tabulando los desvíos, tanto en planta como en alzado, del eje con respecto a la prolongación de la cuerda.

Las tablas fabricadas, de las que dispondrá el encargado del tajo, estarán en función de la distancia del último punto replanteado al frente, y deberá poderse hacer una interpolación lineal sin error significativo.

4.4.4.- Replanteos con láser.

Un simple emisor de rayos láser situado y alineado con el teodolito suministra una línea fácilmente identificable y un punto reconocible proyectado continuamente sobre el frente del túnel.

Situado convenientemente en la dirección del eje del túnel, o de un eje paralelo, y con la pendiente adecuada, materializa fácilmente tanto la línea como la pendiente. Los emisores de rayos láser pueden disponer de elementos para su perfecto estacionamiento sobre la plataforma en la que se ha replanteado el punto del eje, y tornillería para dirigirlo hacia otro también conocido.

Una de las precauciones necesarias será el uso de al menos una placa con un orificio central por el que atravesará el rayo, y que lo cortará en el caso de que se desvíe inadvertidamente (Fig. 4.20); la zona de utilización del rayo será a partir de dicha placa. Además se deberán hacer comprobaciones periódicas de su correcta situación.

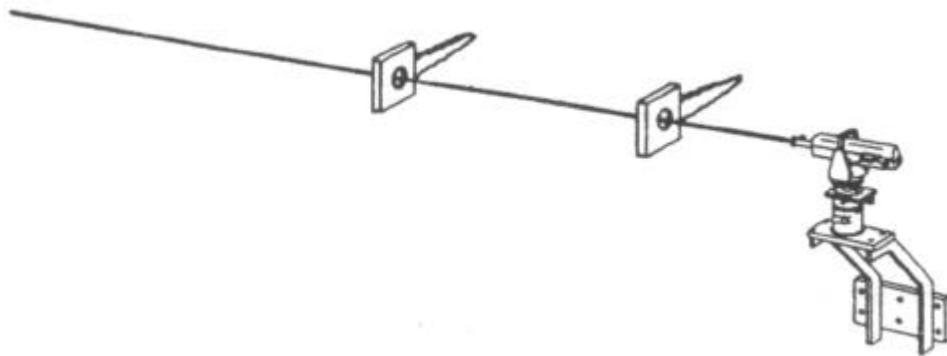


Fig. 4.20 *Posicionamiento del láser*

La longitud útil de operación estará limitada por la natural dispersión del rayo en la atmósfera del túnel y, por supuesto, por la definición geométrica del trazado. Con respecto a la primera limitación, al movernos en el ambiente oscuro del túnel, si interceptamos el rayo con una pantalla se puede observar en el centro del círculo que forma el haz láser, cuando la distancia al emisor es grande, un punto más luminoso, al que tomaremos las medidas (no obstante entre las características dadas por el fabricante se incluye la longitud óptima para su utilización). Son corrientes distancias de 200 m entre el frente de excavación y el emisor láser.

Por otro lado las limitaciones cuando la defunción del eje o de la rasante es curva se solucionan de igual manera que en los replanteos expeditos, es decir, tabulando los desvíos.

Los riesgos para la vista por observación directa no son muy grandes debido a la baja potencia del rayo. No obstante en las condiciones dentro del túnel, donde la iluminación general es escasa y, por consiguiente, está dilatada la pupila del ojo, los rayos láser se deberán situar de tal manera que hagan mínima la posibilidad de un impacto directo en el ojo de cualquier persona que se encuentre dentro del túnel.

Las líneas trazadas con láser tienen cada día mayor uso, ya que proporcionan una indicación visual continua de líneas y niveles y, a pesar de que también se les deberá someter a comprobaciones y ajustes, dejan libre al topógrafo para efectuar tareas menos rutinarias.

4.4.5.- Guiado de máquinas tuneladoras.

El replanteo de un túnel cuando la excavación se realiza con máquinas tuneladoras, se ve facilitada por la utilización de sistemas de guiado que indican al conductor la posición de la máquina en tiempo real respecto al trazado previsto.

Existen distintos sistemas: los más desarrollados son los dos que a continuación se describen, y que han sido los utilizados en el guiado de las tuneladoras usadas para la construcción del túnel bajo el Canal de la Mancha.

Ambos sistemas se basan en la determinación previa de una serie de puntos de coordenadas conocidas, red inicial, cuyas características ya se han descrito en el apartado "Replanteo de una red subterránea" de este mismo capítulo.

4.4.5.1.- Sistema de guiado ZED.

De fabricación inglesa, se trata de un sistema que marca un punto sobre un blanco electrónico solidario con la máquina tuneladora, y situado a unos metros por detrás de la cabeza de corte. El punto es la materialización sobre el blanco, de un haz láser que se emite desde una estación de la red, de coordenadas conocidas, y con una dirección y pendiente también conocida.

La posición del punto respecto al eje de la tuneladora se compara con las teóricas del trazado en el ordenador del sistema, y aparecen visualizadas en una pantalla situada junto al puesto de conducción las diferencias en milímetros entre la posición teórica y la real.

El sistema también calcula la tendencia de avance, que se consigue conocer comparando la posición del impacto del láser al atravesar dos placas transparentes separadas 30 cm. situadas en el mismo eje de la tuneladora que contiene al blanco electrónico, y a una distancia conocida de éste.

El centro de los impactos del haz láser se determina con perfección mediante sensores fotoeléctricos muy precisos. Dos clinómetros magnéticos controlan constantemente el cabeceo y el balanceo de la máquina. Se hace una impresión de dichas informaciones, sistemáticamente en cada avance correspondiente a la anchura de un anillo.

El ordenador del sistema es capaz de diseñar una trayectoria que lleve a la tuneladora al eje teórico, en el caso de que sea necesario, lo que se logrará no de una manera brusca, sino 100 o 200 m. más adelante, dependiendo de la magnitud del desvío.

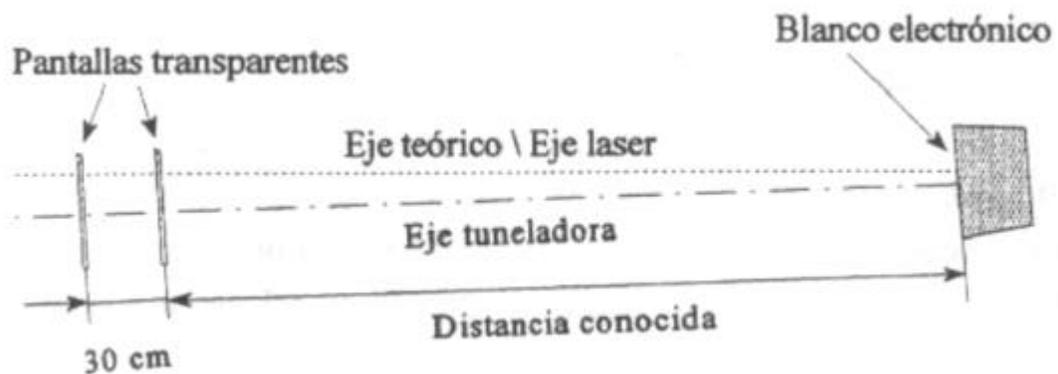


Fig. 4.21 Sistema de control ZED en la tuneladora

El instrumento topográfico utilizado es un teodolito de precisión provisto de un ocular láser. Una interfase del sistema ZED puede leer y mostrar en tiempo real los ángulos del teodolito, lo que evita la presencia permanente del técnico, que sólo intervendrá para prolongar la red de guiado y determinar las coordenadas de la nueva estación.

Un sistema ZED menos sofisticado utiliza un emisor láser convencional que define un eje de referencia. Este podrá ser el del túnel, uno paralelo o incluso uno cualquiera.

Se entiende que en las curvas se actuará de la misma manera, una vez conocida la distancia del emisor al blanco, complicándose aún más el cálculo para el ordenador del sistema.

4.4.5.2.- Sistema de guiado TUMA.

Este sistema, ideado por un geómetra alemán, pone en funcionamiento una estación total “de cabeza buscadora” (o motorizada) que, situada en una base de coordenadas conocidas y orientada, está conectada a un ordenador colocado en la cabina de conducción de la tuneladora. Dos prismas reflectores, fijos a la máquina y situados en una posición y eje (paralelo al de la tuneladora) conocidos, son leídos regularmente por la estación total que busca su puntería.

Las diferencias con relación al eje teórico aparecen en la pantalla del ordenador a cada avance de un anillo. También se visualiza la tendencia de la máquina y se imprimen los datos.

Este sistema exige la presencia constante de un operario, debido a la fragilidad del material empleado; no obstante, en caso de avería, es posible reemplazar la estación total motorizada por una clásica y realizar el trabajo manualmente.

4.4.6.- Control en la zona del “cale”.

Cuando la excavación del túnel se realiza desde dos o más frentes, norma habitual, los trabajos de replanteo deben tener la precisión necesaria para que el encuentro de los frentes se realice dentro de las tolerancias establecidas, según el tipo de túnel de que se trate.

La precisión no será igual para un túnel excavado en roca y sin revestimiento, que para uno cuyo revestimiento sea a base de dovelas prefabricadas, que apenas disponen de holgura para su ensamblaje.

Cuando no se tenga la seguridad de poder cumplir las tolerancias, será necesaria la excavación de una larga galería piloto, con el fin de comprobar los errores de cierre de los trabajos topográficos en dirección, cota y distancia, éste último de menor importancia, sobre todo en caso de alineación recta.

Esta operación permitirá rectificar la traza del túnel, en caso necesario en el tramo aún no excavado, y obtener un perfecto entronque.

Los ajustes de la traza se realizarán manteniendo los límites especificados de curvatura y pendiente. Normalmente será suficiente cambiar los puntos de tangencia de la misma curva o encajar una curva de gran radio si el enlace es en recta.

CAPITULO 5.- “Velocidad de avance en los túneles”

5.1.- Rendimiento de túneles con frente abierto.

La falta de medidas de seguridad en los túneles de fines del siglo XIX y principio del siglo XX hace que sus velocidades de avance no puedan ser consideradas hoy como representativas, ya que podría pensarse que la seguridad actual haga naturalmente ir a métodos más cuidadosos y lentos. En el túnel de Mont Cenis murieron 28 hombres, en el S. Gotardo 1 la cifra de muertos oscila según las fuentes entre 177 y 310, con 877 inválidos o heridos graves. En el Simplón 1 ya comenzaron las medidas de seguridad e higiene, aunque murieron 39 hombres. En el Loetschberg murieron 37 hombres, 12 por un desprendimiento de una ladera, en el Gran Apenino 97 hombres y en el San Gotardo carretero, 19 hombres. Los túneles actuales son mucho más seguros, incluso trabajando con frente abierto como en los casos de las Tablas 5.1 y 5.2. Sigue habiendo muertos en los túneles de frente abierto, pero los accidentes mortales en los túneles de tuneladora cerrada son casi inexistentes.

En la Tabla 5.1 se resumen los datos de los túneles más conocidos ejecutados a frente abierto, en general con perforación y voladura.

Tabla 5.1: Rendimientos De Túneles Con Frente Abierto

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

TÚNEL	Sección m²	Long. M	Comienzo	Fin	Metros/mes
Furka		15.400	Jun-73	jun-82	143
Seikan	100	53.850	Jun-64	jun-88	187
Somport Francia	75	2.865	Ene-94	ago-96	94
Pennes-Mirabeau TGV	95	1.530	Feb-96	feb-97	127
Tartaiguille TGV	180	2.338	Oct-95	jul-98	70
Marsella TGV	93	5.414	Ago-95	jul-98	153

El túnel de mejor construcción con frente abierto, según los datos, es el Mont Blanc, que tuvo un rendimiento total medio de 300 metros/mes. Este rendimiento no ha vuelto a obtenerse en ningún túnel manual. En la tabla 5.1 puede verse que sólo el Simplón 1 y el Arlberg, se le acercan con 262 y 244 metros al mes. Actualmente las velocidades de avance de estos túneles de frente abierto son muy bajas. Incluso en el reciente de Tartaiguille, del TGV Lyon-Marsella (España-Francia), que se pone como ejemplo de alguno de los métodos de frente abierto, los rendimientos han sido inaceptablemente bajos. Obtener 70 metros al mes de avance no es lo ideal en esta época.

En España se han construido todos los túneles de ferrocarril y autovía por el NMA y métodos similares de frente abierto, con rendimientos sumamente bajos y gran cantidad de incidentes. En la Tabla 5.2 se resumen algunos de éstos túneles españoles construidos por métodos de frente abierto.

Tabla 5.2: Rendimientos De Túneles Con Frente Abierto En España

TÚNEL	Sección m²	Long. m	Comienzo Excavación	Fin Revestimiento	Metros/mes
TÚNELES RENFE					
La Perruca (1884)		3.071	mar-80	jun-84	60
Argentera (1890)	35	4.040	nov-83	nov-90	48
Somport		7,810	jun-11	jul-28	38
Padornelo		5.971	1929	1955	19
La Engaña		6,976	sep-50	abr-59	65

Tabla 5.2: Rendimientos De Túneles Con Frente Abierto En España					
(Continuación)					
TÚNEL	Sección	Long.	Comienzo	Fin	Metros/mes
	m²	m	Excavación	Revestimiento	
<i>Fuente La Higuera</i>		<i>2,500</i>	<i>Dic-86</i>	<i>jun-91</i>	<i>42</i>
TUNELES AVE MADRID-BARCELONA					
Marivella	135	578	abr-97	ago-98	36
Paracuellos	75	4.796	mar-97	sep-00	113
Saviñán	110	549	mar-97	may-98	38
Purroy	110	842	jun-97	sep-98	57
Villanueva	100	1.020	abr-97	abr-99	43
Los Cortados	95	325	feb-98	ene-99	30
Las Hechiceras	100	2.835	may-97	jun-99	114
TUNELES AVE MADRID-SEVILLA					
La Veredas	100	1.296	jul-88	dic-89	78
Venta de la Inés	100	1.670	jun-88	feb-90	80
Horcajo	100	1.192	abr-88	mar-90	51
Garganta	100	1.531	abr-88	abr-90	62
Caños	100	614	jul-88	jul-90	26
Del Valle	100	290	dic-88	oct-89	30
Piedra de la sal	100	2.540	Feb-88	ago-90	85
Churreteles altos	100	517	may-89	jul-90	36
Escribano	100	259	feb-88	abr-89	18
Alto Acebuchoso	100	461	sep-88	nov-89	33
Piedras del aire	100	313	sep-88	sep-89	25
Loma del Partidor	100	1.870	feb-88	abr-90	73

Tabla 5.2: Rendimientos De Túneles Con Frente Abierto En España					
(Continuación)					
TÚNEL	Sección m²	Long. m	Comienzo Excavación	Fin Revestimiento	Metros/mes
CARRETERA Y AUTOVÍA					
Cadí	80	5,000	ene-82	ago-84	161
Viella		5,133		1948	
Túneles M-40	203	1.520	ago-93	sep-95	61
Somport España	90	5,759	7-jun-94	26-feb-98	130
Miravete (2*1.150)	96	2,295	nov-93	ago-95	109
Guadarrama 1	80	2,777	feb-61	may-63	103
Guadarrama 2	105	3,345	oct-69	may-72	107
Trabadelo		502	nov-98	jul-99	60

En el caso del túnel de Somport España, el Ministerio de Obras Públicas utilizó un excelente Tamrock computarizado de 3 brazos. Se utilizó además una pequeña TBM abierta para el avance de otro de los ataques a partir del viejo túnel de FFCC, cuyo ensanche posterior se hizo por voladura. En el túnel Paracuellos, AVE Barcelona, licitado el 22 de Febrero de 1996 se utilizó la misma pequeña TBM, aunque el ensanche se hizo con ensanchadora mecánica abierta. Pese a que en ambos túneles las empresas constructoras y consultoras fueron de las mejores de España, y la experiencia y competencia de la Dirección de Obra por parte de la Administración eran también extraordinarias, los avances medios reales (comienzo de excavación a fin del revestimiento definitivo) fueron muy bajos. Realmente los rendimientos obtenidos son los mismos del túnel de S. Gotardo de 1882 (pese a que en éste las barrenas eran de 1 m y en Somport hasta de 21 pies), y la mitad del Simplón 1 de 1905. Y ello se debe probablemente a que en ambos casos se decidió no utilizar la nueva tuneladora cerrada que se había propuesto, sin duda porque no figuraba en los Proyectos correspondientes.

Probablemente el mejor túnel español construido con frente abierto es el túnel del Cadí, con un rendimiento medio total de 161 metros al mes.

El túnel español de mayor sección es el enorme túnel de la M-40 en Madrid bajo el Monte del Pardo. En estos túneles se han utilizado los dos métodos (Nuevo Método Austríaco o NMA y Precorte Mecánico o Premill). En estos túneles no ha habido accidentes importantes. Pero sin embargo el Precorte ocasionó el terrible colapso de Tolón el 15 de Marzo de 1996, y en un terreno similar, en los túneles de Sinesio Delgado, muy cerca de la M-40, el NMA y el frente abierto había ocasionado un grave hundimiento con un muerto.

Ejemplo: Túnel Fuente La Higuera 1

Como ejemplo de lo que puede ocurrir en un túnel ejecutado con gran sección de frente abierto, se resumen las fechas más significativas de este pequeño túnel. Debía tener una longitud de 2.500 metros, pero los hundimientos de las grandes trincheras de entrada y salida en los emboquilles dejaron una longitud de 2.200 metros. Con una sección total de 90 m² se construyó por el Nuevo Método Austríaco, excavando la bóveda con rozadora, y la destroza con retroexcavadora.

Túnel Fuente La Higuera 1

Inicio perforación en boca Norte 1-Dic-1986

Parada perforación boca Norte 18-Sep-1987

Reanudación avance boca Norte 14-Jun-1988

Inicio perforación boca Sur 22-Sep-1987

Hundimiento boca Sur 19-Nov-1987

Recuperación de la rozadora 21-Abr-1988

Reanudación avance boca Sur 15-Mar-1989

Cale del avance del túnel 15-Nov-1989

Fin de la destroza 15-May-1990

Fin de los bataches 20-May-1990

Fin del revestimiento definitivo 15-Jun-1991

El túnel se construyó sin una sólida contrabóveda, para ahorrar, y el tramo se puso en servicio a principios de 1997. La falta de solera y la zanja central construida en ella llevaron a que al poco tiempo de ponerse en servicio el agua se infiltrara, levantando la vía. Las reparaciones terminaron a mediados del año 2000, y durante los 4 años transcurridos los trenes han tenido que circular con limitaciones de velocidad de hasta 40 km/h en una vía y 50 km/h en la otra. No se ha podido saber aún el coste final del túnel, para valorar las consecuencias de aquél ahorro en el proyecto.

No se dispone aún, desgraciadamente, de los datos exactos de construcción de muchos de los túneles de RENFE en las zonas de Asturias y Galicia. Tan sólo figura en la relación el túnel La Perruca, que se construyó a 60 metros/mes. En el túnel de Argentera realmente no se trabajó durante todo el año 1885 por problemas contractuales, de forma que su rendimiento real es de unos 57 metros/mes en lugar del túnel de Padornelo (5.971 m), el más largo de FFCC hoy en servicio, se han podido conseguir muy pocos datos, los años de comienzo y fin, pero no los días. Del de La Engaña, el más largo de la red (6.976 m) pero que nunca entró en servicio, tampoco se ha podido conseguir muchos datos.

5.2.- Rendimiento de túneles con el método clásico.

Este método consiste en la construcción de una pequeña galería de avance de unos 3 m² de sección, que posteriormente se va ensanchando. Hormigonada la bóveda, se va construyendo poco a poco la destroza, hastiales y contrabóveda hasta cerrar por completo el anillo. La descripción detallada del método puede verse en el capítulo 3. Los avances obtenidos en la construcción del Metro de Madrid por este método, lento pero muy seguro, se indican en la Tabla 5.3

Tabla 5.3: Túneles Por Método Clásico Del Metro De Madrid

Túnel	Longitud m	Ataques	Meses	Rendimiento medio Metros / mes	Avance máximo Metros / mes
Unión Líneas 8-10	1.033	4	15	69	150
Unión Líneas 7-10	1.050	2	7	150	305
Línea 7 Cea Bermúdez	980	4	7	140	155
Línea 10 P.Pío- Pl.España	1.094	2	16	68	196
Línea 1 Vallecas	1.715	6	16	107	171

5.3.- Rendimiento de túneles mecanizados en suelos o rocas blandas.

En las Tablas 5.4 a 5.10 se resumen los datos de los túneles más conocidos ejecutados por métodos mecanizados.

5.3.1.- Canal de la Mancha.

Aunque hubo 10 muertos, y no hay justificación para ello, éste enorme túnel es el túnel mejor construido del mundo, y es el ejemplo a seguir en cualquier proyecto de túneles actual

En la Tabla 5.4 se resumen los 12 túneles del Canal de la Mancha. El Canal, como se sabe, está formado por 3 túneles, los de tren de unos 9 m de diámetro de excavación y el de servicio, entre los dos anteriores, de unos 6 m de diámetro. Cada uno de estos túneles se dividió para su construcción en dos partes, la inglesa y la francesa. Y cada una de estas dos partes se dividió a su vez en otras dos, la del lado mar, de unos 20 km de longitud, y la de tierra, de 8 km de longitud en Inglaterra y 3 km en Francia. De esta forma el proyecto se construyó en 12 partes. Sólo se utilizaron 11 tuneladoras, sin embargo, ya que los túneles de tren tierra lado Francia (T5 y T6 en la Tabla) pudieron hacerse con la misma máquina.

Las tuneladoras del lado inglés fueron abiertas, apoyadas por grippers, mientras que las francesas fueron cerradas, tipo EPB. Los rendimientos medios, como puede verse, llegaron a superar los 800 metros/mes en las inglesas, y llegaron a 700 m/mes en las francesas.

Tabla 5.4: Túneles Del Canal De La Mancha

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

Tabla 5.4: Túneles Del Canal De La Mancha (Continuación)						
Túnel	Diam. m	Long. m	Equipo	Comienzo	Fin	Metros/ mes
T5 Tierra Tren N. Francia	8.64	3,265	EPB Mitsubishi	30-ene-89	18-dic-89	308
T6 Tierra Tren S. Francia	8.64	3,265	EPB Mitsubishi	23-feb-90	29-nov-90	356
T1 Mar Servicio Francia	5.77	15,618	EPB Robbins	02-mar-88	31-oct-92	279
T4 Tierra Servicio Francia	5.61	3,162	EPB Mitsubishi	28-jun-88	27-abr-89	318

Naturalmente la tuneladora abierta es más rápida que la EPB porque no tiene que esperar a colocar el anillo de revestimiento para seguir perforando, ya que al terminar cada avance, apoyando con los pequeños grippers de cabeza, adelanta el escudo, retrae los gatos principales de empuje y continua excavando mientras coloca el anillo. Por ello su rendimiento teórico es mucho mayor que la tuneladora cerrada, que precisa colocar el anillo de revestimiento para continuar excavado apoyando los gatos sobre él.

Los ingleses eligieron tuneladoras abiertas que efectivamente, son más rápidas, como se ve. Pero ¿y si hubiera habido una penetración de agua del océano, como pasó en el Storebaelt?. En el Storebaelt las EPB fueron cerradas, y pese al fallo de no poder cerrar la esclusa, las tuneladoras inundadas por el Báltico pudieron recuperarse, pero en La Mancha no hubiera habido solución si ocurre un problema similar. Curiosamente, los ingleses autorizaron también 3 tuneladoras abiertas en la ampliación reciente de la línea Jubilee del Metro de Londres, aunque en los tramos en que se usaron estas tuneladoras hubo que hacer tantos tratamientos e inyecciones de compensación de asientos (realizados en gran parte por una empresa especializada española) que éstas compensaciones y mejoras del terreno costaron más que 10 máquinas cerradas. Recientemente también se han utilizado dos tuneladoras abiertas en el Metro de Atenas, donde los derrumbes y colapsos han sido constantes, y se ha tardado más de 10 años en construir 12 km. de Metro a un costo 5 veces superior al de Madrid. Es más, en la ampliación del Metro de Madrid se intentó con fuerza utilizar tuneladoras abiertas, más baratas que las EPB. Pero la tuneladora abierta es un riesgo enorme, y en un túnel no se debe correr ningún riesgo. En el Canal de la Mancha se utilizó también el NMA en las dos grandes cavernas de cruce, no debía haberse hecho así, sino, dadas las características del terreno, utilizando el método alemán, construyendo primero los hastiales, luego la bóveda por costillas

y finalmente la contrabóveda. El reciente colapso de la estación de Olivares, en el Metro de Lisboa, es un ejemplo de la terrible catástrofe que podía haber ocurrido con el NMA en La Mancha, con estas grandes luces y bajo el océano.

5.3.2.- Ampliación del Metro de Madrid

En la Tabla 5.5 se resumen los 11 túneles de la Ampliación del Metro de Madrid construidos con tuneladoras EPB. Se incluye también el túnel de Alcobendas, que el Ministerio construyó con la EPB Mitsubishi que acababa de terminar la Línea 8 tras hacer el tramo de Pitis de Línea 7. Se incluye también el tramo de Metro de Valencia que había construido la misma Herrenknecht que se usó en Madrid para construir el tramo de Feriales de Línea 8. El diámetro de esta última máquina era muy estricto, y se tuvo que reducir el espesor de dovela en 5 cm para obtener el gálibo. Los gatos apoyaban mal, descentrados, y no se volvió a usar.

Tabla 5.5: Túneles Del Metro De Madrid

Túnel	Diam. m	Long. m	Equipo	Comienzo	Fin	Metros/ mes
Línea 7 Pitis	9.38	3,234	EPB Mitsubishi	23-abr-97	09-mar-98	307
Línea 7 Valdezarza	9.38	3,443	EPB Herrenknecht	23-ago-97	15-sep-98	269
Línea 4 Hortaleza	9.38	3,608	EPB Mitsubishi	25-may-97	09-may-98	314
Línea 9 Vicálvaro	9.38	3,545	EPB Herrenknecht	17-jun-97	13-ago-98	254
Línea 8 Feriales	7.40	2,108	EPB Lovat	22-jul-97	03-dic-97	477
Línea 8 Feriales	6.52	1,958	EPB Herrenknecht	18-ago-97	10-mar-98	290
Línea 8 Aeropuerto	9.38	3,567	EPB Mitsubishi	17-jul-98	23-feb-99	490
Línea 8 Aeropuerto	9.38	1,442	EPB Mitsubishi	13-oct-98	10-feb-99	366
Línea 10 Pozo-S.V.	7.40	305	EPB Lovat	06-ago-96	10-sep-96	265
Línea 10 Vía 2	7.40	761	EPB Lovat	02-abr-96	21-jun-96	289
Línea 10 Pozo-T.	7.40	504	EPB Lovat	15-ene-96	01-mar-96	333
Cerc. Alcobendas	9.38	1,629	EPB Mitsubishi	08-jun-99	27-ago-99	619
Metro Valencia	6.52	5,372	EPB Herrenknecht	29-oct-94	06-mar-97	190

En los túneles de Metro de Madrid que no han atravesado estaciones (Línea 8 feriales de 2.1 km. y Línea 8 Aeropuerto de 3.6 km.) se han obtenido avances de hasta 619 metros/mes, con avances de más de 800 metros en 31 días. Los túneles Línea 7 Pitis (3.2 km.), Línea 8 Aeropuerto (3.6 km.) y Cercanías Alcobendas (1.6 km.) fueron construidos por la misma máquina "Adelantada", una Mitsubishi-NFM, uno a continuación del otro, y el tercer túnel construido, el Cercanías Alcobendas, que lo fue para el Ministerio, llegó ya a los 619 metros a los 10 km. de túnel total y por tanto con los equipos ya bastante experimentados tras dos montajes y desmontajes. En La Mancha, las tuneladoras cerradas francesas, las grandes nº 75 y 76, hicieron 670 y 697 metros/mes de media, y las grandes nº 77 y 78 del lado tierra hicieron 308 y 356, de forma que en la práctica casi se ha igualado a las del lado mar, y se ha superado a las del lado tierra.

Los avances máximos han sido los que se detallan en la Tabla 5.6. En 31 días calendario los avances máximos han superado los 500 metros, excepto la EPB pequeña que vino del Metro de Valencia. Las tuneladoras grandes han superado todas los 600 metros en 31 días (582 en el caso de Vicálvaro), y han llegado a los 852 en el caso del tercer túnel de la tuneladora "Adelantada".

Tabla 5.6: Avances Máximos De Las EPB De Madrid

Línea	EPB	Diámetro	Longitud	Empresa	Avance máximo, m		
					1 día	7 días	31 días
4 Hortaleza	Mitsubishi	9.38	3.608	Dragados	37.5	256.5	558.0
7 Pitis	Mitsubishi	9.38	3.234	FCC	31.5	180.0	609.0
9 Vicálvaro	Herrenknecht	9.38	3.545	NECSO-Ferrovial-ACS	31.5	172.5	582.0
7 Valdezarza	Herrenknecht	9.38	3.443	NECSO-Ferrovial	27.0	187.5	618.0
8 Feriales	Lovat	7.40	2.108	Dragados	37.2	204.0	728.4
8 Feriales	Herrenknecht	6.52	1.958	NECSO-ACS	37.2	153.5	438.0
8 Barajas	Mitsubishi	9.38	3.567	FCC	39.0	229.5	792.0
8 Barajas	Mitsubishi	9.38	1.442	Dragados	34.5	225.0	621.0
RENFE Alcobendas	Mitsubishi	9.38	1.629	FCC	42.0	232.5	852.0

Esta tuneladora "Adelantada" es un ejemplo excelente de cómo va mejorando el rendimiento conforme el equipo va haciendo más túnel. La Tabla 5.7 indica los rendimientos obtenidos en los tres túneles sucesivos de esta máquina con el mismo equipo. Es un ejemplo además de la importancia del método constructivo. El tramo de RENFE de Alcobendas (6.8 km. en superficie, con tres pequeños túneles de 150, 1.400 y 1.629 m) se licitó el 17 de Julio de 1995 y se espera ponerlo en servicio a finales del 2000. Se utilizó para el túnel 2 (aprox. 1.4 km.) una entibadora de lanzas de frente abierto, máquina similar a las que ya en 1973 se habían utilizado en el Metro de Madrid. La máquina no funcionó adecuadamente y hubo que desmontarla y terminar más de 1.000 metros de túnel por el método clásico. Para el tercer túnel se utilizó la tuneladora EPB y el equipo humano que la Comunidad de Madrid acababa de utilizar para los túneles de la línea 7 y 8, y el túnel se construyó en tres meses.

Tabla 5.7: Mejora De Los Rendimientos Con La Longitud Del Túnel

Túnel	Long. M	Estaciones atravesadas	Total días calendario	Metros / día cal.	Metros/mes Media total	Máximo, metros en		
						1 día	7 días	31 días
7 Pitis	3.234	4	317	10.2	307	31.5	180.0	609.0
8 Barajas	3.567	0	221	15.1	490	39.0	229.5	792.0
RENFE Alcobendas	1,629	0	76	21.4	619	42.0	232.5	852.0

Las tuneladoras del Metro de Madrid sólo son superadas en rendimiento por tuneladoras de roca, con grippers, de menores diámetros. La tuneladora "Isabel", utilizada en el túnel del Tránsito Guadiaro-Majaceite, en Cádiz, es un excelente doble escudo telescópico, que puede trabajar tanto como TBM de roca (sin parar de excavar) como una EPB de suelos. La máquina llegó a hacer 1.335 metros en Noviembre de 1996, y su rendimiento medio llegó a 742 metros/mes. Más aún, al terminar este túnel la máquina pasó al túnel Daule-Esperanza, de Ecuador, donde en un mes superó los 1.605 metros, y su rendimiento medio fue de 922 metros/mes. En estos momentos está en el proyecto hidráulico de Lesotho, en Sudáfrica, donde en Julio 1999 comenzó a construir la mitad del túnel de Mohale (32 km), aunque en Diciembre pasado ha tenido que pararse para cambiar la cabeza cortadora por rotura. Lamentablemente, esta tuneladora podía haberse utilizado en primavera de 1997 para hacer las galerías de los túneles de Guadarrama, Pajares y Vignemale en lugar de permitir que saliera de España hacia Ecuador.

Para entender la diferencia entre el funcionamiento de una tuneladora que excava apoyando sobre el anillo de dovelas que acaba de construir, tipo EPB o Slurry, y las tuneladoras de roca tipo TBM que apoyan por grippers, se detallan a continuación algunos ciclos de trabajo típicos.

Tabla 5.8: Comparación De Avances EPB Y TBM

	EPB - SLURRY	TBM ROCA
Operación	Minutos	Minutos
Excavación	25	20
Grippers cabeza, avance escudo	No	5
Colocación de anillo	22	Durante excavación
Ajuste de gatos	2	0
Ciclo total, minutos	49	25
Avances teóricos en 24 hrs	29	58
Longitud de dovela, m	1,5	1,5
Avance teórico en metros / mes (teórico máximo sin paradas, averías ni mantenimientos)	1.305	2.610
Avances reales máximos en 24 hrs	28 anillos	60 anillos

El avance máximo que se cita de las EPB son los 28 anillos (L=1,5 m) colocados el 10 de Julio del 99 en el túnel Cercanías Alcobendas, los 27 colocados en varias ocasiones en el túnel Línea 7 Pitis en Metro de Madrid, los 31 (L=1,2 m) colocados el 16 de Octubre del 97 en el túnel Línea 8 feriales y en las TBM son los 60 anillos (L=1,3 m) colocados el 23 Octubre 96 en el túnel Traslase Guadiaro-Majaceite.

Naturalmente, el tiempo de excavación depende del suelo o de la roca. Pero con los cortadores de disco adecuados, la máquina de roca, a igualdad de diámetros, empujes y potencias, tardarán siempre menos. Las de suelos tienen que mezclar lo excavado con la espuma o el polímero, amasar e ir extrayendo el suelo de la cámara por el tornillo a velocidad controlada, manteniendo las presiones en cámara y tornillo dentro de su rango. El desgaste de discos cortadores en las rocas duras no será superior al desgaste de picas, rastrillos y discos en el Metro de Madrid, donde se ha llegado a cambiar todas las 190 picas de alguna EPB en sólo 40 m de túnel por la abrasividad de la sílice. Como puede verse, la velocidad de excavación de

una buena tuneladora en roca puede ser casi del orden del doble que en el caso de las EPB o Slurry de suelos, donde todo el tiempo empleado en colocar el revestimiento no se aprovecha para avanzar. Aún así, las tuneladoras del Metro de Madrid han llegado a los 852 metros en 31 días.

5.3.3.- Storebaelt. Túnel de unión del continente con Copenhague

Este es un ejemplo, ya clásico, de un proyecto realizado con EPB pero cuya gestión fue mala, tanto en la selección y especificaciones de las 4 tuneladoras EPB como en la ejecución de la obra. En la Tabla 5.9 se resumen los avances de los túneles.

La historia de este proyecto debe leerse y estudiarse con detalle. Ha habido roturas de las máquinas, inundaciones, islas artificiales, congelación del terreno del fondo del Báltico y hasta incendios en las EPB. Puede verse que los rendimientos totales finales fueron inaceptablemente bajos, parecidos a los de los túneles sin mecanizar construidos por el NMA o el Premill.

Tabla 5.9: Túneles Del Storebaelt

Túnel	Diam m	Long. m	Equipo	Comienzo	Fin	Metros/ mes
Storaebelt Dania	8.78	1,900	EPB Howden	14-nov-90	01-abr-95	36
Storaebelt Selandia	8.78	1,900	EPB Howden	23-ago-90	01-abr-95	34
Storaebelt Jutlandia	8.78	5,500	EPB Howden	19-nov-90	17-may-94	131
Storaebelt Fionia	8.78	5,500	EPB Howden	30-ene-91	01-abr-95	110

5.3.4.- Otros proyectos de túneles mecanizados en suelos o rocas blandas

En la Tabla 5.10 se resumen otros proyectos de túneles mecanizados construidos con frente cerrado, tuneladoras EPB o de lodos (slurry). En general en países como Alemania y Holanda, de suelos extraordinariamente blandos, se prefiere la tecnología de slurry a la de presión de tierras o EPB.

Tabla 5.10: Otros Túneles Mecanizados En Suelos

Túnel	Diam. m	Long. m	Equipo	Comienzo	Fin	Metros/ mes
Elba 4 tunel, Hamburgo	14.14	2,561	Slurry Herrenk	15-oct-97	02-mar-00	90
Caluire S. Bulevar perif. Lyon.	11.02	3,230	EPB NFM	17-mar-97	26-may-98	226
Metro Lisboa. Linea D	9.84	2,094	EPB Lovat	19-mar-96	10-dic-97	101
Metro Lille L2	7.72	3,962	EPB FCB	02-may-95	27-mar-97	173
Caluire N. Bulevar perif. Lyon.	11.02	3,252	EPB NFM	16-sep-94	18-oct-96	130
Sifón El Salaam – 1. Canal Suez	6.34	770	Slurry Herrenk	29-jun-95	01-dic-95	151
Metro Munich Lot 1 West 5	7.35	2,348	Slurry Herrenk.	08-sep-94	30-oct-95	171
METEOR Bastille- Madeleine	8.60	4,500	Slurry HDW	15-sep-93	10-ago-95	197
FFCC Essen 2	8.33	2,015	Slurry Herrenk.	01-ago-94	20-jun-95	190
Metro Roma	10.64	900	Alpine westfalia	13-jul-94	20-mar-95	110
Metro Lyon. Linea D-2	6.27	890	Slurry Herrenk.	16-ago-94	07-mar-95	133
Saint Clair, Canadá-USA	9.53	1,800	EPB Lovat	15-oct-93	08-dic-94	131
Colector Nanterre	4.84	630	EPB Lovat	09-feb-94	22-sep-94	85
Metro Lille L2	7.72	3,375	EPB FCB	13-oct-92	12-jul-94	161
FFCC Essen 1	8.33	2,016	Slurry Herrenk.	10-feb-93	20-feb-94	164
Metro Colonia	6.60	2,466	Slurry Herrenk.	10-dic-92	30-ene-94	180
Passante Ferroviario 1, Milán	8.03	2,030	EPB Mitsub- NFM	03-sep-92	07-nov-93	144
Tranvía Estrasburgo	8.27	1,200	Slurry Herrenk	30-jun-92	26-mar-93	136
Colector Sevres Acheres	4.84	5,830	EPB Lovat	23-nov-90	27-ene-92	412

La máquina mayor del mundo es la del túnel Elba 4 túnel, Hamburgo (el 4º túnel bajo el Elba en Hamburgo). Esta máquina, al terminar su trabajo, ha pasado a Moscú donde comenzará en breve la construcción de un periférico carretero en la ciudad.

Realmente hay 8 máquinas mayores, las EPB que construyeron el túnel bajo la bahía de Tokio, pero todavía ha sido imposible conseguir los datos de los rendimientos de estos túneles. En Japón las máquinas, incluso las enormes como éstas, se amortizan en un solo proyecto y es muy raro que se reutilicen.

En Septiembre del 2000 se anunció la construcción de otra máquina de slurry aún mayor, de 15 m de diámetro. Esta máquina Mitsubishi-NFM fué utilizada para el tren de alta velocidad de Bélgica a Holanda, con las dos vías dentro separadas por una pared interior.

Puede verse que los rendimientos de estos túneles en suelos y rocas blandas son bajos. Solamente los pequeños diámetros superan los 300 metros de avance mensual. Y naturalmente, a menor diámetro, menos minutos se tarda en la excavación y en la colocación del revestimiento a igualdad de otros factores.

5.4.- Rendimiento de túneles mecanizados en rocas duras.

En la Tabla 5.11 se resumen los datos de los túneles más conocidos ejecutados por métodos mecanizados en roca dura. Toda Europa está hoy ocupada construyendo o proyectando los grandes túneles alpinos de base antes citados. Puede verse que en los últimos 10 años ha habido una verdadera explosión en la construcción de túneles con equipos de frente cerrado. En dicha tabla figuran 14 grandes túneles europeos con diámetros de tuneladora superiores a los 11 metros, y hay más de otros cinco terminados o en construcción que no se han incluido.

Tabla 5.11: Túneles Mecanizados En Roca Dura

Túnel	Diam. m	Long. m	Equipo	Comienzo	Fin	Metros / mes
EUROPA. TUNELES ALPINOS						
Thalwil 1, Zurich	12.24	6,330	TBM Herrenknecht	15-sep-98	09-dic-99	428
Murgenthal	12.03	4,257	TBM Herrenknecht	01-oct-97	24-sep-98	362
Pomy 1, Suiza	11.66	2,650	TBM Herrenknecht	06-feb-95	18-mar-98	71
Pomy 2, Suiza	11.66	2,650	TBM Herrenknecht	24-jun-96	05-may-97	256
Les Vignes Norte, Suiza	11.80	2,380	TBM Herr. abierta	26-oct-94	04-sep-95	231
Les Vignes Sur, Suiza	11.80	2,380	TBM Herr. abierta	05-ago-93	09-sep-94	181
Grauholz	11.60	3,420	TBM Herrenknecht	15-ene-90	10-feb-92	138
Bozberg (2*3200)	11.80	6,400	TBM Herrenknecht	jul-90	jun-93	184
Mont Russelin	11.74	2,371	TBM Herrenknecht	feb-91	nov-91	255
Sachseln	11.77	1,325	TBM Herrenknecht	feb-93	jul-93	269
Bruyeres	11.77	1,600	TBM Herrenknecht a.c.	nov-96	nov-97	133
Adler	12.54	4,100	TBM Herrenknecht	nov-95	ene-97	292
Gorgier N	11.77	2,720	TBM Herrenknecht	Jul-98	Jul-99	250
Gorgier S	11.77	2,720	TBM Herrenknecht	sep-99	jun-00	270
Quinling Norte, China	8.80	5,255	TBM Wirth	15-feb-98	31-ago-99	284
Quinling Sur, China	8.80	5,621	TBM Wirth	10-ene-98	22-ago-99	290
Pinglin N, Taiwan	11.90	12.900	TBM doble escudo WIRTH	15-abr-95	DESASTRE	0
Pinglin S, Taiwan	11.90	12.900	TBM doble escudo WIRTH	12-jul-95	DESASTRE	0

Tabla 5.11: Túneles Mecanizados En Roca Dura (Continuación)						
Túnel	Diam.	Long.	Equipo	Comienzo	Fin	Metros / mes
	m	m				
Lesotho Ash, Sudafrica	5.40	11,011		01-may-92	07-nov-93	604
Lesotho Caledon	5.40	8,037		15-mar-94	01-mar-95	697
Guadiaro-Majaceite	4.88	12.195	NFM doble esc telesc	20-sep-95	01-feb-97	742
Daule-Esperanza	4.88	8.270	NFM doble esc telesc	20-ago-97	20-may-98	922
Trasvase. Villarejo	5.50	4.941	TBM Robbins abierta	ago-70	ago-73	124
Trasvase. Talave	5.05	32.800	5 TBM abiertas	jun-70	jun-80	273
Doukkala (NECSO)	7.20	10.660	TBM abierta	abr-96	dic-97	542
Matmata (NECSO)	5.30	11.937	TBM abierta	feb-88	dic-89	543
Evinos-Mornos Grecia	1, 4.20	8,090	TBM + NATM	22-ene-93	6-jun-94	492
Evinos-Mornos Lepanto	2, 4.04	9,697	TBM EPB doble escudo	28-jul-93	4-sep-94	732
Evinos-Mornos Lepanto	3, 4.04	7,421	TBM EPB doble escudo	28-ago-93	4-feb-95	430
Evinos-Mornos Lepanto	4; 4.20	4,185	TBM + NATM	31-ago-93	12-jul-94	404

Se ha utilizado todo tipo de tecnologías en estos túneles, siempre con escudo. Desde escudos abiertos con aire comprimido (Bruyeres) hasta escudos TBM típicos que pueden transformarse en escudos slurry en pocas horas. La mejor forma de profundizar en la tecnología conveniente para cada nuevo túnel es el estudio de cada uno de estos recientes proyectos y las reuniones con fabricantes de equipos y con los ingenieros, tanto de la contrata como del Cliente, que los han construido. Y siempre con el espíritu muy crítico y sin hacer caso a los “expertos”. Recuérdese que en el Metro de Munich se ha venido utilizando el NMA desde las olimpiadas de 1972 para la construcción de túneles, y han tenido al menos 7 grandes colapsos y hundimientos. Recuérdese también que en el Metro de Madrid nos ofrecían en 1996 tuneladoras EPB con muy bajo par motor en la cabeza de corte, unos 1.500 m, y muy pequeño empuje, unas 6.000 T en total, el tipo de tuneladoras que se estaban construyendo esos años para diámetros similares de 9.5 metros, como las de Lisboa o El Cairo.

El ingeniero exigió 2.000 m. de par de desbloqueo y 10.000 T de empuje, ante la estupefacción y las críticas de los fabricantes (NFM y Martin Herrenknecht), y terminados los túneles se reconoció por los fabricantes que estos parámetros incluso podían haberse aumentado. Así se ha hecho en la última tuneladora Herrenknecht de la Ampliación de Metro de Madrid, que en lugar de 14 motores lleva 17, con un par de desbloqueo de 3.000 m.

Las tuneladoras deben seleccionarse con sumo cuidado, y esta decisión no debe dejarse sólo en manos de los contratistas o de los fabricantes, aunque realmente éstos sean los que más saben por su enorme experiencia, tanto unos como otros. Pero es responsabilidad de la Administración la selección del mejor equipo posible para su túnel. De otra forma aparecerán los problemas contractuales. Como ejemplo se cita el mayor desastre de los túneles mecanizados en roca dura, que es sin duda el de los famosos túneles de Pinglin, en Taiwan. Estos dos túneles gemelos son los más largos de la autovía entre Taipei al oeste e Ilan, al este de la isla. La historia de este famoso proyecto debe estudiarse también con detalle, escuchando a fabricantes y contratistas, porque, como se indica, es el desastre mayor de los conocidos en los túneles mecanizados. Se construyó con frente abierto, para ver el macizo rocoso, un túnel piloto de 4.8 m de diámetro entre los dos grandes túneles, que debía servir como avance de datos para éstos y que no sirvió porque finalmente las TBM le alcanzaron. Las 2 tuneladoras TBM compradas llegaron a la obra en Abril y Julio de 1995, fueron las mejores en que se puede pensar, dos excelentes equipos WIRTH de 12 m de diámetro, dobles escudos telescópicos capaces de trabajar en roca dura y como EPB al atravesar fallas o zonas blandas. Pues bien, el túnel es un desastre, se ha invalidado el contrato con el primer contratista principal (un excelente constructor francés), ha habido problemas técnicos y contractuales de todo tipo y hoy esas dos magníficas tuneladoras tienen la cabeza desmontada y se están utilizando sólo como medio de extracción de los escombros de excavación, que se está haciendo con perforación y voladura. No pueden darse aquí detalles de las discusiones contractuales que ha habido, pero sí puede indicarse que todo el problema parece haber comenzado por una discusión entre Contratista y Cliente, a través del Project Manager, sobre si la inyección de gravilla y mortero en el trasdós y otros tratamientos del terreno estaban o no incluidos en los precios y si debían o no pagarse aparte. Se debe tener en cuenta que intentar contratar un túnel a precio fijo, como si se fuera a comprar una barra de pan, es desconocer totalmente lo que es un túnel, lo que es la Geotecnia y lo que debe hacer una buena Administración Pública. Lamentablemente, en muchas ocasiones ello ocurre también en otras partes del mundo.

CONCLUSIÓN

La construcción de un túnel depende fundamentalmente de 2 factores: lo que entrega el terreno (Geología) y los métodos de construcción, los cuales están íntimamente relacionados con la forma del terreno en el cual se realizará el túnel.

Geología:

La geología se convierte en un factor determinante para la construcción de un túnel, ya que las soluciones dependen especialmente de la naturaleza del terreno, de su resistencia y de la posible presencia de agua. Este factor puede variar desde el trazado definitivo de un túnel, hasta la forma de la sección que debe adoptar éste.

Se debe tratar de ubicar el túnel en una roca de alta calidad, no importa que se tenga que profundizar un poco más, ya que los costos de excavación se verán recompensados por el dinero y esfuerzo que se ahorrará en revestimiento.

Otro aspecto importante será la ubicación de la entrada y de salida del túnel ya que deben quedar en una zona de alta seguridad, de modo que se puedan evitar derrumbes, aludes, etc. Es de suponer que a medida que se profundiza el túnel se comiencen a encontrar mejores zonas en el macizo (roca madre). Además a la hora de empezar a construir el túnel se deben tener en cuenta el agua (napas subterráneas, vertientes, etc.) que podría afectar parcial o totalmente la construcción, representando una gran pérdida económica.

Al trazar el túnel se deben tener en cuenta algunos factores tales como:

Zonas de antiguos derrumbes, esto generaría una falsa impresión sobre el espesor real del macizo firme, lo mismo ocurriría con cauces secundarios, valles rellenos y fallas geológicas, ya que allí se encuentra una gran zona de roca triturada, que lo único que crearían sería un espesor mayor en el diámetro final, además de un tratamiento especial en cuanto al cálculo estructural de túnel.

Construcción:

La construcción de túneles ordinarios plantea dos problemas principales: la perforación, es decir, la ejecución de la excavación, y la ejecución del revestimiento.

Perforación:

Estos trabajos se realizan avanzando a partir de un número restringido de bocas de ataque. La duración de la obra depende ciertamente del número de bocas de ataque que puedan utilizarse simultáneamente, por lo tanto, para lograr reducir el tiempo de construcción de la obra conviene multiplicar los frentes de ataque.

La construcción de túneles tiene diferentes y variadas formas de hacerse, todas dependen, como ya hemos mencionado con anterioridad, de las características del terreno. Según la naturaleza del terreno, puede atacarse la perforación con una sección superficial más o menos grande.

En ciertos macizos rocosos, puede atacarse a plena sección incluso en el caso de las bóvedas de gran luz (20 m² y más) de las centrales hidroeléctricas subterráneas.

En los terrenos sin cohesión (arenas secas, gravas) será necesario, por el contrario a limitarse a una galería elemental de 4 a 5 m² para poder avanzar con una entibación adecuada.

Si se trata de arenas finas saturadas de agua a presión (arenas fluidas), de lodos, arcillas o terrenos en los que se presentan importantes afloraciones de agua, será necesario incluso recurrir a procedimientos especiales como el escudo de aire comprimido o las inyecciones de hormigón.

En cuanto a la maquinaria, debido a las particularidades de cada proyecto, tales como la geología, diámetro, longitud del túnel, etc., cada uno necesita una máquina distinta. Aun así, la tecnología que domina el mercado se puede clasificar, en términos generales, en dos tipos: la hinca de tubos y máquinas topo (tuneladoras).

La hinca de tubo

La técnica de hinca de tubos pertenece al conjunto de sistemas de construcción de túneles sin zanja con diámetros normalmente inferiores a 4 metros de diámetro exterior, ya que diámetros mayores dificultan la manipulación de tubos. Se utiliza en el montaje de acometidas, colectores, oleoductos, gasoductos, etc.

Se pueden hincar tubos de diferentes diámetros y de los más diversos materiales: hormigón, acero, fundición, fibrocemento, de polímeros, etc. La maquinaria para la hinca de tubos es: Hincas mediante Escudos Abiertos e Hincas mediante Microtuneladoras (Escudos Cerrados)

Las razones fundamentales que han llevado al desarrollo de esta técnica de construcción han sido la menor incidencia en el medio ambiente y las ventajas técnicas constructivas.

Las ventajas de la hinca mediante microtuneladora son:

- Reduce el movimiento de tierras.
- Respeta al máximo el medio ambiente y a los ciudadanos.
- No es preciso bajar los niveles freáticos.
- Prácticamente no causa alteraciones en el tráfico rodado.
- Los trabajos no se ven afectados por razones climatológicas.
- Realización rápida de los trabajos y cumplimiento de los plazos.

Máquinas Topo (tuneladoras)

Si se elige la tuneladora apropiada, la geología no es un problema, por eso es primordial realizar un buen y detallado estudio geológico de la zona a perforar. Para cada tipo de terreno hay un tipo de tuneladora ideal, aunque en los últimos años se están diseñando tuneladoras como los dobles escudos que permiten trabajar satisfactoriamente en casi todo tipo de terrenos.

Existen hoy en día diferentes tipos de tuneladoras como por ejemplo: Escudos EPB, Escudos Mixshield, Escudos para Roca Dura, Doble Escudos, Topos, etc.

Revestimiento

El diseño del revestimiento además de tener en cuenta todas las cargas que actuarán sobre el túnel debe contar con la más mínima posibilidad de pérdidas, deberá proporcionar el sostenimiento necesario y la impermeabilización en todos los casos.

El gasto por este concepto puede alcanzar el 30% del precio total. En general, se recurrirá al hormigón. La mampostería (poco usada en nuestros días) suele imponerse en las zonas apuntaladas, y los revestimientos de anillos metálicos u hormigón pretensado en ciertos casos particulares (especialmente cuando se emplea para la perforación de terrenos fluidos el método de los escudos)

Cuando se trata de túneles perforados en una masa rocosa homogénea e inalterable que pueda soportar los esfuerzos a tomar en cuenta, puede prescindirse del revestimiento. Sin embargo, incluso en este caso, conviene revestir. En todos los otros casos (roca heterogénea o de resistencia insuficiente y con mayor razón terreno suelto) el revestimiento se impone.

ANEXO

ESTUDIO DE INGENIERÍA BÁSICA (Manual de Carreteras Vol. 3 Sección 3.803).-

Aspectos Generales.

Antes que se inicie el diseño de un túnel es esencial llevar a cabo estudios de Ingeniería Básica, teniendo especial relevancia las investigaciones geológicas preliminares.

Hay un criterio diferente para la investigación de cada fase del proceso de diseño.

El responsable de la planificación debe estipular oportunamente el alcance de la investigación para cada fase planificada. A esto va vinculada una estimación del costo efectivo de la investigación que se llevará a cabo.

Aspectos Topográficos.

Todo trabajo topográfico para el estudio de Túneles deberá cumplir con las exigencias señaladas en el Capítulo 2.300 del Volumen 2 del Manual de Carreteras, en particular las Secciones 2.301 y 2.307 de dicho Capítulo.

Las órdenes de Control Topográfico a utilizar dependerán del nivel del estudio que se esté realizando, por ejemplo:

En levantamientos aerofotogramétricos escala 1:5000, apoyados en terreno mediante tecnología GPS, para ser usados como base de un Estudio Preliminar, se podrá usar un Orden de Control Terciario.

En levantamientos para el estudio a nivel de Anteproyecto escala 1:2000 o similar, el Orden de Control corresponde al Secundario, pero muchas veces si existe razonable certeza de que el proyecto pasará a nivel de Proyecto Definitivo, resulta más económico y confiable que el Orden de Control corresponda al nivel Primario.

Para Proyecto Definitivo o de Construcción, el Orden de Control de los estudios deberá obligatoriamente corresponder a un Control de Orden Primario.

Tanto para el Orden de Control Secundario como para el Primario, el Sistema de Transporte de la Coordenada Altimétrica entre ambas bocas del Túnel, deberá ser ejecutado mediante una Nivelación Geométrica de Precisión, según se especifica en la Sección 2.311 del Capítulo 2.300 del Volumen 2.

Reconocimientos Geológicos.

Investigación Geológica General.

Esta investigación, en su etapa preliminar debe a lo menos incluir la siguiente información:

- Recolección y evaluación de toda la información disponible.

Esto debe incluir mapas geológicos y topográficos y publicaciones relevantes así como informes provenientes de investigaciones anteriores.

- Estudios Fotogeológicos

Los estudios fotogeológicos se efectuarán en una fase inicial de análisis de alternativas y evaluación del terreno.

Los estudios consistirán en análisis de fotos aéreas a escalas variable según la disponibilidad que se encuentre y estudios sobre fotosatélites.

El estudio de fotos aéreas, a escala disponible normalmente entre 1: 10.000 a 1:70.000 permitirán efectuar una evaluación preliminar del terreno para así optimizar el trabajo geológico posterior de terreno. Se deberá considerar en este estudio una apreciación de los siguientes aspectos:

- Unidades geológicas mayores
- Disposiciones estructurales
- Zonas de empréstitos
- Análisis de zonas de riesgo geológico
- Redes de drenaje
- Estructuras mayores (fotolineamientos)
- Areas de descomposición

El estudio fotogeológico debe conducir a un Informe Especial que incluya las observaciones recopiladas así como antecedentes bibliográficos que hayan surgido en la etapa de búsqueda y análisis de información.

El análisis de fotosatélites se considera una herramienta de gran utilidad en diseño y evaluación de obras mayores, es decir, sobre 1000 m de longitud. De acuerdo a las condiciones particulares de cada proyecto puede considerarse su estudio necesario en túneles de menor longitud.

Este estudio permitirá establecer el comportamiento macroestructural del área definiendo la presencia de fotolineamientos regionales, su distribución e impacto en el área del proyecto. Adicionalmente se definirán áreas de riesgo tales como avalanchas, deslizamientos, sendas volcánicas y otros.

Las conclusiones quedarán integradas al Informe Especial de análisis previo que se ha mencionado anteriormente.

- Reconocimiento de terreno básico del área del proyecto confrontando la información obtenida con lo expuesto en terreno.

- Informe de Etapa

Se debe generar un informe preliminar destacando las condiciones geológicas básicas del área para así proporcionar la información para una evaluación de las etapas siguientes y entregar una estimación del volumen de información, prospecciones y costos involucrados.

Investigación Geológica de Detalle.

Basado en el Informe de la Etapa Preliminar se decidirá la necesidad de realizar las investigaciones siguientes:

- Estudios fotogeológicos basados en pares de fotos estereoscópicas (Escala 1: 5.000 – 1: 10.000) combinado con una restitución a escala 1: 5.000, con apoyo terrestre. Este plano, de no existir, deberá generarse en esta etapa.

Basado en este material y los estudios que se realicen, se genera un plano base indicando la ubicación de la roca superficial, fallas, lineamientos, estructuras de rocas, contactos entre unidades geológicas, riesgos, fenómenos naturales de gradación, otros.

- Investigación de terreno

Esta investigación normalmente debe incluir la siguiente información (que puede cambiar de acuerdo a las condiciones particulares de cada zona):

- tipos de rocas y suelos
- contactos entre unidades geológicas
- discontinuidades (fallas)
- hidrología
- lineamientos
- riesgos (deslizamientos, otros)
- grado y profundidad de meteorización
- materiales de empréstito, tipos y volúmenes
- relaciones con el medio ambiente.

Esta etapa considera planos de superficie a lo largo del túnel a escala 1: 1.000 ó 1: 5.000 dependiendo de la longitud del túnel y planos del área de portales a escala 1: 200 ó 1: 500. La escala del levantamiento geológico será materia de análisis y corresponderá básicamente a la longitud del túnel, su ubicación geológica, altura de sobrecarga y otros factores.

Geotecnia De Túneles Y Portales. Prospecciones.

Aspectos Generales.

Se procederá a la ejecución de investigaciones del subsuelo para completar el conocimiento del área. Estas investigaciones serán dirigidas y evaluadas por personal de alta capacitación y experiencia de modo de obtener el máximo resultado de ellas.

Las prospecciones corresponderán básicamente a las que se hayan definido de los estudios geológicos de superficie que se ejecutaron.

Las principales prospecciones son las que se efectúa con métodos tales como:

- sondajes a rotación
- técnicas geofísicas
- calicatas

Sondajes.

Los procedimientos para la ejecución de sondajes en suelos y en roca pueden consultarse en el Manual de Carreteras. Volumen 2. Puntos 2.503.203 y 2.503.204, respectivamente.

Los sondajes requeridos para evaluar un túnel serán localizados de acuerdo a los estudios geológicos y básicamente tendrán como objetivo definir espesores y características de sobrecarga y calidad geotécnica del macizo rocoso. Estos sondajes se localizarán en zonas de portales y en aquellos sectores del eje del túnel proyectado que presenten singularidades geológico-geotécnicas de importancia para la obra.

Los sondajes tendrán a lo menos las siguientes características:

- recuperación continua de testigos
- diámetro mínimo NQ
- longitud tal que pase 5 m bajo la cota de rasante proyectada
- ejecución de pruebas de permeabilidad
- medición de RQD y FF (Rock Quality Designation y Frecuencia de Fracturas)
- estimación de resistencia a la compresión (en km/cm^2)
- estimación de grado de meteorización (según Deerman, 1974)

Los sondajes deben ser ejecutados y procesados de acuerdo a la normativa vigente para este efecto.

Técnicas Geofísicas.

La técnica geofísica principal corresponde a la sísmica de refracción la cual será usada como técnica básica para el estudio e interpretación de las condiciones de subsuperficie en el desarrollo de un proyecto de túnel. (Ver 2.503.5 en Capítulo 2.500 del Volumen 2).

En caso de ser posible esta técnica de investigación debe plantearse como una herramienta previa a la ejecución de sondajes y debe considerar la alternativa de ser reinterpretable luego de ejecutadas las prospecciones con sondajes.

Se deberán considerar separaciones de geófonos, longitudes de líneas y cargas explosivas tales que aseguren una penetración de ondas que permita interpretar las condiciones geotécnicas del macizo hasta profundidades que puedan afectar al proyecto.

Adicionalmente se consideran las prospecciones geofísicas tales como sondeos eléctricos verticales (SEV) o variaciones especiales que se apliquen a resoluciones específicas de problemas geológicos.

Toda técnica geofísica en sí es un instrumento básico de evaluación del subsuelo debido a su relativo bajo costo y a la capacidad de abarcar grandes extensiones de terreno. Su aplicación se potencia en resolución cuando cuenta con apoyo de sondajes con recuperación de testigos.

Calicatas.

Las calicatas se orientarán básicamente a los sectores de portales y zonas de empréstitos y tendrán profundidades variables de 3 a 10 m.

Se deberá considerar una descripción de ellas y un registro fotográfico de sus caras. No se consideran ensayos especiales en el material proveniente de ellas a menos que se estime necesario su uso para efectos interpretativos específicos.

Estas calicatas, debido a su relativo bajo costo de ejecución, son un complemento eficaz para establecer la profundidad de cobertura sedimentaria y las características de meteorización de la roca basal en su contacto con los depósitos de cobertura.

Hidrogeología.

Todo proyecto de diseño de una obra subterránea debe considerar los aspectos hidrogeológicos de la excavación a desarrollar. Su importancia es mayor en aquellas obras expuestas a bajas temperaturas ya sea por la altura a que se encuentran o por la latitud geográfica del emplazamiento del proyecto.

Así mismo, en condiciones de túneles bajo el mar, lagos o ríos la hidrogeología representa un elemento de primera importancia.

Los estudios hidrogeológicos irán acompañados de una base de análisis hidrológica que permita definir las condiciones básicas del área en su aspecto hídrico.

Todas las prospecciones que se ejecuten para establecer las características geológico-geotécnicas del macizo deben ser empleadas para obtener datos que evalúen el potencial hídrico del sector.

El conocimiento de esta condición hídrica debe así mismo obtenerse del estudio de sectores aledaños u obras paralelas. Debe considerarse el análisis de pozos existentes en el área, vertientes en cerros, cursos de agua, etc.

El establecimiento de la condición hídrica del macizo rocoso permitirá definir la estrategia de construcción entregando al Contratista valores de infiltraciones esperables durante la construcción y dando al proyectista el valor de caudal necesario a evacuar durante la operación del túnel por el sistema de drenaje que se proyecte.

Análisis De Riesgos.

El estudio de fotos aéreas en combinación con planos topográficos generará un detallado conocimiento de los riesgos naturales que existen en el área. Los riesgos naturales a considerar deben ser a lo menos los siguientes:

1. Inundaciones
2. Deslizamientos
3. Avalanchas
4. Volcanismo
5. Sismicidad

La tipificación y localización de estos fenómenos será orientativa para la evaluación de sus efectos en el proyecto y para evaluar potenciales zonas de repetición de ellos.

Todo proyecto de túnel deberá considerar un completo estudio de riesgos a los cuales se encuentra expuesta el área tanto del túnel como de portales y de accesos.

El estudio fotogeológico y fotosatelital permitirán definir preliminarmente zonas y tipos de riesgos naturales que impacten el área del proyecto.

A esto se adicionará el conocimiento histórico bibliográfico y finalmente la observación directa de terreno.

Los principales factores de riesgo que deben ser analizados, a los cuales pueden ser adicionados otros específicos que se apliquen a áreas especiales, son los que se indican a continuación:

- Inundaciones: Se deberá definir la posibilidad de inundaciones provenientes desde el exterior que afecten las áreas de acceso y/o de portales. Estas inundaciones pueden ser por crecidas de cauces naturales, avalanchas, represamientos y otros.

- Deslizamientos: Los deslizamientos ocurridos en las cercanías del proyecto deben ser definidos y expuestos en bases topográficas. Se definirán sus condiciones y analizará sus posibilidades de recurrencia ya sea para el mismo sitio o áreas cercanas de iguales condiciones geológicas y/o geomorfológicas.

- Avalanchas: Deben definirse todas aquellas situaciones de avalanchas pasadas, su extensión, procedencia y capacidad de ocurrencia en el mismo sitio o áreas cercanas de condiciones geológicas y/o geomorfológicas semejantes.

- Volcanismo: Este estudio deberá indicar la distribución de los centros volcánicos cercanos a la obra proyectada en caso que se encuentren a menos de 50 km de ella, adicionalmente se deberá indicar la periodicidad de actividad del o de los centros volcánicos y analizar la posibilidad de impacto en el área de proyecto (lluvia de ceniza, corrientes de lava, sismicidad relacionada, etc.)

- Sismicidad: Se deberá proporcionar un plano base con la señalización de los sismos ocurridos en un radio mínimo de 100 km. del área del proyecto del túnel. Se entregará información de localización, profundidad y magnitud de cada evento sísmico registrado, adicionando situaciones específicas de alguno de ellos que tengan relevancia para el proyecto.

Catastro De Pertenencias Mineras Y Expropiaciones.

Como parte de todo estudio de trazado de un túnel se deberá considerar el análisis de la propiedad minera del sector del proyecto.

Este estudio debe incluir un plano actualizado del catastro de propiedades mineras vigente en el área, identificando lo siguiente:

- pertenencias mineras (plano indicando el área de cada pertenencia)
- rol del propietario
- fecha de petición de pertenencia
- estado legal de la petición en cuanto a mineral a explotar.

Este estudio debe ser ejecutado por una Empresa especializada en el tema y su presentación debe estar actualizada a lo menos dentro de los 30 días previos a la presentación oficial de la información.

BIBLIOGRAFÍA

- CORNEJO, L. *Excavación mecánica de túneles*. Madrid, Rueda, 1988
- GALABRU, P. *Tratado de procedimientos generales de construcción. Volumen III. Cimentaciones y Túneles*. Barcelona, Reverte, 1973
- JUNCÀ, J.A. *El túnel I. Historia y mito*. Madrid, Colegio I.C.C.P. y CEDEX, 1991
- MEGAW, T.M.; BARTLETT, J.V. *Túneles. Planeación diseño y construcción. Volumen I*. México, Limusa S.A., 1988
- MEGAW, T.M.; BARTLETT, J.V. *Túneles. Planeación diseño y construcción. Volumen II*. México, Limusa S.A., 1990
- M.O.P.T.T., DIRECCIÓN DE VIALIDAD. *Manual de carreteras. Volumen III*. Chile, 2001
- SANTOS, A. *Curso básico de replanteo de túneles*. Madrid, Colegio de I.T. en topografía, 1992
- TAPIA GOMEZ, ANA. *Topografía subterránea*. México, Alfaomega, 1999
- Referencia Electrónica:
 - www.microtunnel.com
 - www.vialidad.cl
 - www.coiim.es/enla/Industria/primeros_tuneles.htm
 - www.cornwallis.kent.sch.uk/intranet/elearn/science/eurotunn/1museum1.htm
 - www.tuneleros.com/metodos_veloci_00.htm
 - www.flygt.com/flygt/news/impeller/no55/spain/home2.htm
 - <http://dsc.discovery.com/convergence/engineering/alpstunnel/interactive/interactive.html>