



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Procedimiento Constructivo
de Bitúnel para el Proyecto
Tren Interurbano México-
Toluca**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A N

Aarón Romero Pelayo

Francisco Cesáreo Mendoza León

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Sergio Macuil Robles

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



Contenido

ANTECEDENTES	4
I. INTRODUCCIÓN.....	6
I.1 Definición de Túnel	6
I.2 Historia de los Túneles.....	6
1.2.1 Minas y túneles antiguos	6
1.2.2 La Era de los Canales	8
1.2.3 Primer túnel perforado por escudo: El Túnel de Brunel.....	11
1.2.4 La Era de los Ferrocarriles	15
1.2.5 Origen de los distintos sistemas de excavación.....	21
1.2.6 Escudos	26
1.2.7 Técnicas del siglo XX y visión a futuro.....	27
1.2.7.1 Principales Proyectos en el mundo	27
1.2.7.1.1 Eurotúnel entre Francia e Inglaterra	28
1.2.7.1.2 Túnel Seikan en Japón.....	28
1.2.7.1.3 Túnel San Gotardo en Suiza	29
1.2.7.1.4 Túnel de la línea 8 del Metro de Shanghai en China	29
1.2.7.5 Túnel para la Línea 12 del metro y el Túnel Emisor Oriente en México	30
1.2.7.2 Nuevos Proyectos Internacionales a Futuro	30
1.2.7.2.1 Túnel Lyon-Turín.....	30
1.2.7.2.2 Túnel en el estrecho de Bering, Rusia-Alaska	30
I.3 Tipo de Túneles	31
1.3.1 Túneles Carreteros.....	31
1.3.2 Túneles Ferrocarrileros.....	32
1.3.3 Metro	32
1.3.4 Alcantarillado	34
1.3.5 Centrales hidroeléctricas subterráneas.....	35

1.3.6 De montaña.....	35
1.3.7 Bajo el agua (subacuático)	36
1.3.8 Urbanos.....	37
1.3.9 Túneles en suelos blandos	39
1.3.10 Túneles en roca.....	39
I.4 Métodos de construcción	40
1.4.1 Excavación mediante explosivos	40
1.4.1.1 Maquinaria de perforación.....	45
1.4.1.1.1 Martillos Manuales	45
1.4.1.1.2 Jumbos	45
1.4.1.1.3 Track-drill e hidro-track.....	47
1.4.1.1.4 Canastilla de servicios.....	47
1.4.2 Excavación Mecánica	48
1.4.2.4 Máquinas de precorte	51
1.4.3 Máquinas Tuneladoras	52
II.DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	59
II.1 Tipo de Contrato	59
II.2 Demanda del Proyecto.....	59
II.3 Fases del Proyecto	60
II.3.1 Desarrollo Proyecto Ejecutivo.....	60
II.4 Material Rodante.....	84
III.PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DEL BITÚNEL	87
III. 1 Preliminares	87
III .1.1 Ensamble de la Tuneladora	89
III. 2 Proceso de Excavación.....	93
III.2.1 Colocación de anillos de atraque	93
III.2.2 Excavación de los primeros metros	95

III.2.3 Excavación de los metros subsecuentes	97
III. 3 Proceso de Fabricación de las Dovelas	98
III. 4 Medidas de Seguridad	102
III. 5 Recomendaciones de Operación del TBM	102
IV. CONCLUSIONES	106
GLOSARIO	108
ANEXOS	111
BIBLIOGRAFÍA	114

ANTECEDENTES

Dado el continuo crecimiento de la población mundial y por ende, de México, la ingeniería ha tenido que plantearse nuevos problemas o replantear soluciones. A esto último obedece la necesidad de generar una solución diferente para el transporte en nuestro país.

Es por ello que para transportar de forma masiva- cosa cada vez más frecuente en nuestro país- cierta cantidad de gente, y en particular de la Ciudad de México hacia otras ciudades, ha sido necesario ofrecer nuevos métodos de transporte como en el que en este trabajo se menciona: el Tren Interurbano México-Toluca, y en él, la necesidad de superar obstáculos como la zona de sierra en que se tuvo que excavar y construir este *túnel*.

A continuación, se mencionan los temas que se desprendieron de la investigación que se hizo sobre la forma de resolver el problema de la excavación, que fue mediante un bitúnel:

En el **capítulo I** se menciona hasta dónde se remonta la construcción de los túneles, cómo surgió esta necesidad, con qué función y cómo fueron poco a poco descubriéndose y perfeccionándose las diversas técnicas empleadas a través de la historia mediante prueba y error.

Así también se hace mención en particular sobre cómo se inventó el método de construir mediante escudo, y su evolución hasta convertirse en las tuneladoras que se usan actualmente, mismas que harán posible la existencia de proyectos a futuro, tratados en este mismo capítulo.

Se hablará, de igual manera, sobre los tipos de túneles que existen en relación a su localización, servicio o geología, tipificación de suma importancia que ayuda a comprender el uso y existencia de cada túnel construido o por construir, y por lo cual es importante también conocer los métodos de construcción (por voladura, métodos mecánicos o mediante el uso de máquinas tuneladoras).

En el **capítulo II**, se toca el tema sobre cómo surge el proyecto del tren Interurbano, las contratistas seleccionadas para llevar a cabo su construcción así como las diversas fases y

áreas de la ingeniería civil que estuvieron presentes en el proyecto para poder concretar la construcción del túnel.

En el **capítulo III**, se menciona el procedimiento que se usó para construir el túnel: desde el armado de la cuna de concreto para el ensamble de la tuneladora, así como los trabajos preliminares necesarios para su correcto armado y la descripción de la forma en la que la máquina perforaba, se deshacía del material producto de la excavación y colocaba las dovelas que conforman el túnel.

Un tema relevante dentro de este capítulo es el proceso de fabricación de dovelas, donde se hace una breve descripción de la planta fabricante de este importante elemento estructural, seguida de una tabla donde se muestran las operaciones que se siguieron durante este proceso.

Al final de este apartado se habla de las medidas de seguridad para la correcta operación de la TBM en relación a la seguridad del personal que laboró en ella, siendo también tomadas en cuenta las recomendaciones de operación en relación a la excavación, desperdicio, transporte, revestimiento y mantenimiento de una TBM.

Y finalmente, en el **capítulo IV**, dada toda la información plasmada en el presente trabajo, se ofrece una perspectiva final sobre las ventajas de usar una máquina tuneladora en comparación con los métodos convencionales de excavación, dándose una justificación sobre la razón por la que es necesario la conclusión del proyecto del Tren Interurbano México-Toluca.

I. INTRODUCCIÓN

I.1 Definición de Túnel

Una definición sucinta de lo que es un *túnel sería decir que* es una obra subterránea de carácter lineal que comunica dos puntos para el transporte personas o materiales; usualmente artificial.

Detallando un poco más esta definición, se podrían considerar tres aspectos: forma, función y método de construcción. Por su forma, es característicamente una cavidad subterránea, de gran longitud en relación con su sección transversal, y por su alineamiento, es más bien horizontal que vertical. Típicamente, la función del túnel es permitir el paso y transporte de personas y materiales por debajo del terreno. Se podría restringir el método de construcción, en una definición limitada, a una perforación con excavación y revestimiento hechos desde el interior.

Así, una descripción completa de lo que es un túnel sería que es: un pasaje construido por debajo del terreno o del agua, de forma esencialmente cilíndrica y cuya alineación axial no difiera mucho de la horizontal, con dimensiones suficientes para permitir el paso de las personas, y excavado y revestido desde el interior o por otros medios.

I.2 Historia de los Túneles

1.2.1 Minas y túneles antiguos

La construcción de túneles, como el mismo *arte*, tiene sus orígenes en el pasado remoto. Su relación con la minería es muy estrecha, pero se establecen importante diferencias. El objetivo primordial de la minería es la extracción de minerales valiosos: una vez agotados, los pasajes de acceso y otros espacios vacíos no tienen ya utilidad y, en este sentido, todo tipo de trabajos para la explotación minera resulta temporal.

Por el contrario, el objetivo fundamental de la construcción de *túneles* es el de adecuar un pasaje u otro espacio para su uso de forma permanente y se le pueda seguir usando de forma segura con este fin por tiempo indefinido.

Aun teniendo en cuenta las importantes diferencias entre minas y túneles, la historia más remota se debe seguir a través de las operaciones de la minería, primero en la ampliación del trabajo sobre la superficie para obtener el pedernal y, más tarde, en la búsqueda de cobre y otros metales. Las minas de padernal, como las de Grimes Graves, en Norfolk, se desarrollaron también en Bélgica, norte de Francia, Portugal y otros lugares, remontándose más allá de los 2000 a.C. También es de importante mención las minas de sal de Halstat que son de 2500 a.C y alrededor de 1000 a.C., dichas minas proporcionaban su producto a comunidades muy prósperas de la Edad de Bronce y de principios de la Edad de Hierro; aún hoy se extrae sal de estos depósitos.

Mientras que, en el sentido más estricto, los abastecimientos de agua son los que nos proporcionan los primeros ejemplos de túneles, y quizá se pueda considerar que marcan el inicio de la construcción de túneles aparte de la minería. Los templos y las cámaras funerarias subterráneas, que se excavaron en roca en muchas partes del mundo, presentan ejemplos de métodos y usos de la excavación subterránea.

Son numerosos los ejemplos de túneles construidos en el período clásico de Grecia y Roma, siendo en su mayoría para acueductos. En Roma, el abastecimiento de agua se llevaba a la ciudad desde las fuentes en las colinas circundantes; durante el período 312 a.C. hasta el inicio de esta era, se construyeron 52 acueductos con un total de 350 Km, casi todos en forma de túneles; el sistema estaba basado en el flujo por gravedad.

Los romanos utilizaron también los túneles para drenaje y como un medio para hacer útiles los pantanos y, ocasionalmente, para carreteras, siendo un ejemplo notable el túnel de Pausilippo construido en 36 a.C. entre Nápoles y Pozzuoli, que tenía unos 8 m de ancho x 10 m de alto x 1740 m de longitud.

Después de la caída del Imperio Romano, pasaron varios siglos sin que se emprendieran obras importantes. En la época medieval la construcción de túneles se convirtió en el arte de los zapadores para lograr románticos pasajes subterráneos que existían en muchos castillos y monasterios. La ingeniería civil estuvo mucho tiempo inactiva hasta que se vio motivada por las necesidades de los constructores de *canales*.

1.2.2 La Era de los Canales

Excepto en las llanuras aluviales casi planas, los ingenieros especializados en canales tienen siempre que enfrentarse con dos problemas en los cuales es importante la construcción de túneles: cambios de nivel y suficiente abastecimiento de agua. Las esclusas de los canales, por medio de las cuales los lanchones podían pasar de un nivel a otro, fueron la solución común, aunque no la única, para el primer problema, pero a costa de un suministro de agua para su operación. Si un canal tiene que pasar a través de un cerro de cierta elevación, es probable que el abastecimiento de agua en la cima sea escaso o que no exista a menos que se utilicen bombas, mientras que resulta necesario un tramo de esclusas a cada lado si el canal sigue la superficie del terreno.

Esta es la situación en que los túneles pueden ofrecer una solución que, al mismo tiempo, evita la construcción de esclusas con su demanda de agua y retraso en el transporte, y hace más fácil el suministro de agua; con la construcción de un túnel, se podrá bajar el “nivel de la cima” hasta ponerlo al alcance de las corrientes de agua, y hasta el propio canal podrá hacer contacto con corrientes subterráneas. Es probable que el paso por el túnel sea lento, pero con todo, se puede ahorrar mucho tiempo y agua comparado con el paso a través de la gradería de esclusas.

El túnel que inició la Era de los Canales fue construido en el Canal du Midi, en los años que van de 1666 a 1681 con el fin de unir el Atlántico con el Mediterráneo y evitarse los largos, costosos y peligrosos viajes alrededor de la Península Ibérica y a través del Estrecho de Gibraltar. Este incluía 240 Km de canal con más de cien esclusas y con un nivel superior de cerca de 200 m sobre el nivel del mar. El agua necesaria la proporcionaban depósitos construidos en las Montagnes Noires a 20 Km de distancia. El proyecto fue promovido y ejecutado por Pierre-Paul Riquet, con el apoyo de Luis XIV y su Ministro de Finanzas Colbert. El túnel no estaba en el nivel superior, sino bajo un cerro a más de 100 Km al este, cerca de Béziers, siendo sus medidas de 6.5 m x 8 m x 157 m de longitud, construyéndose en los años 1679-81. Se dejó sin revestir hasta 1691. Un hecho trascendente de este proyecto es que se empleó la pólvora en su construcción, el primer uso que se registra en el caso de un túnel.

En Inglaterra, el transporte de agua alcanzó una creciente importancia en el siglo XVI y se desarrolló, primero con mejoras en los ríos navegables y, luego, en siglo XVIII, con la construcción de canales, lo que tuvo una gran influencia en la creación de la ingeniería civil como profesión. El transporte del carbón y todas las otras cargas pesadas se realizaba casi enteramente por agua, y el valor de los sistemas fluviales del Severn, Támesis, Mersey, Trent y

otros aumentó notablemente con la construcción de canales conectores, los que, por supuesto, presentaban los típicos problemas de nivel, los cuales se resolvían frecuentemente por medio de canales.

Los primeros túneles para canales se hallaban en el canal Worsley-Manchester y fueron construidos por Brindley para el Duque de Bridgewater con el propósito de llevar directamente el carbón de las minas de Worsley, a unas seis millas al oeste de Manchester, hasta la ciudad. El canal pasaba por un túnel construido en la arenisca de la mina, aproximadamente a una milla, donde se construyeron más tarde unas cuarenta millas de túneles a varios niveles. Pasaba sobre el río Irwell por un acueducto a 12 m sobre el río y terminaba luego en un túnel y un tiro vertical bajo Castle Hill, en Manchester. El canal, todo a nivel y sin esclusas, se abrió en 1761 y dio por resultado que se redujera a la mitad el costo de carbón en Manchester.

Brindley construyó también el canal de Trent-Mersey, o Gran Truck, de 146 Km de largo, que unía ambos ríos, y el canal Staffordshire-Worcestershire, de 75 Km de largo, que se conectaba con el Severn en Stourport.

Por otro lado, el túnel Harecastle fue una empresa muy importante; tenía 2 090 m de largo y llevaba el canal en su parte superior a través de serranías al norte de Stoke-upon-Trent. Había otros cuatro túneles en la ruta, incluso uno de 1 135 m en Preston-on-the-Hill, cerca de Runcorn; en dicho lugar este canal se unía al del Duque de Bridgewater que llevaba hasta el Mersey mediante una serie de esclusas. El túnel de Harecastle resultó una empresa difícil; se perforó utilizando pólvora desde unos cuantos tiros y se encontraron manantiales que anegaron la obra, luego entonces fue necesario un frente de drenaje delante de la obra. En contraste con los otros cuatro túneles, que tenían 4.1 m de ancho por 5.3 m de alto, este túnel tenía solamente 2.2 m x 3.6 m, y fue necesario idear un sistema operativo de una sola vía, haciendo pasar las barcazas “con los pies”, lo que llevaba dos horas. Para empujarlas, los hombres se tendían de espaldas sobre la cubierta de la barcaza y la empujaban apoyando sus pies contra el techo del túnel. El canal tardó once años en construirse, debido principalmente a este túnel, y se terminó hasta 1777, 5 años después de la muerte de Brindley. El canal tuvo mucho éxito, ya que redujo los costos de transporte entre Liverpool y las Potteries, pero este túnel de “un solo carril” constituyó un cuello de botella y no se volvió a hacer obra semejante hasta que Telford proyectó uno nuevo, de una vía también, pero de 4.3 m x 4.9 m, incluyendo un camino de remolque de 115 m. Se perforaron quince tiros para la construcción y dieciséis frentes transversales para el viejo túnel. Nuevamente se presentaron dificultades con las arenas movedizas y una arenisca extremadamente dura llamada *MillstoneGrit* (Piedra de Molino); sin

embargo, la obra se terminó en tres años, incluyendo el revestimiento con ladrillos, y sin pérdida de vidas.

A partir del ejemplo de Brindley, los canales se multiplicaron por toda Inglaterra, teniendo todos algunos túneles. Hubo un auge de promoción de esquemas con su punto culminante en los años de 1793 a 1794. Este avance se prolongó hasta la Era del Ferrocarril.

Otro proyecto importante fue un túnel en Standedge a unas cinco millas al suroeste de Huddersfield, donde la cordillera Pennina había sido perforada por un túnel de 5 000 m de largo y a una altura de 194 m sobre el nivel del mar. La obra, dirigida por Outram, se inició en 1794 perforando tiros, uno de los cuales tenía 70 m de profundidad; el túnel tenía 3 m de ancho x 5.5 m de alto y cuatro “ensanchamientos” dentro de su longitud a fin de tener lugares de paso. Gran parte de la excavación se efectuó en arenisca dura del tipo de Piedra de Molino, y tardó diecisiete años en terminarse, habiéndose inaugurado en 1811. Desafortunadamente durante el período de construcción, se perdieron muchas vidas.

También se puede mencionar al túnel de Sappeerto (1789) de 3 Km de largo, y que constituía el nivel superior del canal Támesis-Severn, perforado a través de los estratos de caliza oolítica, donde perdía agua. Más tarde, en 1830, el túnel de Cowley, construido bajo la dirección del señor Telford en el canal de la Birmingham-Liverpool Junction, se encontró con ciertos problemas por lo que fue preciso convertir la mayor parte de la longitud en un corte profundo y el túnel terminó con 74 m de longitud en lugar de los 630 m proyectados.

En el continente, la construcción de canales también necesitó túneles: el canal de St. Quentin, construido por orden de Napoleón, tenía tres túneles principales en su longitud de 100 Km. El túnel de Tronquoy, de 1 075 m de largo y 8 m de ancho, fue excavado en grava arenosa en 1803, construyendo el arco de ladrillo en una secuencia de frentes ascendentes antes de retirar el “banco”. Esta técnica se desarrolló posteriormente para constituir el “Sistema Alemán”. El túnel de Riqueval, de 5 550 m de largo, se construyó simultáneamente en un terreno que ofrecía menos dificultades. Una sección del canal se inauguró en 1810 y se amplió en 1822 con la perforación del túnel de Noirieu, de 12 000 m de largo. El canal de Borgoña, iniciado en 1775 y terminado en 1825, tiene 245 Km de largo e incluye un túnel de 3 Km. El Canal del Marne al Rin, de 300 Km de largo, que se construyó en 1838 y 1853, incluye el túnel de Mauvages, de 4 Km de largo, y otros cuatro más.

En Bélgica, en 1828, fue preciso construir un túnel para el canal de Charleroi a través de una colina con arenas movedizas, para el que se desarrolló el “Sistema Belga”, en el que se excava

primeramente un pequeño frente superior y, luego, se amplía progresivamente para permitir el adorno de la mitad superior y que se construya el revestimiento de arco con ladrillos o mampostería, seguido por la reconstrucción de los lados de la zanja, la excavación final del “banco” y la construcción del piso. Se ha modernizado el canal, y se ha abierto el túnel con un plano inclinado con una elevación de 70 m.

Después del advenimiento de los ferrocarriles, fueron pocos los túneles para canal que se construyeron, pero uno de los últimos y mayores es el túnel de Rove, que une Marsella y el Ródano. Es una de las perforaciones más grandes que se han excavado en caliza y con dimensiones de 22 m x 15 m x 7.3 Km. Se inició en 1911, pero se retrasó su construcción debido a la Primera Guerra Mundial, y se terminó e inauguró en 1928.

1.2.3 Primer túnel perforado por escudo: El Túnel de Brunel

Entre la Era de los Canales y la Era de los Ferrocarriles inició la construcción del gran Túnel de Brunel¹ bajo el Támesis, el primero en pasar por debajo de un río de marea y el primer túnel perforado con escudo. En ciertos aspectos, estaba muy adelantado para su tiempo y su exitosa terminación exigía tanto tiempo, esfuerzos y supervisión personal que ninguna empresa similar se emprendió en casi medio siglo.

El concepto que tenía Marc Isambard Brunel de un escudo, inspirado hasta cierto punto por la forma en que perfora el molusco *Teredo Navalis*², estaba cubierto por dos patentes concedidas en 1818, y se aplicó al cruce propuesto de una calzada de dos vías bajo el Támesis, entre Rotherhithe y Wapping, iniciado en 1825 por la *Thames Tunnel Company* (Compañía del Túnel Támesis). Un intento anterior, primero por Vazie y luego por Trevithick en 1807, para perforar un frente o galería, como una operación preliminar para ampliarla a un túnel de 5 m de diámetro había fracasado debido al terreno blando.

¹ Marc Isambard Brunel; ingeniero nacido en Francia que luego residió en Reino Unido. Durante su vida fue particularmente conocido por dirigir con éxito la construcción del túnel debajo del río Támesis.

² Brunel observó la forma en que las valvas de este molusco le permiten a la vez excavar un túnel en la madera y protegerse de ser aplastada por los movimientos del material, para diseñar un ingenioso marco modular de acero para túneles.



Figura 1.1 Molusco *Teredo Navalis*, inspiración del escudo de Brunel.

Brunel describió los problemas fundamentales de excavación y ademe³ temporal en las especificaciones de su patente: “Sentaré un precedente al observar que las principales dificultades que se habrán de vencer en la construcción de túneles debajo del lecho de los grandes ríos estriban en la insuficiencia de los medios para realizar la excavación. Lo que se desea principalmente es hallar medios eficaces para excavar el terreno de una manera tal que no desplacen más tierra que la necesaria para el cuerpo del túnel, y que el trabajo se realizará con seguridad”.... “En la excavación de una galería bajo el lecho del río, será poca toda la atención que se dedique a asegurar la excavación contra los derrumbes.... Propongo recurrir al uso de una caja o una celda que empuje hacia adelante....”

El escudo de Brunel estaba diseñado para proporcionar:

1. Un forro que cubra el terreno por todos lados. Esto se efectuaba por medio de bloques de hierro que se deslizaban hacia adelante según avanzaba la excavación y soportados por marcos de hierro.
2. Medios para soportar el frente, además de tener acceso a la excavación. Los marcos de hierro llevaban estacas horizontales de avance de roble con una sección de 150 mm x 75 mm, soportados por gatos de tornillo con los que se podía mover hacia adelante uno cada vez según se excavaba la pequeña área abierta del frente.
3. Medios para mover el escudo hacia adelante dentro del espacio excavado, y luego construir el revestimiento permanente en la parte de atrás. La estructura del escudo consistía en doce armazones de 3 hileras, que soportaban las protecciones superiores en

³ En ingeniería un *ademe* es una cubierta o forro que protege de un derrumbe y da soporte a una obra en proceso de excavación, por ejemplo un pozo, pilote, o como en nuestro contexto, a un túnel. Hay una particular importancia en este concepto en virtud de que los ademes son una parte de vital importancia en el proceso de construcción de un túnel.

los lados y en la parte superior, y proporcionando celdas de trabajo, ocupada cada una por un minero; estas armazones se empujaban hacia adelante, una cada vez, por medio de gatos apoyados en el arco de albañilería ya terminado.

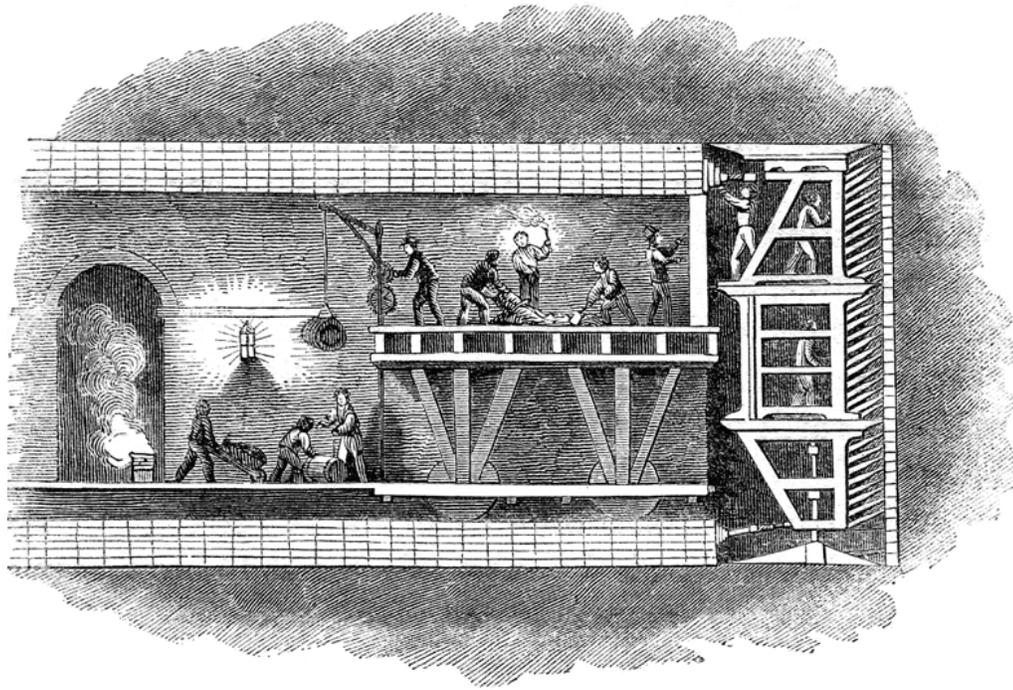


Figura 1.2 Sección longitudinal del túnel de Brunel bajo el Támesis

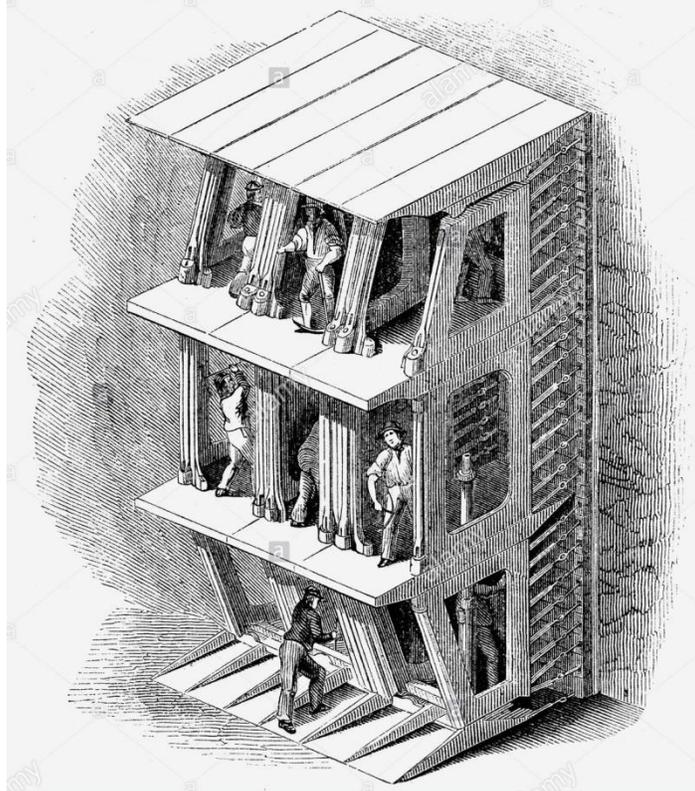


Figura 1.3 Escudo de Brunel. Divisiones del escudo.

El escudo completo tenía 11.4 m de ancho x 6.8 m de alto x 2.7 m de largo. Se armó primeramente en el fondo de un tiro de 15 m de diámetro y, luego, fue necesario operar los mecanismos algo complicados en condiciones de suciedad, humedad y peligro con mano de obra que, al principio, no estaba calificada.

Además de los problemas encontrados para tener la certeza del uso adecuado de los diversos dispositivos, se tuvieron dificultades para mantener alineado el escudo que, sin embargo, funcionó satisfactoriamente en arcilla de buena calidad. La esperanza de contar cuando menos con un techo de arcilla firme nunca se realizó, y el control del agua se convirtió en el principal problema dentro del túnel. El agua ablandaba el limo y la arcilla y entraba al túnel con un volumen cada vez mayor; venía acompañada de metano, que causaba pequeñas explosiones, y por hidrógeno sulfurado y otros contaminantes que eran causa de la enfermedad y muerte de los trabajadores que laboraban en el frente. Cinco veces el río inundó todo el túnel, y fueron el mismo número de veces las que se hizo posible que siguiera funcionando vertiendo arcilla y grava sobre el lecho del mismo, bombeando el agua y excavando los desechos. El trabajo de construcción del túnel se había iniciado a fines de 1825, pero después de la segunda inundación que ocurrió en enero de 1828, cuando ya se habían terminado 184 m de un total de

366 m, se detuvo el trabajo por falta de fondos y no se reanudó hasta que el gobierno concedió un préstamo a fines de 1834. Se tardó un año en sustituir el escudo con una estructura mejorada, y otros cinco años y medio, desde marzo de 1836 hasta noviembre de 1841 para terminar la excavación del túnel. Este se inauguró en 1842, pero sólo para peatones, ya que no se disponía de dinero para el acceso de coches. Finalmente, se vendió en 1865 a la East London Railway Company que construyó los accesos necesarios para convertirlo en un enlace ferrocarrilero por el cual todavía corren regularmente los trenes de la London Transport.

El propio Sir Marc Isambard Brunel tomaba parte día por día en la construcción y supervisaba todos los detalles. Su hijo, que fue aún más famoso, Isambard Kingdom Brunel, fue el ingeniero residente durante la primera parte de la construcción hasta que ésta se interrumpió en 1828; sin embargo, cuando se reanudó el trabajo en 1835, ya no pudo hacerse cargo de él ya que tenía otros intereses.

1.2.4 La Era de los Ferrocarriles

La construcción de los ferrocarriles modernos se inició con el *Liverpool and Manchester Railway*, inaugurado en 1830, se tuvieron que construir túneles desde el comienzo. El tiro de locomotoras terminaba en Edge Hill, en Liverpool, donde el ferrocarril le hacía frente a una formidable barrera de terrenos elevados y, desde dicho punto se perforaron dos túneles: 1) un túnel corto de 265 m que se elevaba hasta Crown Street, desde aquí los coches de pasajeros se remolcaban con cuerdas hasta la superficie; y 2) el largo túnel de Wapping para el tráfico de mercancías, que descendía 1 930 m con un gradiente de 1 en 48 hasta los muelles. El túnel tenía una sección de 6-7 m x 4.9 m. Poco después de haber sido abierto al tráfico, el ferrocarril se amplió en forma de túnel desde Edge Hill hasta la terminal Lime Street. Este túnel tenía 1 852 m de longitud con una pendiente descendente de 1 en 97. Se operaba por remolque con sogas hasta 1870, cuando se introdujo un sistema de tiro con locomotoras combinado con ventilación artificial por medio de un ventilador para la extracción. Alrededor de 1866, se abrió el túnel por un corte y se amplió para acomodar cuatro vías. La mayoría de estos túneles se excavó en arenisca del Triásico, que resistió bien, requiriendo solamente apoyos en algunas partes de su longitud.

La gran cantidad de ferrocarriles que construyeron compañías competidoras en Gran Bretaña durante gran parte del siglo XIX, produjo un cierto número de túneles, en su mayoría para disminuir gradientes y obtener rutas directas. Entre 1830 y 1890 se terminaron más de 50 túneles que tenían más de una milla (1.61 Km) de longitud; 25 de ellos se construyeron entre 1838 y 1850. La mayoría de ellos atravesaban colinas y, en muchos casos, el agua

representaba el mayor enemigo, inundando los tiros, arrastrando la arena o suavizando la lutita. Como un caso excepcional, el túnel del Ferrocarril de Mersey (1879-88) y el túnel Severn (1873-86) pasaban por debajo de ríos de marea, es decir, eran túneles subacuáticos.

La línea que construyó Stephenson, que iba de Liverpool a Manchester, seguida muy pronto por la línea entre Londres y Birmingham, también dirigida por él; y el proceso de tratar de obtener una buena alineación y fáciles pendientes hizo necesarios cinco túneles, siendo los más difíciles los de Primrose Hill, Watford y Kilsby. El túnel de Primrose Hill se excavó en arcilla London, la que se hinchaba y desarrollaba fuertes presiones que agrietaban en algunos lugares el revestimiento de albañilería. El contratista abandonó la obra, la que se terminó por mano de obra directa. El túnel de Watford (1 660 m) se perforó a través de la sierra Chalk que forma el borde superior de la Cuenca Londinense, pero las figuras en la creta, rellenas con grava, arena y arcilla, y en las cuales penetra el agua, causó muchos problemas y pérdidas de vida. El túnel de Kilsby (2 218 m) fue el más difícil que se excavó a través de una sierra del período Liásico, al sur de Rugby. En la sierra ya se había construido un túnel que llevaba un canal, el cual había sido trazado para evitar las arenas movedizas mostradas por las perforaciones. Se seleccionó la ruta del ferrocarril esperando no pasar por las arenas movedizas mostradas por las perforaciones. Se seleccionó la ruta del ferrocarril esperando no pasar por las arenas movedizas, pero no fue así. El trabajo se realizó desde dieciocho tiros, y las demandas de bombeo, que eran cada vez mayores, obligaron al contratista a abandonar la obra; dichos túneles se terminaron por mano de obra directa en 1830.

En 1833, I.K. Brunel⁴, de 26 años de edad, fue nombrado ingeniero del *Great Western Railway* de reciente formación; estudió y planeó la ruta desde Londres a Bristol, y diseñó y supervisó la construcción. El túnel principal es el del Box (2 937 m), a 8 Km al noreste de Bath, donde la línea atraviesa una sierra de rocas jurásicas, que incluyen la caliza Great Oolite, Fullers Earth y la Inferior Oolite. El agua que entraba por las fisuras inundó dos veces algunas secciones del túnel durante la construcción, pero se terminó con éxito y se inauguró un año más tarde, en 1841. Los adversarios del proyecto se habían alarmado a causa de su longitud, a pesar de no ser mucho mayor que la del túnel de Kilsby por su pendiente de 1 en 100, y habían opinado que todo el proyecto era “monstruoso y desmesurado, muy peligroso e impracticable”. Otro de los primeros túneles para ferrocarril fue el de Woodhead (4 828 m) a través de los montes Peninos en la parte superior de la línea de Manchester. El primer túnel de una sola vía

⁴Isambard Kingdom Brunel. Ingeniero civil británico, hijo del Brunel que logró el túnel bajo el Támesis. Aunque sus proyectos no siempre fueron exitosos, frecuentemente tenía soluciones innovadoras para los típicos problemas ingenieriles de su época.

se construyó entre 1838 y 1845 y se realizó otro igual entre 1847 y 1852. Estos túneles atravesaban la parte alta de los desolados páramos y los construyeron rufianescas cuadrillas formados por los que habían trabajado en los ferrocarriles, que vivían en sus propias comunidades en las más duras condiciones y que, a veces, aterrorizaban a la vecindad. Ambos túneles tuvieron problemas debido a la falta de ventilación y mantenimiento general y, en 1954, los reemplazó un nuevo túnel de Woodhead que unía las dos vías e incorporaba electrificación aérea. El nuevo túnel tardó cuatro años en construirse, soportando también desprendimientos de rocas; los obstáculos presentados por la naturaleza continuaron siendo muy reales.



Figura 1.4 Portales al Poniente del túnel Woodhead en 1953. A la izquierda un tren emerge de uno de los túneles originales, mientras que el túnel 3 a la derecha está aún en construcción.

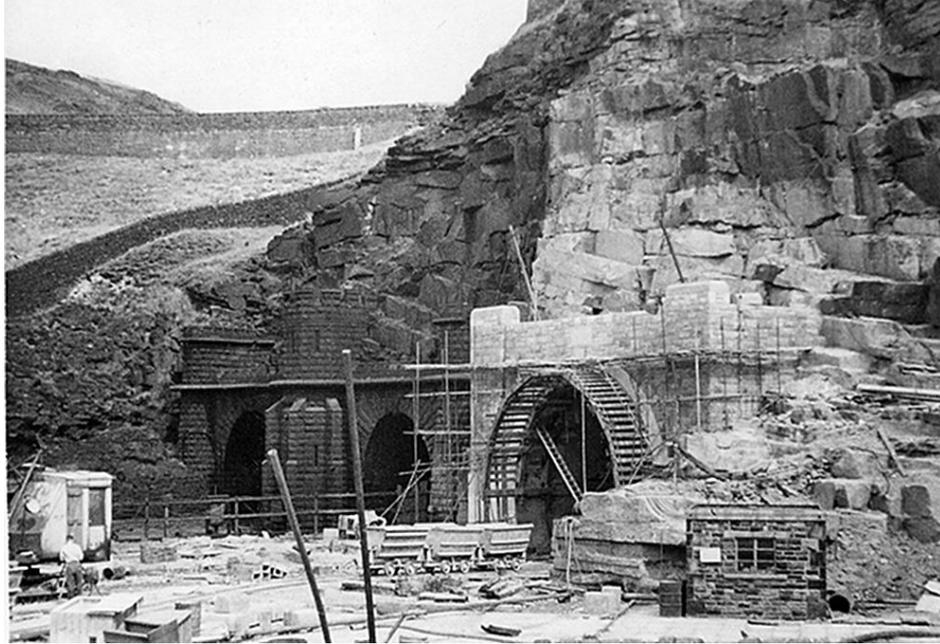


Figura 1.5 En la imagen se aprecian los portales 1 y 2 del túnel Woodhead al fondo, mientras que el portal 3, al frente, aún se construye.

1.2.4.1 Túneles en los Alpes

La barrera que forman los Alpes entre la Europa del norte e Italia, constituía un reto para los constructores de ferrocarriles del siglo XIX, reto al que sólo se le podía hacer frente mediante la construcción de túneles. Los principales túneles cuya construcción se inició en dicho siglo fueron los siguientes: el de Frejus (MontCenis), St. Gotthard, Arlberg, Simplon, seguido en 1907 por el Lötschberg. Del otro lado del Atlántico, el túnel de Hoosac en Massachussetts, cuya construcción duró 21 años, sirvió de terreno para prueba para valiosas mejoras en el uso de barrenos de aire comprimido para perforar rocas.

Cada túnel podía ser de una de las dos formas siguientes: corto a un nivel elevado al que se llegara por fuertes pendientes y curvas cerradas y, además, vulnerable a las nieves invernales; o un túnel mucho más largo a un nivel inferior. Las ventajas de operación de los túneles inferiores de mayor longitud eran por lo general decisivas, por lo que se escogieron los túneles largos muy por debajo de la montaña.

Estos túneles implicaban nuevos avances en los equipos de barrenado y explosivos, y los constructores tuvieron que hacerle frente a problemas casi insolubles de ventilación de las obras, aumentados por las altas temperaturas de la roca y de las fuentes termales, que alcanzaban hasta 60°C. Las fuertes presiones producidas por las rocas que se deterioraban

después de su exposición exigían métodos de construcción excepcionales. Finalmente, todos los túneles fueron terminados.

El túnel del paso de Frejus, o de Monte Cenis, para el ferrocarril desde Francia hasta Turín, fue el primero de los grandes tuneles de los Alpes, a 1 340 pies sobre el nivel del mar. Su longitud de perforación parece haber sido de 12.23 Km, pero se registra hoy en día como de 13.7 Km. Se utilizaron los torrentes de montaña para comprimir el aire que servía para que funcionaran los barrenos y proporcionar ventilación. Se construyeron conjuntos habitacionales con escuelas, hospitales, etc., con el fin de acomodar una fuerza de trabajo de 2 000 hombres en cada uno de los extremos. El trabajo se inició en 1857 y el túnel se inauguró catorce años más tarde, en 1871, poco tiempo después de la muerte de su constructor, Germain Sommeiler.

Durante el mismo período, el túnel de Hoosac, que conecta Boston con el valle de Hudson, estaba en proceso de construcción en América del Norte, pero el progreso de la obra fue tan prolongado que se le llegó a conocer como "*the Great Bore*"⁵. Uno tras otro, los contratistas se hacían cargo del túnel y lo abandonaban. Después de varios períodos de mano de obra directa bajo una Comisión Estatal, un quinto contratista lo terminó. El túnel tenía 7.44 Km de largo, en su mayor parte a través de esquisto y gneiss⁶. Todavía en 1865 el túnel progresaba a una razón de sólo 0.32 m por día, cifra mejorada al año siguiente a 0.46 m cuando se introdujeron las máquinas perforadoras, pero ya para 1873 se aumentó a cerca de 1.65 m.

En los Alpes, a la terminación del túnel de Frejus le siguió la construcción del túnel de St. Gotthard, durante el período de 1872 a 1882. Con éste se tuvo el enlace entre Renania, por Zúrich hasta Milán. Tiene una longitud de 14.9 Km y se halla a una altura de 1 164 m. Louis Favre aceptó un contrato de ocho años, pero murió en 1879 mientras luchaba por vencer las terribles condiciones del agua, altas temperaturas y la mala ventilación. Las peores rocas eran las formadas por feldespato y yeso de compuestos que se volvían plásticos en el aire húmedo, y desarrollaban presiones que fueron finalmente resistidas por un revestimiento de granito que fue colocado en el arco, los muros y el piso, con espesores respectivos de 0.6 m, 2.5 m, 1.4 m. Las malas condiciones y los accidentes fueron causa de muchas muertes, cerca de 25 al año, enfermedades y lesiones. Se emplearon cerca de 4 000 hombres en el período álgido de la construcción.

⁵ En español, "la gran perforación o el gran lío"

⁶ Grupo de rocas, sedimentarias y metamórficas, respectivamente.

El túnel de Alberg, de 10.5 Km de largo, que enlazaba los ferrocarriles austríacos con Suiza, se construyó durante el período de 1880 a 1884 sin contratiempos. Fue notable por la competencia establecida entre las perforadoras hidráulicas y con aire comprimido sin que fuera posible establecer las ventajas de uno u otro sistema.

El túnel de Simplon, entre Berna y Milán de 19.8 Km de largo, es el más largo de su clase; su construcción se inició en 1898 después de que los pronósticos geológicos señalaron la presencia de roca de buena calidad. Se hizo mucho énfasis en las precauciones de seguridad y bienestar, y esto hizo que a pesar de las condiciones tan difíciles que existían, especialmente por las fuentes termales de hasta 60° C, el túnel se terminó e inauguró en 1906 con un récord de salud y seguridad mucho mejor que el de St. Gotthard; no obstante, se perdieron 39 vidas. El diseño era para túneles gemelos de una sola vía, excavándose ambos frentes simultáneamente desde los dos extremos, lo que produjo grandes ventajas en la ventilación y, también, en el drenaje y las rutas de escape. Además de las altas temperaturas de las rocas y la presencia y la presencia de agua caliente, se afrontaron grandes problemas con una zona de caliza y yeso micáceo, zona que se ablandaba al ser expuesta al aire y desarrollaba muy altas presiones en el frente de 3.5 m x 3.2 m. En una longitud de 42 m de largo, ningún madero era lo suficientemente resistente como para poder soportar la compresión, por lo que se construyó lo que era virtualmente un frente en forma de caja con 74 armaduras de acero construidas con viguetas de 356 mm de peralte. La ampliación para llegar al tamaño final tenía que realizarse excavando cortos tramos por debajo y alrededor de los marcos; después se llenaba con mampostería pesada tan pronto como era posible. Y como ocurre tan a menudo en estas empresas, el hombre sobre el que descansaba la mayor responsabilidad, Alfred Brandt, murió en el curso de la obra, en 1898. La ampliación y terminación del frente que proporcionaría la segunda vía se realizó hasta los años 1912 a 1921.

El túnel Lötschberg, que tiene 14.6 Km de longitud y está a una elevación de 1 245 m, complementa en la parte norte del valle del Ródano al túnel de Simplon en el lado sur, y su construcción se realizó de 1907 a 1913. El enlace total de las vías era de 58 Km de largo, incluyendo el túnel superior y otros treinta y tres túneles. El riesgo especial de excavación de esta obra consistió en que, inesperadamente le faltó roca al frente y se encontró con un relleno aluvial de más de 186 m de profundidad, por debajo del valle de Gastern. El túnel se llenó de arena y grava arrastradas por las aguas, enterrando a 25 hombres. Fue preciso taponearlo y excavar nuevamente el túnel con una serie de curvas de manera que cruzara por abajo. Los trabajadores del túnel sufrieron otra catástrofe cuando el golpe de aire de una avalancha barrió

con el comedor de la obra y ocupantes. La siguiente generación de los grandes túneles alpinos estaba destinada a las carreteras y no a los ferrocarriles.

1.2.3.2 Experiencia en la excavación de túneles de roca

La excavación de túneles de roca depende considerablemente de tres elementos: máquinas perforadoras de roca, brocas perforadoras y explosivos. La pólvora cedió su puesto a la nitroglicerina, mucho más poderosa, seguida prontamente por la dinamita, introducida por Nobel en 1867, y la gelignita, las cuales son mucho más seguras de almacenar, manipular y usar. Por supuesto, ha habido mejoras y refinamientos, pero sin cambio de escala ni nuevos principios.

Para las perforadoras de roca, el aire comprimido se convirtió en la fuerza motriz aceptada, a pesar de que durante algún tiempo se prefirió la fuerza hidráulica en Europa y ahora vuelve a tener aceptación. Se ha aplicado mucho ingenio al diseño de los compresores, desde los dispositivos por caída de agua del túnel de Frejus hasta las máquinas reciprocantes movidas por vapor y las modernas máquinas reciprocantes o rotatorias accionadas por la electricidad o motores de diésel. El gran problema con las mismas brocas depende de su carácter autodestructor; con el martilleo ellas mismas se hacen pedazos. El desgaste natural en las puntas se observó primeramente en las brocas desmontables que se habían fabricado con el acero más resistente posible, pero luego, a su vez, fue necesario mejorar las espigas a fin de que resistieran los mayores esfuerzos de fatiga, mientras que todo el mecanismo, sometido a los golpes de martillo, vibraciones, polvo, arenisca y agua, se tenía que mantener dentro de estrictos límites de peso de manera que fuera posible su manipulación por parte de los obreros para las perforaciones horizontales y hacia arriba. Los túneles alpinos y, quizá más, el túnel de Hoosac, fueron la cuna de dichos avances, aprovechando con el tiempo cualquier mejora en la tecnología de acero. Uno de los grandes avances, de los años cincuenta, fue el desarrollo de la broca de carburo de tungsteno. Fue en Suecia, donde la abundante roca es muy antigua y muy dura, que se encontraron modos y medio para incorporar dicho material a las brocas de larga vida útil y se pusieron en uso.

1.2.5 Origen de los distintos sistemas de excavación

Durante el siglo XIX, a los diferentes sistemas de excavación de túneles, principalmente para canales y ferrocarriles, se les aplicaron nombres según los países en que se habían desarrollado. Cada tipo de terreno y sección de túnel tienen sus propios problemas, de manera

que cada sistema se modificaba para adaptarse a las condiciones y superar los defectos que pudieran presentarse. Siempre había una modificación a fin de adaptar cualquier sistema al terreno y a las circunstancias del túnel en particular. Aparte de la adecuación estructural de cualquier sistema, viejo o nuevo, la economía con respecto a los materiales puede ser vital, como lo puede ser también la velocidad de construcción, la que puede depender del libre acceso a las áreas de trabajo. Se incorporaban frecuentemente nuevos frentes a fin de ayudar al transporte de los materiales y abrir de este modo puntos adicionales de trabajo.

El *sistema inglés* incluía un frente superior (barras de gancho) de 3 a 6 m de longitud, excavado delante del frente principal. En este último se colocaban longitudinalmente dos barras principales de gancho, que descansaban en el revestimiento terminado en la parte de atrás y en postes en la parte delantera. Este frente se ampliaba luego lateralmente hasta bajar al punto de arranque del arco, estando la parte superior soportada por barras de gancho adicionales apuntaladas firmemente desde una solera inferior. Se excavaba entonces la mitad inferior del túnel, excavando progresivamente la solera principal y apuntalándola sobre el piso del túnel. Esto dejaba una cámara despejada dentro de la que se revestía una cierta longitud, quitando progresivamente los maderos del túnel si era posible, pero añadiendo otros si era necesario.

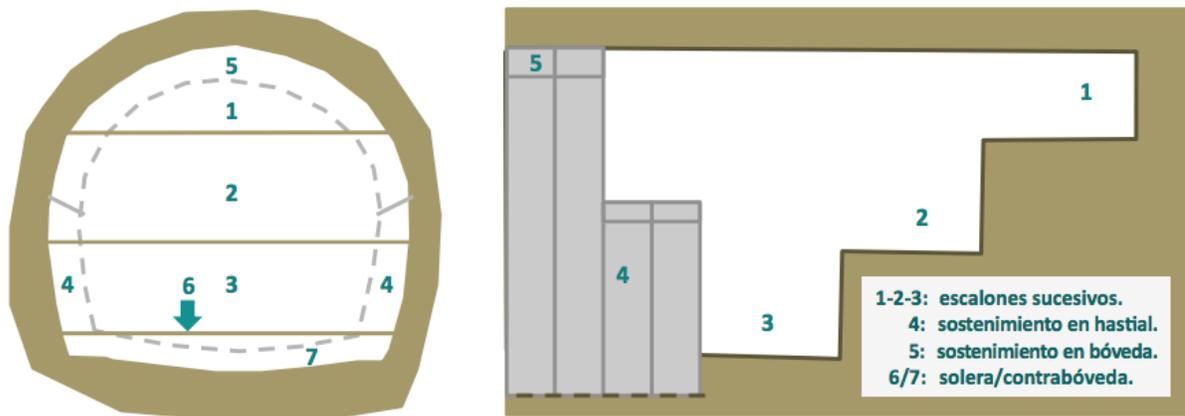


Figura 1.6 Esquema del sistema de excavación inglés.

La ventaja de este sistema es el espacio despejado de la construcción, pero aquel depende de que el tiempo de resistencia y la carga del terreno estén dentro de la capacidad de las barras de gancho.

El *sistema austriaco* (de barras transversales) se basaba esencialmente en un corto frente superior ampliado lateralmente a la dimensión total del arco, el techo estaba soportado por

nervaduras segmentadas del arco, fabricadas de madera, con un espacio relativamente corto de centro a centro. Por lo general, las nervaduras tenían postes radiales, los cuales se apoyaban en soleras que tenían que cambiarse al avanzar la excavación.

Después de excavar hasta el nivel de arranque el arco, la mitad inferior se excavaba de una manera muy semejante a la del sistema inglés.

El mérito de este sistema radicaba en la capacidad para construir las nervaduras tan cercanas como fuera necesario a fin de resistir las altas presiones del terreno, pero los sucesivos apuntalamientos podrían provocar la relajación del terreno, lo que produciría un aumento en la carga. Los tramos disponibles para la colocación del revestimiento eran bastante cortos y estaban obstruidos por los maderos.

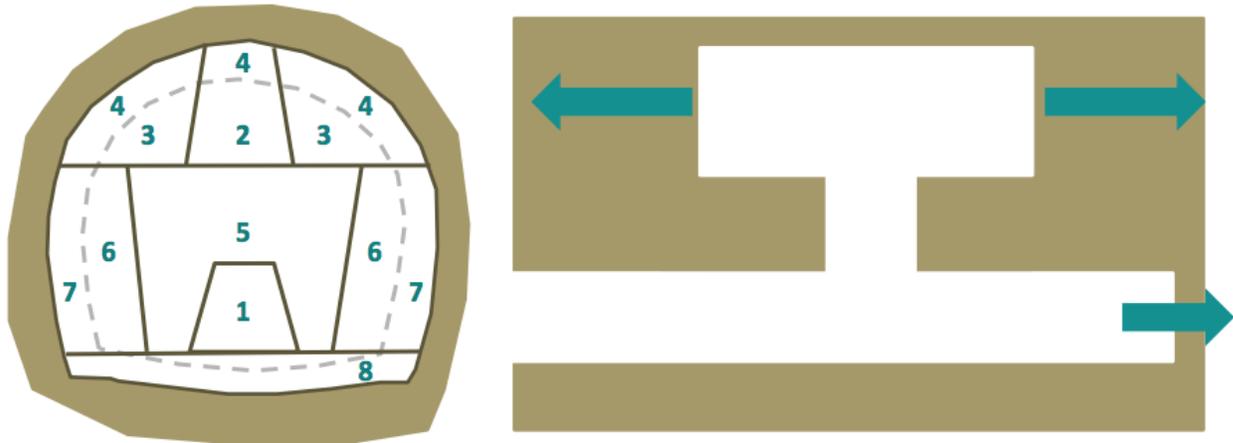


Figura 1.7 Esquema del sistema de excavación inglés.

El sistema belga (de apuntalamiento) se asemejaba inicialmente al sistema inglés en la excavación de la sección del arco hasta la media sección del mismo, pero en dicha etapa, antes de excavar la mitad inferior, se terminaba la construcción del arco. Era necesario entonces socavar y apuntalar el arco, lo que se podía hacer en cortar longitudes desde pequeños tiros, si fuera necesario.

La principal ventaja estribaba en la pronta terminación de la estructura del techo, siempre y cuando la operación de apuntalamiento no produjera una excesiva relajación del arco y, por consiguiente, fuertes cargas.

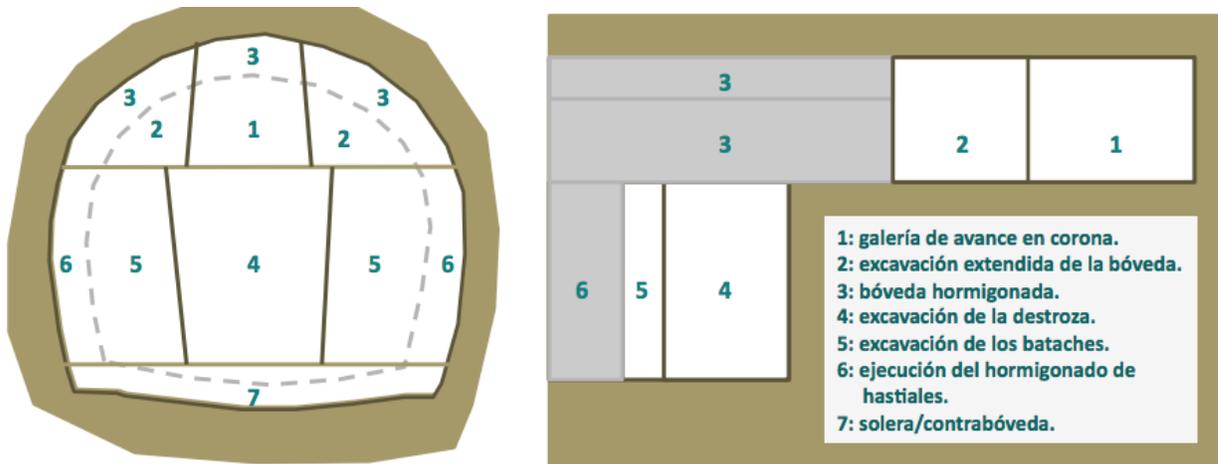


Figura 1.8 Esquema del sistema de excavación belga.

El *sistema alemán* (de núcleo central) se conoce también como un sistema francés que se utilizó alrededor de 1803 en el túnel de Tronquoy. En este sistema se construían primero las bases de las paredes del túnel, en pequeños frentes inferiores separados, seguidos por una sucesión de frentes superiores hasta llegar a la corona y se completaba el arco.

El núcleo de terreno se dejaba como un “banco” hasta la terminación del revestimiento y servía de apoyo a los postes verticales y radiales. Son obvias las ventajas del trabajo en pequeños frente de terrenos malos, pero podían ser anuladas por el aplastamiento y la distorsión del núcleo, así como por las dificultades para obtener una mano de obra apropiada que colocara el revestimiento en pequeñas unidades de espacios restringidos.



Figura 1.9 Esquema del sistema de excavación alemán.

El *sistema italiano* (de la plantilla) se desarrolló alrededor de 1870 con la construcción del túnel para el ferrocarril de Cristina a través de los Apeninos, que presentó grandes dificultades. Se encontraron fuertes presiones de la arcilla, que aplastaban los ademes y la mampostería. En el sistema que tuvo finalmente éxito se construyó primero una plantilla con mampostería sólida desde un frente inferior para proporcionar una base segura para los postes y columnas. Esta mampostería se extendía lateralmente y hacia arriba en pequeñas unidades, que incluían un grueso arco temporal, construido de mampostería sobre el frente de trabajo para que la excavación de la corona se pudiera finalmente ademar y revestir el arco utilizando el arco temporal como centro.

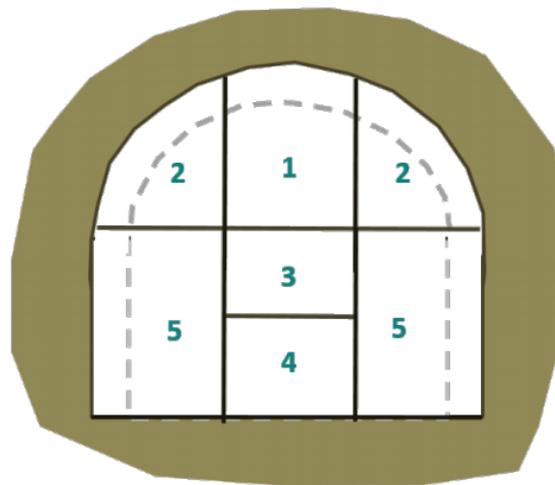


Figura 1.10 Esquema del sistema de excavación italiano.

El *sistema norteamericano* no constituía un patrón nacional modelo en el mismo sentido, pero había un patrón en común que se parecía al austriaco. Se excavaba un frente superior, desde el cual se ampliaba lateralmente la excavación para acomodar una nervadura poligonal del arco, construida de madera, hasta llegar al nivel de arranque. Se podría entonces realizar el ademe en el arranque por medio de postes laterales verticales.

En forma alternativa, se podían excavar primero frentes de “solera de pared” construyéndose las patas y el tope de la nervadura del arco desde la solera longitudinal que incluye la de pared. Habiendo asegurado la parte superior, la excavación y el ademado avanzaban hacia abajo para formar la “longitud” en proceso de construcción.

Resulta evidente que cada uno de estos sistemas tenía sus méritos y desventajas, y la utilización segura de cada uno de ellos dependía del conocimiento del sistema en todos sus detalles y del terreno en que se excavaba el túnel. Es decir, era necesario aplicar adaptaciones y modificaciones continuamente en cada túnel en particular.

1.2.6 Escudos

El año de 1869 representó, en el campo de los túneles subacuáticos, un año importante debido a que marcó la exitosa construcción del paso a desnivel del London's Tower utilizando un *escudo*⁷ o *pantalla* y revestimiento de hierro colado. El túnel se utilizó primero para que pasaran coches tirados por cables, y luego para peatones, hasta 1894; hoy en día conduce tuberías maestras de agua. El diseño fue creado por Barlow, pero fue su discípulo, Greathead, el responsable de su construcción y, en especial, del diseño y desarrollo del escudo, que fue el antecesor de casi todos los posteriores. El túnel tenía 402 m de largo y la excavación, de forma circular y 2.18 m de diámetro, estaba revestida con segmentos de hierro colado. El túnel se excavó en la arcilla London 19 m por debajo de la marea alta, con una cubierta de 7 m por debajo del lecho del río.

El escudo constaba de un cilindro formado por placas de recubrimiento de hierro forjado con un espesor de 13 mm y 1.45 m de longitud, rigidizado con anillos de hierro colado y con un diafragma atiesador que incorporaba un claro de puerta que se podía cerrar colocando tabloncillos a través de la misma. Detrás del diafragma habían seis gatos de tornillo que empujaban el escudo hacia adelante, desde el revestimiento de hierro forjado terminado; dicho revestimiento se colocaba anillo por anillo dentro de la parte trasera del escudo. Este revestimiento permanente constaba de tres segmentos de círculo además de un corte segmentario clave, unidos con bridas y pernos. Debido al espesor del recubrimiento de la parte trasera y de los claros de trabajo, el revestimiento de hierro colado no llenaba enteramente el hueco generado por la excavación, por lo que se adoptó la inyección de cemento para minimizar el movimiento del terreno; pero una jeringa de mano no era muy efectiva. Un avance de casi 3 m al día demostró la eficiencia de este sistema porque estaba en terreno de buena calidad. La importancia de esta pequeña operación de excavación de túneles estriba en que fue la primera en desarrollar y demostrar en la práctica tantos dispositivos esenciales para la excavación en

⁷Los escudos se componen de una cabeza giratoria accionada por motores eléctricos que avanza mediante una serie de gatos perimetrales, de un cuerpo de mando y controles, de cilindros de empuje y de un erector de dovelas.

escudos de túneles en terreno blando, a saber: un escudo rígido y simple, un diafragma protector, instalación del revestimientos dentro de las placas protectoras de la cola, un revestimiento de hierro fundido que proporcionaba, en combinación con el principio de inyección de cemento, el soporte inmediato del terreno.

Por otra parte, es importante resaltar que en 1922 Douglas Whitaker patentó una máquina tuneladora con escudo que tenía 150 metros de longitud, cuya importancia radica en ser la antecesora de las tuneladoras modernas.

1.2.7 Técnicas del siglo XX y visión a futuro

A comienzos del siglo XX ya habían sido ideadas y probadas, a costa de un duro trabajo, las técnicas básicas para la perforación de túneles, de manera que era posible construirlos en casi cualquier terreno si los contratistas estaban dispuestos a pagar el precio. Por consiguiente, el nuevo siglo contempló una continua expansión de la construcción de túneles en todo el mundo para servir a muchos y variados objetivos. Un sistema de construcción ampliamente adoptado fue el túnel sumergido para el cruce de los ríos; en este sistema se prefabrica el túnel en un dique seco, luego se hace flotar en el río y se hunde en una zanja ya excavada, en la que se conectan los tramos. Se han realizado muchos trabajos con este sistema en Holanda y también en EE.UU. Se han desarrollado máquinas excavadoras que trabajan dentro del mismo túnel, y que se han combinado con escudos para construir poderosas máquinas excavadoras de túneles.

1.2.7.1 Principales Proyectos en el mundo

A continuación se mencionan brevemente algunos de los proyectos más relevantes que se han construido en el mundo. Para lograr la construcción de alguno de ellos, se ha requerido del uso de las nuevas máquinas tuneladoras. En la tabla se describen las máquinas tuneladoras más grandes que se han construido en los últimos años.

Tabla 1 Principales proyectos de túneles en el mundo

Año	Túnel	País	Tipo de máquina	Diámetro [m]
1995	Adler	Suiza	Single shield	12,535
1997	Elbe	Alemania	Mixshield	14,200
2001	Lefortovo	Rusia	Mixshield	14,200

2004	SilverForest	Rusia	Mixshield	14,200
2005	M30	España	EPB Shield	15,200
2006	ShangaiChangjang	China	2x Mixshield	15,430
2010	Sparvo	Italia	EPB Shield	15,550
2011	Orlovski	Rusia	Mixshield	19,250

1.2.7.1.1 Eurotúnel entre Francia e Inglaterra

El proyecto de la construcción del Eurotúnel se concibió 100 años antes de su ejecución; sin embargo, por las limitaciones tecnológicas de la época se abandonó. Para el desarrollo del proyecto que comunica Francia e Inglaterra se realizó en 1985 una competencia en los gobiernos de ambos países; cuatro proyectos fueron evaluados: la *Euroruta*, una solución híbrida entre puente-túnel-puente; el *Europont*, un puente suspendido; el Transmanche Express, cuatro túneles paralelos, dos para tránsito ferroviario y dos para tránsito de vehículos; y el Eurotúnel. El proyecto ganador fue el Eurotúnel, cuya construcción duró ocho años y se concluyó en 1994; la longitud total es de 50.3 km para comunicar Francia con Inglaterra. Son dos túneles paralelos con diámetro interior de 7.6 m y un túnel para servicio de 4.8 m de diámetro; a lo largo de los túneles se conectan a cada 375 m con túneles de comunicación de 3.3 m de diámetro.

1.2.7.1.2 Túnel Seikan en Japón

Este túnel, construido en el país asiático, tiene como principal objetivo unir las islas Hokkaido y Honshu; su longitud es de 53.85 km y pasa a 240 metros por debajo del nivel del mar y 100 metros debajo del fondo marino. Este túnel ha fungido como arteria principal de comunicación entre estas dos islas; su construcción inició en septiembre de 1971 y fue inaugurado el 13 de marzo de 1988. Existen dos estaciones ubicadas por debajo de la línea costera; las dimensiones interiores del túnel son 7.85 m de altura y 9.7 m de ancho.

Paralelo al túnel principal, se tiene uno de servicio conectado por galerías a cada 600 m y el túnel piloto utilizado durante la construcción se emplea ahora para el drenaje del túnel principal. Dentro de éste, las vías de ferrocarril están habilitadas en ambos sentidos con dos separaciones de vía de 1067 m para trenes eléctricos convencionales, y de 1435 m para trenes de alta velocidad.

1.2.7.1.3 Túnel San Gotardo en Suiza

En Europa se construyeron dos túneles paralelos de 57 km de longitud denominados Gotthard Base Tunnel para conectar el norte y el sur de Europa por tren; los túneles cruzarán los Alpes suizos y comunicarán a Zurich con Milán. Para la construcción de los túneles se utilizaron cuatro tuneladoras TBM para excavación en roca, con lumbreras de 800 m de profundidad, por lo que los túneles están a una elevación aproximada de 500 msnm y tienen una cobertura de roca de aproximadamente 2 km con respecto a la cima de los Alpes. Actualmente es el túnel ferroviario más largo del mundo con sus 57 km, con diámetro de 9.5 m. A cada 312 m los túneles están conectados para cruce de pasajeros. Se estima que 24 millones de toneladas de roca fueron excavadas, equivalentes a cinco veces la gran pirámide de Keops y el costo del proyecto fue de 10 mil millones de dólares. La ruta será operada por AlpTransitGotthard, una subsidiaria de Ferrocarriles Federales de Suiza y se estima que para 2017 inicie las operaciones.

1.2.7.1.4 Túnel de la línea 8 del Metro de Shanghai en China

Para la construcción de este túnel urbano se utilizó una tuneladora melliza que simultáneamente perfora dos túneles; las dimensiones de excavación del túnel son 5.7 m de alto por 10.3 m de ancho; se utilizaron dovelas de concreto reforzado diseñadas especialmente para este tipo de configuración.



Figura 1.11 Imagen de la tuneladora melliza, utilizada en Shanghai, China.

1.2.7.5 Túnel para la Línea 12 del metro y el Túnel Emisor Oriente en México

En nuestro país recientemente se han realizado dos proyectos importantes de infraestructura que involucran la construcción de túneles en zonas urbanas. El Túnel Emisor Oriente es construido para desalojar el agua del drenaje de la Ciudad de México y su canalización se realiza a través de los 62 km de túnel de 7 m de diámetro. Para lograr el mayor avance de excavación del Túnel Emisor Oriente, se trabajó simultáneamente con seis máquinas tuneladoras TBM, una por cada tramo. A lo largo del trazo hay 24 lumbreras para introducir los equipos y para la operación de todo el proceso de excavación; las lumbreras varían en profundidad de 28 m a 160 m y al final del trazo se localiza el portal de salida.

En lo que respecta al túnel de la Línea 12 del metro, se cuenta con 7.5 km de largo, los cuales fueron excavados con una máquina tuneladora de escudo de frente balanceado (EarthPressure Balance EPB); la selección de esta máquina se debió a las características geotécnicas de suelo blando en la Ciudad de México. El diámetro de excavación que presentó, siendo en algunas zonas menor a un diámetro, para lo cual se requirió un monitoreo detallado de los asentamientos para evitar cualquier daño a las estructuras existentes sobre la superficie.

1.2.7.2 Nuevos Proyectos Internacionales a Futuro

1.2.7.2.1 Túnel Lyon-Turín

Con el proyecto del túnel Lyon-Turín, con una longitud de 53 km, se busca conectar el este y el oeste de Europa para completar su red ferroviaria, tanto de pasajeros, como de carga; esta nueva infraestructura permitirá beneficiar las zonas productivas del sureste conectándolas a los mayores puertos del Norte.

1.2.7.2.2 Túnel en el estrecho de Bering, Rusia-Alaska

Existe un proyecto para construir un túnel ferroviario que cruce por el estrecho de Bering; la longitud del túnel estaría entre 98 y 113 km; dentro de esta ruta hay dos islas. Del lado de Rusia se tendrá que construir una línea de Yakutsk a Uelem, hasta llegar al túnel, y su longitud tendrá de 3,850 a 4,020 km, dependiendo de la ruta que se elija. Del lado de Alaska, el ferrocarril irá de Nome a Fort Nelson con una longitud de 1,925 km; posteriormente se conectará a la red existente de ferrocarriles de Alaska y Canadá. Con este proyecto se podría llegar de Londres a Nueva York por tren.

I.3 Tipo de Túneles

Según su servicio los podemos clasificar en:

1.3.1 Túneles Carreteros

La construcción de túneles para carreteras no llegó a ser una práctica común hasta mucho después de iniciarse la construcción de túneles de ferrocarril. A causa de las limitaciones en la pendiente y las curvas, los ferrocarriles necesitaron bien pronto y frecuentemente de los túneles. Sin embargo, en aquel tiempo las pendientes más pronunciadas y las curvas muy cerradas eran aceptables para las carreteras, cuando no conducían tráfico pesado a grandes distancias y no estaban sometidas a una gran inversión de capital.

Entre las características especiales para la construcción de túneles carreteros se incluyen la configuración geométrica, construcción de la carretera, alumbrado, ventilación, control de tráfico, medidas contra incendios, instalaciones generales para limpieza y conservación y, a menudo, colocación del cableado y tubería para los servicios públicos. Los requisitos variarán según la situación del túnel y su carácter, ya sea urbano, para autopistas, subacuático o montañoso, así como largo o corto.

En algunos túneles de una sola dirección y dos carriles se han observado flujos reales de 3,000 a 4,500 vehículos por hora, comparados con la capacidad nominal de 2,000 a 2,700. Por el contrario, los túneles rurales y de montañas en donde el tráfico máximo tiene una proporción de usuarios normales pequeña, pueden tener una capacidad real del 80% al 90% de la capacidad nominal.

El factor principal que determina la capacidad de tráfico de un túnel es la geometría de su trazo y su sección transversal, pero su alumbrado y ventilación podrán imponer límites más bajos. Entre los factores especiales que intervienen en el flujo del tráfico se incluyen la ausencia de accesos laterales, que no pasen ciclistas ni peatones y la regularidad en el uso por una proporción substancial de conductores. Si se observa que la capacidad no es la adecuada, la geometría no se puede alterar fácilmente, pero un alumbrado deficiente se puede mejorar cuanto sea necesario. Las normas de las carreteras entonces se deberán formular dentro del contexto de las posibilidades prácticas de la construcción del túnel. Un túnel corto en una autopista y que atraviesa una cresta se debe trazar siempre que sea posible, de acuerdo con las normas corrientes de las autopistas, pero un paso subacuático bajo un estuario, o un túnel largo de montaña se localizarán primeramente para adaptarlos a las condiciones de

construcción de los túneles y determinarán en gran manera el trazo y las normas de las carreteras de acceso que lo conectan con las otras partes del sistema de carreteras.

En todos los casos, la geometría de la alineación del túnel está determinada por la situación de los portales y por las curvas y pendientes adoptados para su conexión. Como parte de un sistema de carreteras, la lineación se habrá de ajustar en conjunto a la línea de la carretera, y deberá ser compatible con las normas adoptadas. Es probable que un túnel, a menos que se trate de uno muy corto, sea un elemento substancial del funcionamiento de la carretera y del costo de construcción.

1.3.2 Túneles Ferrocarrileros

Se han construido en todo el mundo túneles para los principales sistemas de ferrocarril con muchos logros notables en los de los Alpes. En Nueva Zelanda se ha construido el túnel de Otisa, de 9 km de largo a través de lutita desmenuzada, el túnel de Rimutaka, de longitud similar, y otros. En Italia, la línea *Diretissima* entre Bolonia y Florencia incluía treinta túneles, de los cuales, el túnel del Gran Apenino de 18 km de largo a través de arcilla blanda y arenas movedizas y con la presencia de gas metano, fue el más formidable. En EE.UU. y en Canadá, los viejos túneles a un alto nivel han sido sustituidos y se están reemplazando por túneles más largos a un nivel más bajo y con pendientes y curvas más suaves con el fin de manejar de una manera más eficiente el tráfico de las mercancías pesadas. Japón se ha comprometido en años recientes en un importante desarrollo ferrocarrilero a fin de mejorar las comunicaciones en su montañoso país, y se han construido muchos túneles notables, tanto para el sistema general de ferrocarriles como para las nuevas líneas de alta velocidad.

A partir del primer ferrocarril, los túneles han sido un elemento fundamental, en primer lugar para dar una vía con una pendiente limitada. Las razones fundamentales para la excavación de un túnel de ferrocarril son topográficas, con dos tipos diferentes:

1. Para pasar a través de un obstáculo natural, en vez de pasar sobre él. Estos obstáculos pueden ser una loma, una serranía, un acantilado o una cadena montañosa.
2. Para pasar por debajo de un río, estuario o un canal marino.

1.3.3 Metro

La mayoría de las ciudades con una población del orden de un millón o más, y algunas menores, han hallado que los problemas de transporte de superficie son tan difíciles que están utilizando la tercera dimensión, la profundidad, para excavar túneles y construir ferrocarriles

urbanos. Los diversos nombres, Subterráneo, Metro, Subway, U-bahn, tránsito rápido, se pueden generalizar mejor bajo el término Metro., derivado del primer sistema de París o Londres, el Ferrocarril Metropolitano.

La característica más importante del ferrocarril subterráneo es la capacidad que tiene de transportar rápidamente grandes cantidades de personas por una vía exclusiva, que esté libre de cualquier interrupción de otros tipos de tráfico.

Los requisitos generales para la construcción de túneles de este tipo abarcan inicialmente el estudio de la información que se encuentra en los mapas, en los registros de los sondeos y en los de las construcciones anteriores, seguido por la preparación de un proyecto para estudiar posibles rutas por medio de sondeos, pozos y tiros de prueba y por métodos geotécnicos.

A veces es difícil obtener suficientes lugares que sean adecuados para los sondeos. Desafortunadamente, la selección de las posiciones puede estar controlada por la disponibilidad que por los requisitos para la excavación del túnel. En este aspecto, la excavación por debajo de las calles presenta sus ventajas, especialmente la construcción por el método de corte y relleno, ya que implica la ocupación de una extensa superficie. En ocasiones se tiene la oportunidad, por poco tiempo, de perforar en lugares que están desocupados por temporadas, y es de gran utilidad si los constructores los aprovechan con rapidez, aun cuando no se haya terminado todo el proyecto.

Los parques y los lugares al aire libre son lugares favorables para la perforación, aunque a menudo hay restricciones en cuanto a su uso.

Las ventajas evidentes de los estudios geotécnicos con métodos eléctricos, magnéticos, sínicos y otros están en especial desventaja en condiciones urbanas por la presencia de tuberías, cables y otros artefactos enterrados.

Aunque la selección de una ruta depende principalmente de los requisitos del tráfico, para decidir qué técnicas apropiadas de ingeniería se deberán emplear, la situación exacta y el trazado detallado de las estaciones, se diferenciará según se adopten túneles abiertos con tuneladora de corte y relleno, vías de superficie o elevadas.

La primera posibilidad que se examina es la construcción por corte y relleno. Una de las principales ventajas de operación de las estaciones relativamente someras, es que se puede obtener un acceso más fácil desde la superficie, lo cual tiene una gran importancia porque atrae pasajeros a un sistema que proporciona un tránsito rápido.

La segunda posibilidad a examinar es la necesidad de pasar por debajo de servicios enterrados, tuberías, cables, drenajes y, posiblemente, por debajo de ríos y túneles existentes, lo cual hace que el ferrocarril baje a una profundidad a la que la excavación de la zanja es más costosa que la perforación de un túnel. Este último factor es de mayor importancia cuando una ciudad diseña su sistema de transporte subterráneo con una cantidad de líneas que se cruzan.

Aunque abrir túneles con tuneladora parece ser en un principio el método más costoso, los ahorros indirectos al aminorar las alteraciones y la pérdida de comodidad, así como en los costos reducidos en la adquisición de la propiedad, con frecuencia contribuirán a que sea la alternativa preferida. Existe por supuesto, la desventaja de tener estaciones más profundas, que requieren escaleras eléctricas de mayor longitud y que, por consiguiente, aumentan el tiempo de acceso de los pasajeros.

En cuanto a los túneles abiertos con tuneladora, elegir el estrato más adecuado será importante al decidir la profundidad. Es necesario tener información especial sobre los niveles del nivel freático y sobre la posibilidad de excavar túneles en estratos impermeables. Dependiendo de la distancia entre las estaciones y de las pendientes aceptables, se podrían construir las estaciones a profundidades relativamente menores, haciendo ascender y descender el túnel principal entre las estaciones.

1.3.4Alcantarillado

El crecimiento de las ciudades, a menudo hacia los lados de los ríos, hace que el sistema de alcantarillado constituya un problema cada vez mayor, si la descarga se tiene que recolectar y desechar de un modo eficiente. El volumen que se maneja es similar al volumen de agua suministrado, y existen problemas adicionales al flujo superficial del agua en las tormentas. Los requisitos importantes de gradientes pequeños pero uniformes, no dejan mucha opción en lo que respecta a la profundidad de la tubería, de manera que los túneles pronto se vuelven necesarios, aún para las tuberías y todavía más para las alcantarillas maestras. Las mayores alcantarillas no sobrepasan a menudo unos cuantos metros de diámetro, pero tienen que perforarse en condiciones que son frecuentemente muy difíciles debido a que raras veces se puede determinar el nivel para adaptarse a los estratos de fácil excavación, y el túnel se deberá excavar, típicamente, a través de depósitos aluviales muy variables y hasta a través de terrenos de relleno, en las cercanías de las cimentaciones de edificios y otras estructuras del subsuelo características de las ciudades.

Todo el agua que se suministra a una ciudad se tiene que volver a descargar a un sistema fluvial y, debido a que las alcantarillas se inician como tubos un poco por debajo del nivel del terreno, la presión disponible para la descarga está normalmente muy limitada. En cualquier caso, deberá haber un gradiente descendente y continuo a lo largo de cada alcantarilla nada más con la pendiente necesaria para conducir el flujo. Los túneles son necesarios cuando la profundidad de los tubos es demasiado grande para excavar zanjas o cuando no se puede tolerar la modificación de la superficie. Otro factor que hace que los túneles sean necesarios es cuando ya no se permiten las descargas de viejas alcantarillas a un río o al mar, y se deberán construir nuevas alcantarillas colectoras para llevar el flujo a las plantas de tratamiento. Las salidas que descargan al mar cantidades limitadas de aguas negras sin tratar se consideran todavía satisfactorias, pero será necesario llevarlas mucho más allá de la línea de mareas para que se puedan utilizar túneles.

1.3.5 Centrales hidroeléctricas subterráneas

Otra clasificación de los túneles, hablando de los destinados al transporte es debido a su ubicación. Los obstáculos que hay que salvar son variados (cadenas montañosas, ríos o mares, y en particular en las ciudades, las calles, edificios o cualquier otro tipo de estructura urbana).

Según su localización los podemos clasificar en:

1.3.6 De montaña

Si el obstáculo es una cadena montañosa, el paso a través de la misma por medio de un túnel puede representar un ahorro considerable en tiempo y energía y, ciertamente, facilita el paso que de otra manera exigiría pendientes y curvas totalmente inaceptables para dicho fin. Los canales, que deberán ser a nivel, excepto en los escalones de las esclusas; los ferrocarriles, donde son satisfactorias las pendientes mayores de aproximadamente 1% o 2%, hasta las carreteras con pendientes aceptables de 3% o 4%, ponen de relieve, además, la secuencia histórica del desarrollo de los túneles.

Si se plantea trazar una ruta superficial subiendo por un valle que tenga un paso o puerto en la cima que se desea cruzar, es de esperar una dificultad progresiva en la ascensión según va llegando al paso y el valle se hace más estrecho y empinado. Sólo se podrá determinar la pendiente dominante del ferrocarril o la carretera tratando de ascender tan rápidamente como sea permisible, desde el punto de partida utilizando las laderas del valle y cortando de un modo

uniforme a través de las curvas de nivel. Con la pendiente cada vez mayor y la reducción del ancho necesario para las desviaciones, el paso o cima puede ser inalcanzable y será inevitable la construcción de un túnel parteaguas. Este procedimiento da la longitud mínima del túnel, pero se tiene generalmente la alternativa de excavar un túnel más largo a un nivel más bajo con pendiente más cortas o suaves y curvas menos cerradas, efectuando ahorros en la operación por las distancias, ascenso, consumo de combustible y tiempo, pero con un mayor costo de inversión. Este es el problema típico que es más notable en el túnel del tipo alpino, ya sea para ferrocarril o carretera. El túnel largo y costoso justificará la inversión de capital si se puede contar con suficiente tráfico.

1.3.7 Bajo el agua (subacuático)

La selección de un túnel en lugar de un puente, en este caso, para atravesar un río o estuario depende de los factores peculiares para cada situación. Cuando se desean tener numerosas vías para el tráfico y cuando las condiciones de cimentación hacen posible claros moderados, el puente podrá ser muy bien la alternativa menos costosa, pero el costo de claros muy largos en un puente aumenta de manera desproporcionada, y si las condiciones de la cimentación son desfavorables y si la navegación requiere claros largos y una considerable altura libre, el túnel es la mejor selección.

Los túneles excavados, sea por métodos convencionales o mecánicos, requieren una cobertura de macizo rocoso de buena calidad. En Noruega ha sido adoptada la cobertura de roca entre 40 y 60 metros para túneles excavados a profundidades entre 100 y 200 metros con relación al nivel del mar. Grandes coberturas resultan en gran extensión de rampas de aproximación, lo que en muchos casos también constituye una desventaja.

En este contexto, los túneles subacuáticos aparecen como una solución muy atractiva. Se ubican un poco de bajo del fondo del curso de agua, lo que reduce mucho el largo del cruce y de las rampas de aproximación. La estructura es compuesta por elementos premoldeados que son ensamblados *in situ*.

La técnica de los túneles subacuáticos fue desarrollada a finales del siglo XIX. En Estados Unidos y Japón la técnica predominante adoptó elementos construidos en acero. En Europa, predominan los de hormigón premoldeado.

Los elementos son construidos en un dique seco, y una vez listo se procede a inundarlo para que el armado sea transportado, hasta el lugar de instalación, por flotación utilizando remolcadores. Una vez ahí, son sumergidos y se colocan yuxtapuestos.

La interferencia con la navegación es mínima: como los elementos son construidos en seco, las interferencias con el tráfico acuático solamente ocurren durante el evento de sumersión.

No hay gran necesidad de calidad geotécnica del macizo donde se apoyan los elementos. En estos túneles el volumen vacío es muy grande y la densidad promedio de la estructura es baja, en la mayoría de los casos menor que la del material retirado durante el dragado.

Las juntas de sellado entre los elementos son de tipo inflable. En el momento de posicionar un elemento, la presión hidrostática actúa sobre la extremidad tapada, opuesta a aquella colocada en contacto con el elemento previamente instalado, comprimiendo así la junta entre los dos elementos. El grado de estanqueidad alcanzado es muy bueno, usualmente mejor que en túneles excavados. La técnica fue desarrollada en Estados Unidos y es aplicada frecuentemente en todo el mundo.

Las estructuras de túneles sumergidos son muy seguras. El túnel más profundo del mundo es el del proyecto Marmaray, en Estambul, a través del Estrecho de Bósforo, conectando Europa a Asia. Tiene 60 m de profundidad y se encuentra en una región de elevada sismicidad, muy cerca de la falla activa de Anatolia.

Hasta el 2010 el más profundo era el de la línea BART, para el cruce de la Bahía de San Francisco, en California, con 40 m de profundidad. Este túnel también cruza una falla activa, la de Hayward. En Argentina, el túnel sumergido Paraná se sitúa entre las ciudades de Santa Fe y Paraná, a través del río Paraná. Es un túnel vehicular con 10.8 m de ancho, con dos carriles. La extensión total es de 2,367 m con 36 elementos de 65.5 m cada uno. Estos elementos fueron posicionados a partir de una plataforma jack-up y fueron lastrados con agua en cédulas de 13 m de largo.

1.3.8 Urbanos

La construcción de túneles por debajo de las calles de una ciudad son en la actualidad una actividad común para casi todos los tipos de transportes, pero los largos túneles urbanos se utilizan principalmente para ferrocarriles subterráneos (metro), abastecimiento de agua y sistemas de alcantarillado. Se requieren túneles más cortos para los pasos inferiores de las

carreteras y los pasos subterráneos para peatones, construidos principalmente por el método de corte y relleno. Se sugieren a veces túneles más largos para carreteras, pero los problemas de acceso y ventilación aumentan las dificultades y el costo en oposición a lo cual la preservación del terreno y las características deseables del ambiente mejorado dan un resultado muy poco adecuado.

A este tipo de túneles, que corren por debajo de las áreas urbanas, los determina normalmente la topografía, es por esto que no necesitan considerarse aparte. Entre los ejemplos se incluyen los primeros túneles de la línea principal en la terminal de Liverpool, el del ferrocarril Liverpool-Manchester y el túnel del río Hudson en Nueva York. En lo que se refiere a otros túneles urbanos que no estén topográficamente determinados, tienen una gran semejanza con los túneles del tren subterráneo, tanto en concepto como en construcción. Entre las principales diferencias se pueden incluir:

- mayor sección transversal
- estaciones terminales
- no hay estaciones intermedias en el túnel
- servicios menos frecuentes
- trenes más largos y pesados
- sin tracción eléctrica

En la ciudad de Nueva York se presenta un ejemplo interesante de cómo domina la topografía. La línea principal que va de oriente a poniente tiene que pasar por un túnel por debajo del río Hudson para llegar a la isla de Manhattan y, después de cruzar esta estrecha isla, pasar bajo el East River nuevamente en un túnel. Por lo tanto, la estación de Pensilvania, cerca del centro de la ciudad, está a 12 o 20 m por debajo de la calle y es una estación de paso entre accesos por un túnel, más que una terminal.

La generalización acerca de que haya una sección transversal menor en el ferrocarril subterráneo sólo es importante cuando se trata de sistemas autónomos, cuyo uso está restringido a su propio equipo rodante especial y las dimensiones especificadas para la carga. Los túneles de la línea principal normalmente deberán ser capaces de aceptar todo el equipo rodante que se utilice y, a menudo, deberán dejar espacio libre para las puertas de vaivén de los vagones y espacio libre en la parte superior para equipo eléctrico o para la ventilación.

Según la geología

1.3.9 Túneles en suelos blandos

En el sentido aplicado a la excavación de túneles, el término terreno blando comprende en general las gravas, arenas, limos, arcillas y depósitos aluviales. Basándose en el aspecto de su comportamiento, Terzaghi⁸ clasificó dichos terreno en categorías: compacto, desmoronado, deslizante, no compacto con roca alterada, y esponjoso. Las propiedades y comportamientos dependerán en un alto grado del contenido y el movimiento del agua, cuyo manejo constituye un aspecto vital de una operación segura y eficiente.

En suelos blandos, con cualquier categoría que no sea el compacto, siempre será necesaria alguna forma de soporte inmediato, mediante ademado, escudos, revestimientos permanentes o una combinación de todos ellos. El manejo de agua se puede llevar a cabo de diversas maneras: bombeo, abatiendo el agua del suelo, congelación, inyección de selladores y aire a presión.

En terrenos de tipo blando existe un estado de esfuerzos que aumenta con la profundidad. La componente mayor es normalmente de compresión vertical y proporcional al peso del material que se encuentra encima, y está acompañada, generalmente, por una compresión horizontal. La magnitud del esfuerzo horizontal es, por lo común, de casi un cuarto del valor del esfuerzo vertical, aunque las condiciones pueden ser muy diferentes en los lugares donde hayan operado fuerzas geológicas, recientes o antiguas, y donde la estructura de la roca no es uniforme.

1.3.10 Túneles en roca

Al comparar la roca con el suelo blando como medio para la construcción de túneles, destaca un contraste obvio: que la roca es mucho más difícil de romper, que por lo común requiere barrenado y explosivos, y que los requisitos para el soporte del terreno necesitan ahora un enfoque diferente.

⁸ Karl Von Terzaghi, ingeniero de origen checo ampliamente reconocido por ser el padre de la Mecánica de Suelos.

I.4 Métodos de construcción

Seleccionar el método de excavación para la construcción de un túnel depende de varios factores dentro de los que destacan el tipo de terreno a excavar y su longitud, sin dejar a un lado aquéllos de índole técnico, económico, así como el tiempo de ejecución. A continuación se exponen algunos elementos a considerar:

Cuando la roca tiene una resistencia alta, es necesario emplear excavación mediante explosivos, tomando en cuenta que sin el correcto diseño y control de las voladuras, se producirán sobre excavaciones que repercutirán en la viabilidad financiera del proyecto. Por otro lado, si la resistencia es media o baja, puede emplearse indistintamente la voladura o la excavación por medios mecánicos, cuyos principales obstáculos o limitaciones se encuentran en la dureza, tenacidad y abrasión de las rocas.

1.4.1 Excavación mediante explosivos

El sistema de perforación y voladura para la excavación de túneles es una técnica convencional utilizada cada vez con mayor frecuencia debido a las numerosas ventajas que presenta frente a la excavación mecánica en cuanto a tipo de roca, rendimientos altos y movilidad de los equipos. La excavación mecánica es rentable cuando se tiene una longitud considerable de túnel y se conocen suficientemente las características geológicas y geotécnicas del terreno; debe tomarse en cuenta que en rocas muy duras, el desgaste de piezas y en ocasiones los bajos rendimientos son una clara desventaja de este sistema de excavación, como lo es también cuando se presentan zonas de falla y la presencia de terrenos mixtos.

Las partes o trabajos elementales de que consta el ciclo de trabajo característico de las excavaciones mediante perforación y voladura son las siguientes:

- Replanteo en el frente del esquema de tiro.
- Perforación de los taladros.
- Carga de los taladros con explosivos (barrenos).
- Voladura y ventilación.
- Retiro del escombros o rezaga y saneo del frente de excavación.

El esquema de tiro es la disposición en el frente del túnel de los taladros que se van a perforar, la carga de explosivo que se va a introducir en cada uno y el orden en que se va a

hacer detonar cada barreno, diseñándose al principio de la obra con base a la experiencia y a una serie de reglas empíricas que más adelante se ejemplifican. Posteriormente, a lo largo de la excavación del túnel, se va ajustando en función de los resultados obtenidos en cada voladura.

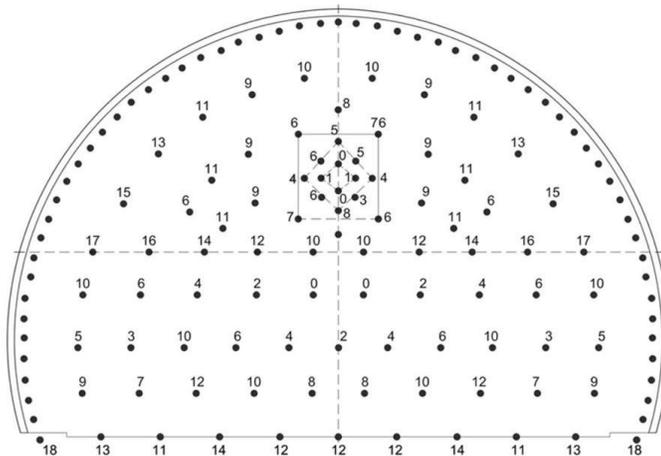


Figura 1.12 Esquema de tiro.

Una ventaja de la voladura del banqueo con barrenos horizontales, es que se utiliza el mismo sistema de trabajo y maquinaria que la fase de media sección superior, pudiendo recortarse con la voladura la forma teórica del túnel. Por otro lado, el procedimiento para llevar a cabo la voladura en banco es más rápido, con un consumo menor de explosivos, y no necesita ser retirado el escombros en cada voladura, pero requiere de un recorte posterior para conseguir el perfil del túnel en los hastiales.

Los taladros deben de tener una longitud de un 5 a 10% superior a la distancia que se quiera avanzar con la pega, llamada longitud de avance, ya que siempre se producen pérdidas que impiden aprovechar al máximo la longitud de los taladros. Las longitudes de avance típicas están comprendidas entre 1 y 4 metros y se fijan en función de la calidad de la roca, cuanto mejor es la calidad del terreno, mayores serán los avances posibles. Con una roca de calidad media-adeuada es habitual perforar taladros de 3 a 3.50 metros para avanzar entre 2.80 y 3.20 metros en cada voladura respectivamente.

Para la perforación y voladura, la sección teórica del túnel se divide en zonas, en las que las exigencias, tanto de densidad de perforación, como de carga específica de explosivo y secuencia de encendido son distintas. Estas zonas son:

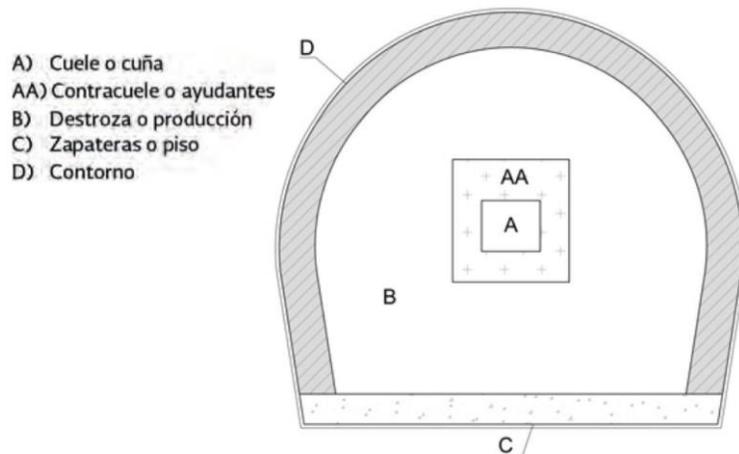


Figura 1.13 Zonas de una sección de voladura.

Cuele. Es la fase de voladura que dispara en primer lugar. Su finalidad es crear una primera abertura en la roca que ofrezca al resto de las fases una superficie libre hacia la que puede escapar la roca con la cual se posibilita y facilita con arranque. El cuele es sin duda la más importante de todas las fases de la voladura de un túnel en relación con el avance de ésta.

Existen distintos tipos de cuele, los cueles en “V” y en abanico, que facilitan la salida de la roca hacia el exterior, pero tienen el inconveniente de que los taladros forman un ángulo con respecto al eje del túnel, por lo que su correcta perforación tiene una mayor dificultad y exige variar el esquema de perforación para cada longitud de avance. En túneles de secciones de excavación reducidas estos cueles no permiten grandes avances por voladura.

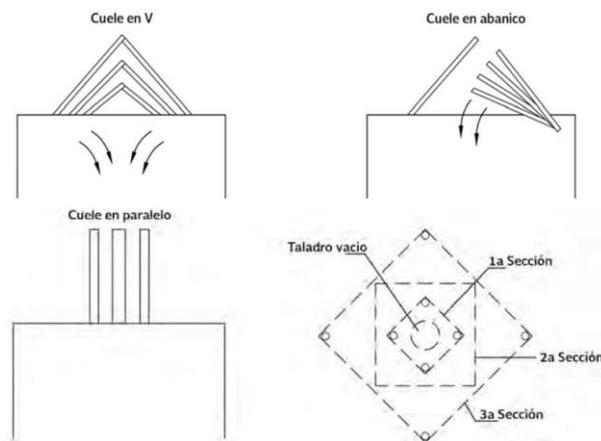


Figura 1.14 Tipos de cuele.

El cuele más usado por su simplicidad es el cuele paralelo. Consiste en un taladro vacío (barreno de expansión), sin explosivos, de mayor diámetro que el resto (de 75 a 102 mm) y, a su alrededor, tres o cuatro secciones de taladros cargados que detonan sucesivamente siguiendo una secuencia preestablecida. La misión del barreno de expansión es la de ofrecer una superficie libre que evite el confinamiento de la roca de modo que facilite su arranque. Su diámetro varía entre 100 y 300 milímetros. En ocasiones puede sustituirse por dos taladros vacíos de diámetro menor (75 mm).

Destroza: La destroza es la parte central y más amplia que la voladura, cuya eficacia depende fundamentalmente del éxito de la zona del cuele y contracuele, que es la zona crítica de la voladura.

Zapateras: La zapatera es la zona de la voladura situada en la base del frente, a ras del suelo. Los taladros extremos suelen ir un poco abiertos “pinchados” hacia afuera con objeto de dejar sitio suficiente para la perforación del siguiente avance. Comúnmente los barrenos de las zapateras son los que más carga explosiva contienen ya que, aparte de romper la roca han de levantar ésta hacia arriba. Para evitar repiés, van ligeramente “pinchados” hacia abajo y son disparados en último lugar.

Contorno. Los taladros perimetrales o de contorno son importantes pues de ellos dependerá la forma perimetral de la excavación resultante. Lo ideal es que la forma real del perímetro del túnel sea lo más parecida posible a la teórica, aunque las irregularidades y discontinuidades de la roca dificultan dicho objetivo.

Existen dos técnicas de efectuar los tiros perimetrales: el recorte y el precorte. El recorte, que es la técnica más empleada, consiste en perforar un número importante de taladros paralelos al eje del túnel en el contorno, a la distancia conveniente (entre 45 cm y 100 cm) y con una concentración de explosivo pequeña o incluso nula. En la secuencia de encendido son los últimos barrenos en detonar.

Por otro lado, la técnica del precorte se perfora un mayor número de taladros perimetrales y paralelos entre sí unas distancias entre 25 cm y 50 cm, con una concentración de carga explosiva entre 0.1 y 0.3 kg/m. Esta técnica exige una perforación muy precisa que asegure un buen paralelismo y una homogénea separación en los taladros. En la secuencia de encendido, son los primeros en detonar, con lo que se crea una fisura perimetral que aísla y protege la roca de las vibraciones del resto de la voladura. La técnica del precorte, por su esmerada

ejecución y costo elevado, es de uso poco frecuente en túneles, excepto en casos muy especiales.

Los explosivos que se usan en la construcción de túneles carreteros deben seleccionarse tomando en cuenta la generación de humos y gases nocivos liberados por la voladura. Logrando mantener estos factores al mínimo, es como se puede reducir considerablemente la duración total del ciclo de trabajo.

En el desarrollo de túneles, por lo general, se favorece la barrenación con la aplicación de procedimientos como son el de cuña quemada, que es el resultado de la falta de espacio para posicionar al equipo y hacer una cuña en “v” o una barrenación en “v”, y en su caso barrenación en abanico.

Si se realiza el trabajo con un “jumbo”, esta actividad puede estar apoyada utilizando brocas de mayor diámetro, con el objeto de crear un área de alivio mayor en el momento del disparo, tal que permita un desalojo eficaz y rápido del material quebrado producto de los barrenos cargados y no cargados que forman la cuña; en conjunto, se puede lograr una eficiencia del orden del 95 % de avance.

Después de perforar la cuña teniendo en consideración que su ubicación será en un lugar plano del frente, así como evitar perforarla en la misma área donde se ubicó en la voladura anterior; posteriormente se procede a perforar los barrenos de producción, paredes, clave y piso considerando las siguientes reglas básicas:

1. Paralelismo en la barrenación.
2. Formación de un plano vertical imaginario al fondo de la barrenación.
3. Un orden de encendido de los barrenos que vaya agrandando secuencialmente la apertura del frente.

Los barrenos de producción se irán perforando en forma rotativa y secuencial aumentando su bordo según se vaya diseñando el número de cuadros calculados para complementar la plantilla de todo el frente.

Posteriormente se perforarán los barrenos perimetrales o de contorno, ubicándolos en los límites de la excavación del túnel y se detonan después de los barrenos de producción; estos se perforan más cerca unos de otros y se cargan más ligeros o con productos de baja densidad para minimizar el sobre-rompimiento o daños a la roca restantes del perímetro de la obra.

1.4.1.1 Maquinaria de perforación

La perforación de los taladros se puede hacer mediante el uso de martillos manuales accionados por aire comprimido, mediante martillos hidráulicos montados sobre una máquina automóvil denominada jumbo, o con la utilización de track drill en las zonas donde el jumbo, por cuestiones de espacio, no sea funcional.

1.4.1.1.1 Martillos Manuales

Los martillos manuales de aire comprimido funcionan a percusión, es decir, la barrena golpea contra la roca y gira de forma discontinua entre cada percusión, separándose del fondo del taladro. El detritus es arrastrado hasta el exterior del taladro mediante agua, que tiene también la finalidad de refrigerar la barrena. Los martillos manuales son actualmente de uso poco frecuente, sólo se usan, obviamente en túneles muy pequeños o de forma accidental, pues tienen rendimientos muy inferiores a los jumbos y requieren mucha mano de obra.

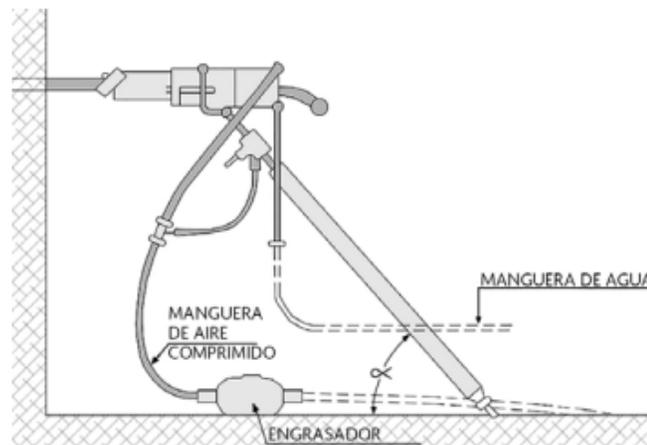


Figura 1.15 Imagen de un martillo manual.

1.4.1.1.2 Jumbos

La máquina habitual de perforación es el jumbo, y consta de una carrocería de automóvil dotada de dos o más brazos articulados, según los modelos. En cada brazo puede montarse un martillo de perforación o una cesta donde pueden alojarse uno o dos operarios y que permite el acceso a cualquier parte del frente. El funcionamiento de los jumbos es eléctrico cuando están estacionados en situación de trabajo y pueden disponer también de un motor diésel para el desplazamiento. Los martillos funcionan a rotopercusión, es decir, la barrena gira continuamente ejerciendo simultáneamente un impacto sobre el fondo del taladro. El accionamiento es hidráulico, con lo que se consiguen potencias mucho más elevadas que con el sistema neumático.



Figura 1.16 Imagen de un jumbo.

Los rendimientos de perforación que se consiguen en los jumbos hidráulicos modernos, pueden superar los 3.5 m/min de velocidad instantánea de perforación. Los jumbos actuales tienen sistemas electrónicos para controlar la dirección de los taladros, el impacto y la velocidad de rotación de los martillos e incluso pueden memorizar el esquema de tiro y perforar todos los taladros automáticamente.

Los brazos de los jumbos modernos están accionados hidráulicamente, existiendo una gran variedad de diseños, pero pueden clasificarse en los siguientes grupos: de tipo trípode, de giro en la base o en línea. Del número de cilindros y movimientos del brazo dependen la cobertura y posibilidades de trabajo de los jumbos, por lo que la selección de los brazos es un aspecto importantes, ya que las labores a realizar son variadas.

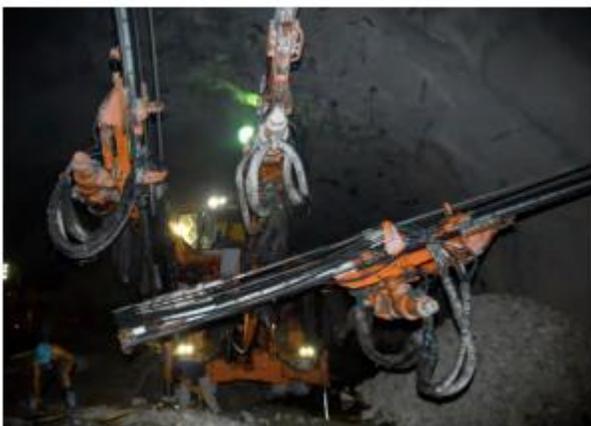


Figura 1.17 Imagen de un jumbo de tres brazos

1.4.1.1.3 Track-drill e hidro-track

Los equipos conocidos como track-drill están montados sobre chasis de orugas e invariablemente autopropulsables; el equipo cuenta con una pluma a lo largo de la cual se desplaza la máquina de perforación. Las plumas admiten movimiento vertical (con respecto al plano horizontal), con el objeto de poder perforar también con inclinaciones de hasta 45°. Actualmente, en todos los casos, la presión de perforación y traslado del mismo se proporciona mediante aire comprimido que lo suministra un compresor por separado o un compresor montado en el mismo chasis (hidro-track).



Figura 1.18 Imagen de un Track-drill en operación.

1.4.1.1.4 Canastilla de servicios

La rapidez y seguridad con la que se pueda ejecutar cada una de las actividades que intervienen en la excavación de un túnel, se requiere de la utilización de equipos auxiliares como son las canastillas para ejecutar actividades como son las de amacice, cargado de explosivos, instalación de tuberías para servicios de agua, energía eléctrica o aire para la ventilación de la obra. Este equipo va montado, generalmente, en neumáticos para proporcionar mayor versatilidad en sus aplicaciones.



Figura 1.19 Imagen de una canastilla de servicios.

1.4.2 Excavación Mecánica

La introducción en años recientes a nuestro país de equipos de perforación modernos, equipados, más grandes y eficientes; de brocas, accesorios y acero de barrenación altamente mejorados y, de equipos de rezaga de gran capacidad, ha contribuido de forma importante a una aplicación más amplia, eficiente y segura de la técnica de excavación mecánica de un túnel, efectuada cuando no se requieren o se tiene la limitante de emplear explosivos.

1.4.2.1 Martillos hidráulicos

Se montan sobre retroexcavadoras convencionales, algunos incluyen utensilios especiales, como brazos telescópicos que facilitan el acceso a todo el frente de excavación. Adicionalmente se requiere la utilización de palas cargadoras para retirar el material excavado.



Figura 1.20 Imagen del martillo hidráulico.

Los martillos hidráulicos realizan un ataque puntual, la energía se genera mediante motores eléctricos o diésel y se transmite a través de un circuito hidráulico a la punta situada en el extremo articulado de la máquina. La roca se quiebra mediante la energía de impacto generada y el material rocoso excavado se desprende en bloques.



Figura 1.21 Imagen de un martillo hidráulico en operación.

Estos martillos suelen emplearse en macizos rocosos con una matriz dura, fuertemente plegados o fracturados. La excavación con martillo es posible en terrenos de buena calidad, sin embargo los rendimientos son muy bajos y los costos muy altos; no obstante, como ya se ha comentado, en circunstancias especiales se requiere su utilización en macizos rocosos de calidad media a alta.

1.4.2.2 Pistola Neumática

Es un equipo de perforación ligero que trabaja con una presión de aire de 100lb/in, maniobra en forma ascendente, descendente o de frente principalmente. Está constituida por una pistola común con un sistema de montaje sobre una pierna neumática.

Aunque en túneles carreteros su utilización es mínima, en ocasiones se emplea para llevar a cabo galerías de conexión, nichos para instalaciones especiales, nichos SOS, túneles piloto, etc.

1.4.2.3 Rozadoras

Son máquinas que excavan mediante una cabeza giratoria, provista de herramientas de corte (dientes) que inciden sobre la roca, van montadas en un brazo monobloque o articulado y todo el conjunto sobre un chasis móvil de orugas.

Existen dos sistemas distintos de corte en las rozadoras actuales: el milling de cabeza radial y el ripping de cabeza frontal. En el milling la cabeza gira en torno a un eje longitudinal, paralelo al eje del túnel.

Las picas van dispuestas en forma helicoidal y golpean a la roca de forma lateral. En el ripping la cabeza gira en torno a un eje que es perpendicular al eje del túnel, tratándose en realidad de dos cabezas simétricas. Las picas golpean frontalmente a la roca.

Ambos sistemas proporcionan resultados similares, por lo que no se puede considerar que uno sea mejor que el otro, si bien a igualdad de potencia de la cabeza de corte y para una roca de dureza determinada, el rendimiento de excavación de las rozadoras de cabezal frontal es un 30% superior al de las rozadoras con cabezal radial, sin embargo el empleo de una u otra estará en función de las condiciones geológico-geotécnicas del material.

Las picas son de dimensiones y formas distintas según el uso. Cada fabricante proporciona unos criterios y consideraciones de uso de sus picas, que debe comprobarse sobre el terreno a excavar hasta elegir el tipo más adecuado. Generalmente se usan picas delgadas y estrechas para suelos y rocas blandas y, picas gruesas de forma fusiforme para las rocas más duras.

Las rozadoras se clasifican por su peso, dado que la fuerza que ejerce la cabeza contra la roca es contrarrestada únicamente por el peso de la máquina. De este modo, a mayor peso mayor será la capacidad de la rozadora para excavar rocas más resistentes, y por tanto irá dotada de mayor potencia de corte.

La excavación mediante rozadoras ofrece diferentes ventajas sobre las que destacan:

- Las secciones de excavación grandes pueden subdividirse y excavar en fases sucesivas; también es posible ajustarse a una determinada secuencia de excavación.
- Permite un perfilado de la sección prácticamente sin sobreexcavación y se trabaja con un frente limpio y muy accesible.
- No genera mayores vibraciones.
- El empleo de rozadoras puede ser por lo general, en terrenos de resistencia media a blanda y en rocas fracturadas de calidad media a baja.



Figura 1.22 Imagen de una rozadora en operación.

1.4.2.4 Máquinas de precorte

El método de precorte mecánico con revestimiento previo a la excavación, preserraje mecánico de anillos o premill, es una técnica muy moderna que consiste en realizar un corte al avance, a partir del frente de excavación en el extradós de la sección de excavación del túnel. Este método se emplea en suelo y rocas blandas.

El procedimiento constructivo cae dentro de los métodos denominados de presostenimiento al avance. Se emplea en la ejecución de túneles en entornos urbanos o semiurbanos, que tengan limitaciones de deformaciones en la superficie por la existencia de estructuras, vías de comunicación y servicios situados por encima de la clave del túnel.

Con el método del precorte mecánico se produce un confinamiento del frente de excavación, previo a la realización de la misma, con ventajas importantes en cuanto a la estabilidad del frente.

Este corte se efectúa con una máquina específica de sierra que consta de dientes de widia. La ranura que se genera con el corte tiene un espesor de entre 18 y 25 cm de espesor y una profundidad de alrededor de 3.5 m. Ésta se rellena con concreto lanzado de alta resistencia y fraguado rápido en todo el perímetro, obteniéndose una bóveda estabilizante.

Una vez fraguado el concreto de la bóveda, se asegura la estabilidad de la excavación, creando el sistema de sostenimiento. Posteriormente se efectúa la excavación del material que

queda por debajo de la bóveda. En caso de ser necesario, se pueden realizar refuerzos con marcos metálicos o anclajes.

Se pueden conseguir avances de 3.0 a 3.5 m traslapando de 0.5 a 1.0 m entre prebóvedas de concreto. A la menor distancia posible del frente de excavación, sin que se interfiera con los trabajos en este frente, se colarán los muros laterales que empotran las bases de los anillos, para finalmente, mediante una cimbra metálica convencional, se cuela el revestimiento.



Figura 1. 23 Imagen de una máquina de precorte.

1.4.3 Máquinas Tuneladoras

Las máquinas topo, tuneladoras o *TBM*⁹ son máquinas integrales de construcción de túneles, por cuanto son capaces por sí solas de excavar roca o suelos, retirar el escombros y aplicar el revestimiento del túnel. La máquina va avanzando dejando detrás de sí el túnel terminado con un rendimiento elevado con promedios alcanzables incluyendo los preparativos y curvas de aprendizaje de 400 m /mes, pero que también en terreno estable se pueden alcanzar en el mejor de los casos, rendimientos de más de 1,000 m / mes.

El criterio de selección de tuneladoras en general está directamente relacionado como se indica en la siguiente tabla, en el tipo de terreno por excavar y si su frente es estable:

⁹ TBM, del inglés *TunnelBoring Machine*. La traducción literal sería máquina perforadora de túneles.

Tabla 2 Criterios para selección de unatuneladora

CRITERIO GEOTÉCNICO PARA LA SELECCIÓN DE TBM														
TIPO DE MÁQUINA A EMPLEAR		RESISTENCIA DE ROCA					ESTRUCTURA DE ROCA				INGRESO DE AGUA			
	RESIS. COMP. [Mpa]	COHESIÓN	SOPORTE FRENTE	ESCUDO	INST. RECUBR.	JUNTAS		TAMAÑO GRANO		SOPORTE DEL FRENTE	ESCUDO	INST. RECUBR.	VOL. POR 30 M ³	CONSECUENCIAS EN
						RQD	DISTANCIA	<0.02mm	<0.06mm					
TBM ESCUDO SENCILLO TBM CON ESCUDOS	>250												ILIMITADO	CAP DE BOMBEO
	250-100				ATRÁS DE TBM	100-90%	> 2 M					ATRÁS DE TBM	ILIMITADO	CAP DE BOMBEO
	100-50				ATRÁS DE TBM	90-75%	2.0 - 6.0 M			POSIBLE		ATRÁS DE TBM	>20L/S	CAP DE BOMBEO
	50-25			RECOMENDADO	ATRÁS DE TBM	75-50%	0.6 - 2.0 M			POSIBLE MECÁNICO	RECOMENDADO	EN ÁREA TBM	>10L/S	SOPORTE DE FRENTE
	25-5			REQUERIDO		50-25%	0.2 - 0.06 M			MECÁNICO	REQUERIDO	CON ESCUDO	>5L/S	SOPORTE DE FRENTE
	5-1		RECOMENDADO	REQUERIDO	CON ESCUDO	<25%	< 0.06 M			MECÁNICO POSIBLE EPB/SLURRY	REQUERIDO	CON ESCUDO	>2LS/	METODOLOGÍA
	<1	>30		REQUERIDO	CON ESCUDO	<25%	< 0.6 M	VARIABLE		MECÁNICO POSIBLE EPB/SLURRY	REQUERIDO	CON ESCUDO	>2LS/	METODOLOGÍA
		30-10	RECOMENDADO	REQUERIDO	CON ESCUDO	<25%		>30%		MECÁNICO POSIBLE EPB/SLURRY	REQUERIDO	CON ESCUDO	>2LS/	METODOLOGÍA
		10-5	RECOMENDADO	REQUERIDO	CON ESCUDO/ INYECCIÓN DE MORTERO INMEDIATA			>20%	<50%	EPB/SLURRY	REQUERIDO	CON ESCUDO/ INYECCIÓN DE MORTERO INMEDIATA	>2LS/	METODOLOGÍA
		5-1	REQUERIDO	REQUERIDO	CON ESCUDO/ INYECCIÓN DE MORTERO INMEDIATA			>10%	<30%	EPB/SLURRY	REQUERIDO	CON ESCUDO/ INYECCIÓN DE MORTERO INMEDIATA	>2LS/	METODOLOGÍA
	0	REQUERIDO	REQUERIDO	CON ESCUDO/ INYECCIÓN DE MORTERO INMEDIATA			>10%	<20%	EPB/SLURRY	REQUERIDO	CON ESCUDO/ INYECCIÓN DE MORTERO INMEDIATA	>2LS/	METODOLOGÍA	

A continuación se presentan los tipos de tuneladoras:

- Tuneladoras para roca
 - Tuneladora abierta de viga principal con zapatos laterales
 - Escudo sencillo
 - Escudo doble
 - Escudos con rozadoras
- Tuneladoras para suelos
 - EPB's
 - Slurry TBM
- Tuneladoras tipo dual
 - Crossover TBM's

1.4.3.1 TBM Tuneladora abierta de viga principal con zapatas laterales para roca dura

La tuneladora de roca dura es una máquina abierta (no protegida totalmente) cuyo avance progresa al excavar la roca del frente por medio de sus herramientas de corte mecánico, con las que se aplican los esfuerzos combinados del par de giro de su cabeza y del empuje longitudinal conseguido por reacción contra la roca de unas zapatas extensibles (los “grippers”¹⁰), con las que se fija la parte estática de la máquina. A estas máquinas se aplica también la denominación específica de “topos”, y “mole” en inglés.

La alta abrasión de algunas rocas así como los contenidos elevados de sílice pueden producir elevados desgastes en los cortadores, lo que conlleva un aumento en el costo.

También pueden existir sistemas adicionales de colocación de anclas, marcos metálicos y lanzamiento de concreto. Los topos también pueden tener sistemas para colocación de railes sobre los que circulan las vagonetas y una plataforma donde va alojado todo el sistema de control, guiado y suministro de energía. En definitiva, el topo consta de todos los elementos necesarios para completar el túnel, montados uno tras otro y actuando de forma sucesiva.

¹⁰Grippers. también conocidos como codales transversales, son las zapatas que apoyan la máquina contra la roca durante el proceso de perforación. Deben soportar la fuerza de empuje necesaria para el avance de la TBM, proporcionada por los cilindros de empuje y transmitirla a las paredes del túnel.

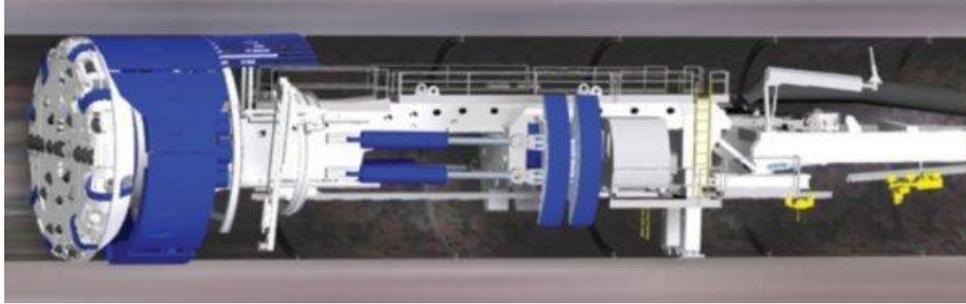


Figura 1.24 Imagen de una tuneladora abierta.

1.4.3.2 TBM Escudo Sencillo

Consta de una cabeza de corte giratoria de forma circular donde van alojados los discos cortadores. Detrás de la cabeza se encuentra un sistema formado por gatos que presionando sobre el terreno y sobre la cabeza ejercen en ésta la presión necesaria para realizar con éxito la excavación de la roca. Es escombro se carga automáticamente en el frente y se conduce hacia atrás mediante una cinta transportadora, que lo deposita en unas vagonetas para su traslado al exterior, o sistemas de bandas continuo.

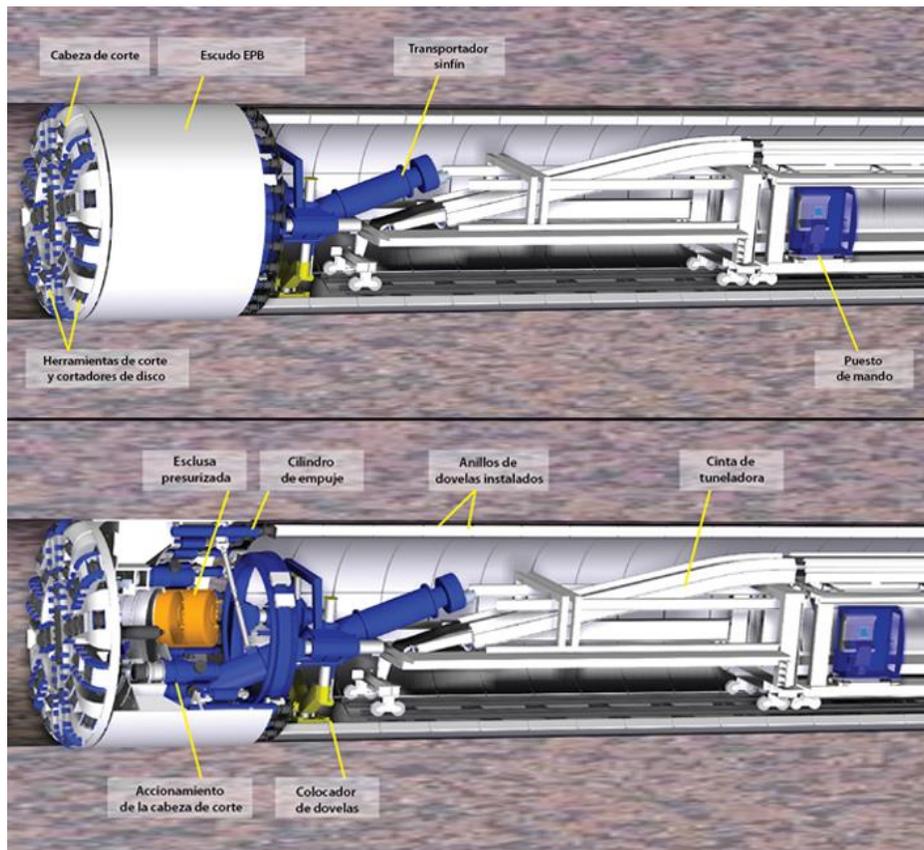


Figura 1.25 Imagen de una tuneladora sencilla.

1.4.3.3 TBM Escudo Doble

Esta máquina es similar a la anterior de escudo sencillo con la ventaja de tener doble escudo que le permite realizar dos operaciones simultáneas, la de excavar avanzando la cabeza cortadora al mismo tiempo que en el escudo trasero se instalan las dovelas correspondientes del recubrimiento primario.

Otra ventaja importante es que al estar en terreno muy fracturado o débil, la máquina se puede impulsar del mismo recubrimiento primario de dovelas.

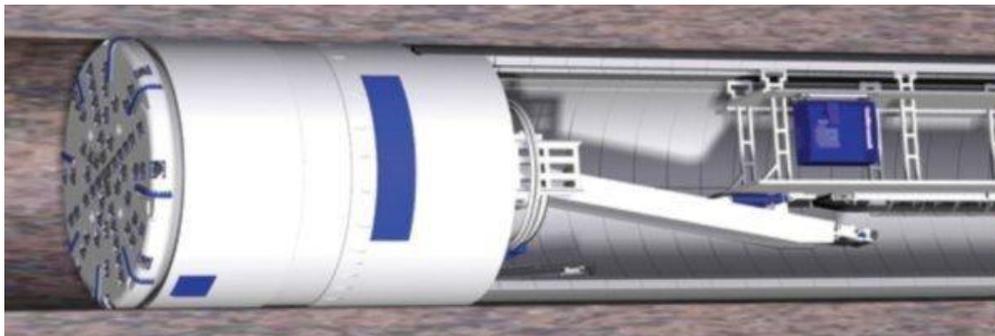


Figura 1.26 Imagen de tuneladora con escudo doble.

1.4.3.4 Tuneladora EPB¹¹ para suelo blando

El escudo cuyo avance progresa de forma similar a las tuneladoras de roca dura, es una máquina que incorpora un sistema integral de protección, y en la que el empuje longitudinal se logra por reacción contra un revestimiento, al no ser la roca suficientemente competente para poder aplicar “grippers” contra ella. Los escudos tienen 3 elementos distintivos:

- La EPB se aloja dentro de una estructura de acero laminar (la coraza o “escudo”) cuya misión es el sostenimiento del terreno en la zona ya excavada y todavía ocupada por la máquina.
- La tuneladora dispone de un sistema de colocación de anillos de revestimiento, de concreto o marcos metálicos, que permite completar el ciclo de avance, al sustituir a la coraza metálica como sostenimiento.
- El diseño básico ofrece versiones para trabajar en frentes altamente inestables, manteniendo las condiciones de seguridad.

¹¹EPB, del inglés *Earth Pressure Balance*. Son escudos de presión de tierras que se utilizan normalmente en la excavación de suelos blandos.



Figura 1.27 Imagen de tuneladora para suelo blando.

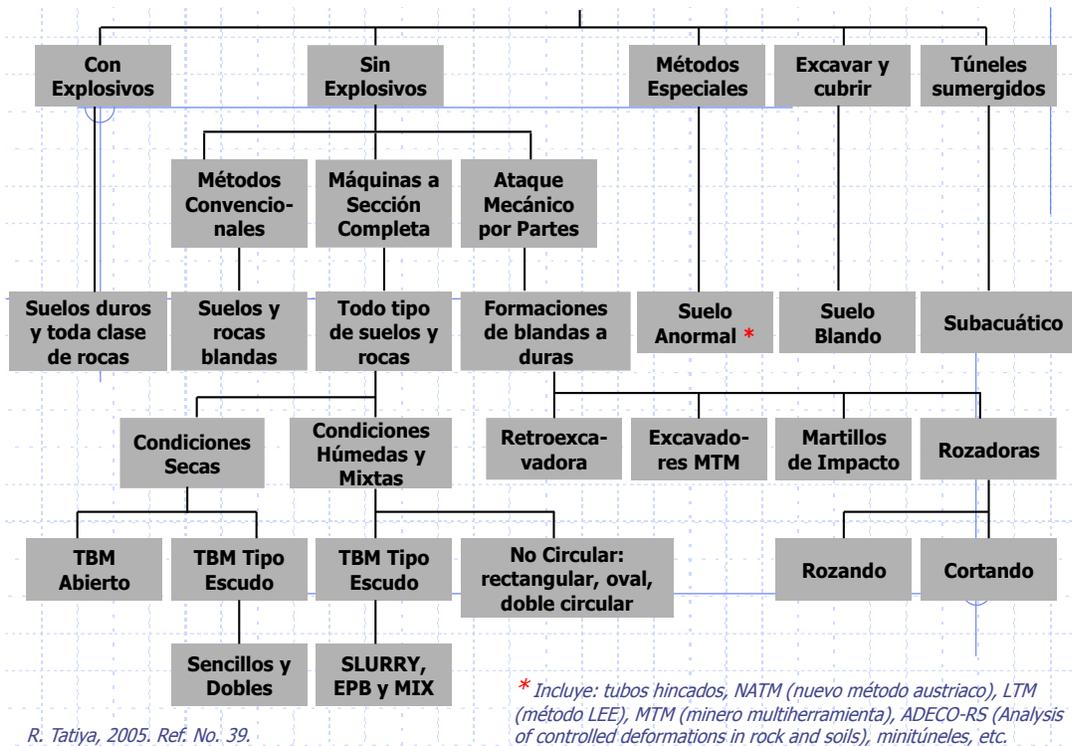
Las principales limitaciones de este método de excavación están ligadas a la geometría:

- La sección debe ser circular y la longitud tal que permita asumir una inversión elevada y unos gastos igualmente importantes de transporte y montaje en obra.
- El radio de curvatura mínimo está alrededor de los 300 m, aunque son deseables al menos 500 m.
- La pendiente máxima debe ser tal que permita una circulación fluida de carros para retiro del material producto de la excavación está en un entorno máximo del 3.5 al 4%. Esta pendiente se puede superar en el caso de extracción de un material con cintas, aun en este caso es necesario disponer de vías para poder introducir al frente de excavación materiales, repuestos, etc.

Otras limitaciones se refieren a la geología y a la geotecnia de los materiales a atravesar. Así en terrenos excesivamente blandos o con problemas de sostenimiento podría hacer inviable la utilización de este método. Las fallas son un inconveniente cuando se utilizan topes, debido a que los sostenimientos no pueden actuar hasta la colocación de dovelas, por lo que

el avance suele ser lento, los tiempos que transcurren son demasiado largos favoreciendo el desprendimiento del terreno.

A manera de conclusión, se anexa un esquema donde se ejemplifican de forma general los métodos de excavación de túneles que han sido empleados hasta la actualidad.



R. Tatiya, 2005. Ref. No. 39.

II. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

II.1 Tipo de Contrato

En base a la Licitación Pública Nacional No. LO-009000988-N19-2014 se adjudicó el contrato a la propuesta conjunta presentada por las empresas Construcciones y Trituraciones, S.A de C.V. e Ingenieros Civiles Asociados, S.A de C.V

El importe en el que se adjudicó el contrato a la propuesta se indica a continuación:

Tabla 3 Fallo del contrato

Propuesta	Importe	IVA (16%)	Total
Construcciones y Trituraciones, S.A de C.V. e Ingenieros Civiles Asociados, S.A de C.V	\$ 2,461,540,424.39	\$ 393,846,467.90	\$ 2,855,386,892.29

Por lo tanto, se deduce de los términos de referencia de la licitación que el contrato de obra pública fue a *Precios Unitarios*.



Figura 2.1 Logotipos del consorcio ganador de la licitación.

II.2 Demanda del Proyecto

Derivado de la construcción de la línea del Tren Interurbano México-Toluca surgió la necesidad de construir el segundo tramo que consta de 1 inter-tramo, la zona de la sierra de Las Cruces en el Parque Nacional Miguel Hidalgo, zona donde empalmó el bi-túnel con los tramos: Zinacantepec – Lerma tramo 1 y Santa Fe – Observatorio tramo 3, ambos de la citada línea. La Figura muestra esquemáticamente el trazo completo de esta línea férrea.

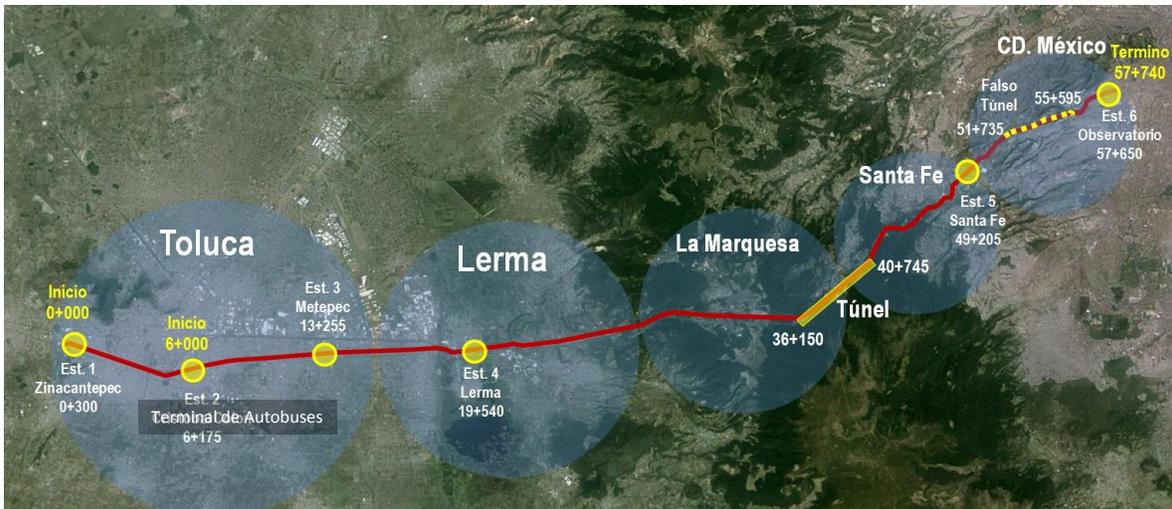


Figura 2.2 Mapa del trazo de la línea del tren Interurbano México-Toluca

Este tramo de 4.634 km de longitud, consistió en una obra integral formada por dos estructuras subterráneas, que conectaron el tramo en túnel con los tramos extremos; Lerma – Portal Poniente del Túnel Ferroviario la Marquesa; así como los tramos Portal Oriente del Túnel Ferroviario la Marquesa – Sta. Fe, el primero ubicado en el área metropolitana de la de Ciudad de Toluca y el segundo en el área Metropolitana de la Ciudad de México. Con estos tramos se logró dar continuidad al Tren Interurbano México – Toluca en su zona de la Sierra de las Cruces.

El proyecto constó de una importante obra en túnel con dos cuerpos (bi-tubo). En este caso el gálibo de cada tubo que se presentó en el proyecto ejecutivo, así como los túneles de interconexión entre sí, que servirán para evacuación en caso de emergencia y que también formaron parte del proyecto ejecutivo, dieron cabida a todas las instalaciones electromecánicas, vía y material rodante seleccionado por la proyectista para dar servicio en esta línea.

II.3 Fases del Proyecto

II.3.1 Desarrollo Proyecto Ejecutivo

Para la ejecución del Tramo 2 se debieron seguir todas las normas y las mejores prácticas de la ingeniería; nacionales e internacionales, por lo que el Proyecto se dividió en los siguientes procesos:

Trabajos de topografía, preparaciones para vía y diseño geométrico

La actividad de topografía es una de las primeras en iniciar los trabajos de cualquier construcción ferroviaria. Se refiere al estudio y control de la geometría del proyecto en base al alineamiento horizontal y vertical que para este efecto proporciona el mismo proyecto, derivando de éste el trazo y nivelación del terreno, los levantamientos y las referencias necesarios para el desarrollo del proyecto, definición de ejes y rasantes, volumetrías, control y monitoreos diversos, por lo que el objetivo de la topografía fue *determinar y verificar que los diversos ejes y niveles indicados en el proyecto sean establecidos en campo de manera precisa, teniendo como meta que la obra se desarrolle en el lugar, con la dimensiones y tolerancias previstas en el proyecto ejecutivo.*

Para tal efecto, inicialmente se debió de cumplir con la recepción y entrega física de todos los puntos de control necesarios para implementar el proyecto, por lo que se recibió en campo tanto la ubicación de mojoneras y bancos de nivel patrón, como los valores que tuvieron cada uno de ellos, en el entendido que a partir de tales puntos se controló plenamente el proyecto.

De manera conjunta con la supervisión, se realizaron las actividades que a continuación se señalan:

- Se redactaron minutas de la entrega de los puntos de control en campo en las cuales firmaron todos los asistentes al acto, dando fe de la ubicación y estatus físico de las mojoneras o puntos en la entrega-recepción.
- Se especificó el tipo de información recibida y el sistema de coordenadas que lo rigió, en el entendido que el proyecto fue controlado con coordenadas topográficas(planas) que fueron entregadas por el cliente, y se realizó una revisión, enlace, verificación y levantamiento de los puntos de control recibidos para así comprobar la veracidad de los mismos.
- Para llevar a cabo la construcción La Contratista se apegó a los documentos definitivos que la empresa proyectista emitió para estos túneles, derivado de esto se recibió, por parte de la residencia de obra, una copia impresa y los archivos electrónicos PDF y DWG de los planos y documentos topográficos, así como de diseño geométrico generado en el proyecto ejecutivo:
 - Planos planimétricos

- Planos altimétricos
 - Planos de referencias topográficas
 - Planos de ubicación de BN
 - Planos de trazo
 - Planos de perfil
 - Planos de secciones tipo
 - Memorias de cálculo y descriptivas del proyecto geométrico
 - Descripción del sistema de vías
 - Especificaciones técnicas
 - Especificaciones funcionales
 - Planos tipo del sistema de vía
- De forma conjunta con la supervisión, se verificaron y documentaron todos los resultados de los trabajos topográficos verificando cadenamientos y bancos de nivel.

Como trabajos topográficos iniciales, y una vez verificados los puntos de control, poligonales entre ellos y corrimiento de verificación de bancos de nivel, se establecieron las mojoneras y puntos de control para la propia construcción del túnel habiendo iniciado con:

Los caminos de acceso al proyecto, localizando el eje de los caminos propuestos en la licitación, marcando los cerros de construcción a fin de delimitar la zona de influencia que ocuparon tales vialidades para acceder con la maquinaria necesaria para su construcción dentro de la franja marcada evitando invadir áreas naturales del entorno local; una vez determinado el trazo, se realizaron secciones de terreno natural mismas que se conciliaron con la supervisión conforme se avanzaba en los trabajos, y una vez que concluyeron las etapas de construcción, se citó a esta misma supervisión para la recepción de las diversas capas de la terracería y mejoramientos colocados, los cuales estuvieron apegados al cumplimiento de la rasante especificada en proyecto.

A la par se localizaron los portales de entrada y salida delimitando “cerros de corte” para inicio de los desmontes y actividades de movimiento de tierras.

Fue muy importante la referenciación de los puntos de control del proyecto en donde se colocaron puntos fuera de la influencia de los propios trabajos para que estos se conservaran intactos durante el período de ejecución de la obra.

Estos puntos se ubicaron estratégicamente con el fin de controlar la mayor parte del proyecto. Para lograrlo, previamente se construyeron mojoneras de acuerdo a la geometría de la figura siguiente:

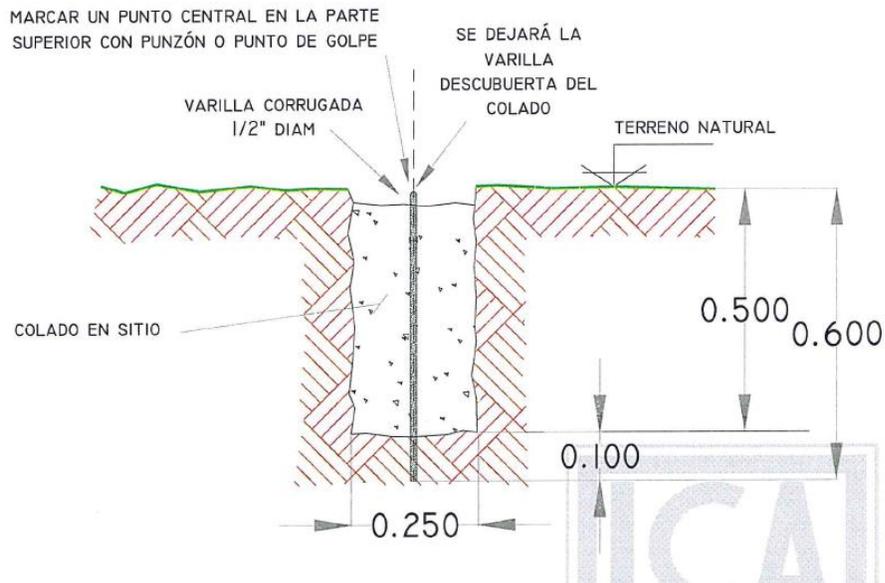


Figura 2.3 Mojonera de piso para control topográfico del proyecto.

Conforme avanzó la excavación para los portales, fue importante verificar la geometría del talud en ejecución y prever el marcaje de los diversos tratamientos o mejoramientos que el proceso constructivo indicaba, como la colocación de anclas, drenes, concreto lanzado, y cuidando la conclusión de los cortes de taludes para marcar la ubicación de las bocas de los túneles iniciando así los trazos para los trabajos del pretúnel y bóvedas.

Se definió el trazo para el armado de las máquinas tuneladoras, alineándolas al respectivo pretúnel. Previo al inicio de los trabajos de excavación de los túneles con la máquina tuneladora, se instaló, calibró y se puso en marcha el sistema de guiado topográfico del escudo, administrando los datos de proyecto en el software instalado para este fin.

Una vez iniciada la excavación del túnel, y conforme avance la TBM, fue importante colocar puntos de control fijos dentro del túnel para introducir la poligonal de rectificación del trazo, y con ella actualizar los datos del sistema de guiado de la máquina tuneladora, realizando esta actividad por lo menos en cada 150 anillos excavados con el fin de realizar correcciones al trazado.

Los bancos de nivel de trabajos se esparcieron en distancias aproximadas a 100 m entre ellos y se efectuaron verificaciones periódicas para conocer su comportamiento vertical, lo que sirvió para definir algún posible cambio en la elevación original debido a los hundimientos diferenciales.

El levantamiento planimétrico incluyó el mobiliario urbano, puentes peatonales, paramentos, guarniciones, postería de líneas aéreas de telefonía, electricidad, televisión por cable, registros de drenaje y agua potable o reciclada, señalamientos de Petróleos Mexicanos, CFE, de compañías de servicio de telefonía, fibra óptica, torres de alta tensión y distribución de gas.

Fue necesaria la participación de las empresas privadas u organismos públicos propietarios u operadores de los servicios mencionados, para la definición de las trayectorias de sus instalaciones que pudieron ser afectadas por la obra.

Conforme avanzaba la máquina tuneladora, se realizaron conciliaciones de perfiles en el nivel de arrastre del túnel y desviaciones horizontales comparados contra el eje de proyecto; esto se efectuaba por lo menos una vez por semana en conjunto con la supervisión, firmando de enterado ambas topografías.

Todo lo anterior se hizo bajo la estricta supervisión del cliente, para su validación y aceptación, situación que sin duda tuvo como resultado que la obra se realizara de manera precisa en la ubicación establecida en el proyecto y apegándose a las normas vigentes, en el tiempo esperado y con la calidad necesaria.

Trabajos relativos a la Mecánica de Suelos

Los trabajos de mecánica de suelos tienen como objetivo generar información que permita corroborar y precisar los datos de la geología, la geohidrología y la geotecnia en que se sustenta el proyecto, asimismo disipar dudas en las zonas con información insuficiente, generando un mayor conocimiento relativo a la identificación, distribución, características y propiedades mecánicas y geohidráulicas de las formaciones existentes en el subsuelo a lo largo del tramo en cuestión, permitiendo contar con información adicional que permita optimizar los procesos, garantizando la factibilidad y la estabilidad tanto de las estructuras que integran el proyecto, como de las colindantes.

Se ejecutaron 30 sondeos mixtos intercalando la técnica de avance controlado y muestreo continuo alterado mediante sistema Wireline aunado a la instalación posterior de un piezómetro doble tipo Casagrande en el mismo

En la siguiente se muestra a detalle el sitio de ejecución de cada sondeo de esta campaña de exploración:

Tabla 4 Detalles de los sondeos de la mecánica de suelos.

N°	PK aproximación	Longitud sondeo[m]	Observaciones
1	36+200	30	boquilla
2	36+200	30	boquilla
3	36+200	25	boquilla
4	36+400	35	
5	36+700	38	
6	36+860	52	
7	37+100	80	
8	37+200	85	
9	37+550	100	
10	37+840	130	inclinado
11	38+150	200	inclinado
12	38+280	170	inclinado
13	38+440	140	inclinado
14	38+660	95	
15	38+960	75	
16	39+060	75	
17	39+300	70	
18	39+450	70	
19	39+580	65	
20	39+640	65	
21	39+760	70	
22	39+960	67	
23	40+060	52	
24	40+200	45	
25	40+340	55	
26	40+480	75	
27	40+600	70	
28	40+740	35	boquilla
29	40+800	25	boquilla
30	40+820	25	boquilla

Para la ejecución de los trabajos, se plantearon los alcances siguientes:

- Se realizaron 26 sondeos verticales y 4 sondeos inclinados: avance con broca tricónica. Recuperación de suelo mediante Wireline y/o barril HQ y posterior instalación de un piezómetro doble abierto tipo Casagrande en cada uno de los barrenos (en cada sondeo se instalaron dos tuberías piezométricas cuyos bulbos se situaron a cotas diferentes).
- Ejecución de pruebas de laboratorio a las muestras alteradas de los sondeos.
- Para determinar la posición del nivel freático se llevó un control diario de los niveles de agua en el sondeo durante su perforación. Tras su finalización se procederá a instalar tubería piezométrica de pvcranurada, rodeada de gravilla.
- Se tomaron muestras de agua de cada nivel acuífero para determinar agresividad al concreto, para proceder a su respectivo análisis.
- Se realizaron ensayos de permeabilidad, tanto para suelos como para roca, llevándose a cabo cuatro ensayos por sondeo.
- En lo que respecta al tema de abrasión, se llevaron a cabo ensayos en la zona de túnel, intentando cubrir todas las litologías; para lograrlo, se realizaron al menos dos baterías de los siguientes grupos de ensayos por sondeo:
 - En suelos abrasión y lámina delgada con recuento mineralógico
 - En rocas Cerchar, AVS Y DRI
- Se realizaron tres ensayos presiométricos/dilatométricos en el entorno próximo al túnel. Así mismo se llevaron a cabo ensayos presiométricos en los niveles superficiales de alteración en aquellos sondeos situados en zonas de escasa montera y en los emboquilles. En el caso de los tramos donde el túnel atravesó rocas duras (basaltos), los ensayos se situaron preferentemente en los tramos de especial interés como pueden ser zonas muy fracturadas. En los tramos donde el túnel discurre por frentes mixtos, se investigó preferentemente las rocas muy alteradas y de baja resistencia.
- Los ensayos se realizaron en un laboratorio certificado:
 - En suelos: aproximadamente a cada 3 m se realizaron trabajos de identificación, límites de Atterberg, humedad, densidad y granulometría.
 - En rocas: aproximadamente a cada 3 m se efectuaron cálculos de densidad, humedad y resistencia a compresión simple y tracción. Así

mismo, a cada 6 m se realizaron pruebas triaxial en roca y resistencia a compresión simple con bandas extensiométricas para la obtención del módulo de deformación.

- Todas las muestras recolectadas en campos se enviaron al laboratorio donde fueron clasificadas en forma visual y al tacto, en húmedo y seco, de acuerdo con los lineamientos marcados por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Esta clasificación se complementó con la información mínima siguiente:

En suelos:

- Determinación de límites de consistencia y contracción lineal
- Contenido natural de agua
- Densidad de sólidos
- Clasificación de suelos según SUCS
- Análisis granulométrico
- Expansión libre y/o bajo carga
- Difracción de Rx
- Abrasión

En rocas:

- Clasificación geológica
- Índice de calidad de la roca
- Compresión Simple
- Tensión
- Triaxial
- Densidad
- Contenido natural de agua
- Porosidad
- Prueba AVS e Índice DRI
-

Mediciones en sitio.

Para la realización de los ensayos presiométricos se presentó la propuesta de sitios, formaciones y profundidades donde se realizaron dichos ensayos para fines de conciliación y aprobación previa por parte de la supervisión o el proyectista. Los ensayos presiométricos se efectuaron de acuerdo con la normatividad ASTM-D4719.

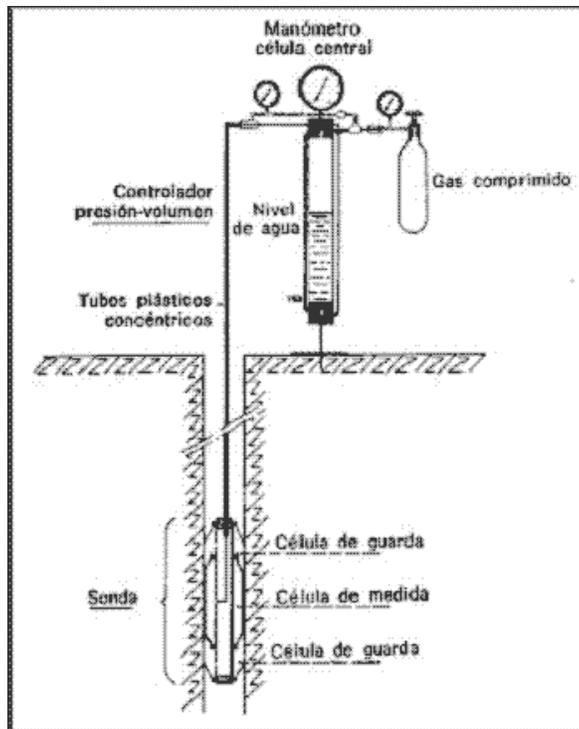


Figura 2.4 Ensayo del esquema presiométrico.

Para la verificación de los parámetros de permeabilidad en suelos y roca, se llevaron a cabo ensayos de permeabilidad in situ. Se hizo la propuesta de la ubicación en profundidad de los ensayos por realizar para la previa aprobación por parte de la supervisión o el proyectista. Los ensayos de permeabilidad tipo Lefranc y Lugeon se efectuaron de acuerdo con lo indicado en las normas ASTM D-4631 y ASTM D-4630.

Esquema del ensayo Lugeon

Ahora bien, previo a la realización de los mencionados ensayos, se solicitó a la residencia y supervisión de obra: la ubicación precisa, el protocolo de ensayo, seguimiento y uso de las conclusiones del mismo. Además del monitoreo, se realizó el muestreo de agua a fin de determinar la agresividad de líquido al concreto o la posible presencia de sustancias contaminantes por hidrocarburos. Finalmente, se efectuaron ensayos para la determinación de posibles contaminantes de aguas según la NOM-001-001-ECOL-1996.

Así pues, la cantidad de lecturas del monitoreo de niveles piezométricos, de muestras por tomar y el tipo de ensayos a realizar se efectuaron previa conciliación y autorización del departamento de supervisión o del proyectista.

Producto Final

Los resultados del estudio de Mecánica de Suelos se entregaron en un informal final conteniendo:

- ✓ Análisis de la información recopilada y descripción de las condiciones existentes del sitio.
- ✓ Localización de los sondeos en coordenadas referidas al sistema de coordenadas UTM.
- ✓ Descripción detallada de los trabajos de campo, incluyendo el número, tipo y localización de sondeos.
- ✓ Perfiles estratigráficos de cada uno de los sondeos realizados.
- ✓ Resultados de los ensayos de laboratorio.
- ✓ Resultados de las mediciones presiométricas y piezométricas.
- ✓ Reporte fotográfico

Período de Ejecución

Los trabajos de ejecución se realizaron en un período de 120 días naturales a partir del 24 de agosto hasta el 21 de diciembre del 2014.

Normatividad Aplicable

- ✓ Normas ASTM
- ✓ Normas NMX ONCEE
- ✓ Norma EHE
- ✓ Norma NTL

Trabajos relativos para construir lo inherente a la obra hidráulica

La instalación hidráulica se fundamentó en las normativas mexicanas y bajo las leyes y reglamentaciones locales relativas a la construcción de carreteras en el título de Drenajes y Subdrenajes, estructuras para manejo y desalojo del agua de la SCT, por lo que los cálculos basados en los gastos requeridos respetan dichas normas.

Para llevar a cabo la construcción del sistema de drenaje, la Residencia de Obra fijó la separación, profundidad e inclinación de los drenes, en función de las condiciones existentes en cada caso. Salvo casos especiales la inclinación mínima será uno vertical, diez horizontal y en dirección hacia la boca.

Una vez finalizada la perforación, se procedió a limpiar de residuos, eliminando cualquier obstáculo que pueda dificultar la entrada del tubo drenante. Cabe mencionar que el diámetro mínimo de la perforación fue de diez centímetros.

El tubo drenante se preparó de modo que su longitud cumpla las siguientes condiciones:

- Dejar un máximo de un metro en el fondo del taladro desprovisto de tubo.
- Dejar al menos un metro de tubo fuera de la boca del taladro para permitir la conexión con el drenaje.

El tubo está ranurado en toda su longitud, salvo el último metro situado en el interior del terreno. La zona ranurada se envolvió con geo textil de gramaje comprendido entre sesenta y cien centímetros cuadrados. Los solapes mínimos, en sentido longitudinal, serán veinte centímetros, y en sentido circunferencial, siete centímetros.

El diámetro del tubo de PVC es inferior al del taladro, entre quince y cuarenta milímetros, correspondiendo a la Residencia de Obra aprobar el diámetro del tubo a emplear.

Al colocar el tubo, éste debió ser introducido sin forzarlo, reduciendo en lo posible el roce con las paredes. En el momento donde se encontró un obstáculo, se extrajo, se procedió a volver a perforar para eliminar roces y, tras revisar el tubo y envolver en geo textil las zonas dañadas, se introdujo nuevamente.

La boca de los drenes se selló con una lechada de cemento o bentonita-cemento, hasta una profundidad de veinticinco cm como mínimo. Una vez finalizada la instalación, se comprobó su buen funcionamiento.

Para las cunetas, la excavación de las zanjas que conforman esta estructura, se efectuó de acuerdo con las secciones, niveles, alineación y acabados establecidos en el proyecto. Esta excavación se realizó conforme a lo establecido en la Norma N-CTR-CAR-1-01-005, Excavación para Canales.

Dando continuidad al sistema de drenes, se construyeron los lavaderos sobre los taludes de los terraplenes, siendo estos últimos revestidos de concreto, de acuerdo a las especificaciones

del proyecto. El trayecto que siguen los lavaderos desemboca a la última cuneta, la cual conduce los escurrimientos a una tubería de polietileno de alta densidad.

Trabajos relativos al Diseño Estructural

La contratista, durante la etapa de construcción del proyecto, fue apoyada por la supervisión de obra civil en la conciliación de cualquier ajuste al proyecto ejecutivo que se suscitó. Asimismo, requirió la elaboración de todos los documentos o presentaciones con el fin de haber obtenido las autorizaciones correspondientes para llevar a cabo la obra.

En lo que al plan de construcción se refiere, la empresa constructora consideró lo siguiente:

- Definición de los diferentes conceptos que conforman los hitos del proyecto a construir.
- Programa base con todos y cada uno de los conceptos.
- Ruta crítica.
- Presupuesto base y programa de erogaciones.
- Listas de verificación por hitos para la entrega-recepción de las obras, por tamo y estación.
- Apego estricto a lo establecido en los documentos técnicos del diseño estructural del Bi-túnel del proyecto.
- Seguimiento al procedimiento constructivo y al tipo de sección para las diferentes secciones del tramo en túnel. A partir de lo anterior, la empresa contratista definió y propuso los equipos a utilizar, así como los materiales y, por tanto, la plena aceptación del procedimiento constructivo para llevar a cabo la construcción del diseño propuesto.
- Se tomó cuidadosamente en cuenta el estudio de sismicidad del sitio, esto con el fin de seguir al pie de la letra todas las recomendaciones para la excavación y la construcción de todos los elementos estructurales de contención que están sujetos a la acción sísmica.
- Se planteó a detalle la programación, adquisición, suministro, recepción, estibado, colocación y ajustes de todos los elementos prefabricados.

Así mismo, la empresa contratista se vio en la obligación de señalar claramente los documento entregables, los cuales se proporcionaron a la DGTFM y en ellos mismos se hace mención a la construcción de los elementos estructurales de contención, así como a las estructuras de los portales que integran las diferentes secciones del Bitúnel. A su vez, dentro de estos documentos entregables, se incluyeron, detalladamente, las actividades específicas a la fabricación de las estructuras que se desarrollaron previo a la obra, durante la ejecución y al final de ésta; esto con la finalidad de que la empresa constructora se comprometiera a solucionar inmediata y adecuadamente cualquier actividad que se presentase durante el tiempo estipulado en el contrato firmado con la SCT.

Entre las actividades específicas están:

- Reportes semanales revisados, conciliados y aprobados por la supervisión de obra, civil, y electromecánica, reflejando el estatus de los conceptos que integran los hitos.
- Programa de obra con fechas; revisado, conciliado y aprobado por la supervisión de obra civil, reflejando el avance de los trabajos por hito y por tramo.
- Evidencia gráfica y fotográfica de la secuencia de avance de la obra, revisada, conciliada y aprobada por la supervisión de la obra, destacando el proceso de suministro, recepción, estibado y colocación de todos los elementos prefabricados.
- Evidencia gráfica y fotográfica de la secuencia de avance de la obra, revisada, conciliada y aprobada por la supervisión de la obra, destacando el proceso de construcción en sitio de todos los elementos indicados en el Proyecto Ejecutivo.
- Conjuntamente con las supervisiones, la contratista destacará semanalmente todas las prioridades y programas de trabajo individuales de las estructuras de los tramos y estaciones.
- Control de cambios y ajustes en los avances y desviaciones en todas las estructuras.
- Reporte de control de notas de bitácora, señalando los avances reales y programados, así como de las desviaciones y propuestas para recuperar el tiempo y/o corregir errores.
- Elaboración de los planos as built de los elementos estructurales y secciones del mismo bitúnel; se desarrollaron los cálculos y planos necesarios para justificar los ajustes y modificaciones, mismos que fueron revisados y avalados por la supervisión de obra y especialistas correspondientes, antes de ser presentado a la DGTFM para su aprobación e incorporación a la bitácora.

Siguiendo con el tema de las actividades de obra, la empresa contratista estableció desde un inicio la estrategia de control para dar seguimiento a la correcta interpretación de los documentos para de esto tener una eficiente ejecución de los trabajos relacionados a la construcción de las estructuras de los tramos del túnel; dicha estrategia fue revisada, conciliada y aprobada por la supervisión de obra. Para lograr la correcta ejecución, la constructora:

- Revisó todos los documentos que conformaron el Proyecto Ejecutivo estructural, mismo que fue realizado por el proyectista.
- Verificó que la información recibida en el proyecto estructural fuese vigente en cuanto a normas y que, sobre todo, correspondiera a lo elaborado por los diferentes proyectistas como parte de un proyecto ejecutivo.
- Elaboró, en base a los avances y ajustes, los denominados planos “as built”.
- Realizó una revisión semanal del avance realizado, conciliado y aprobado por la supervisión de obra.
- Comparó los avances reales contra el programa base.
- Propuso a la coordinación de obra los diferentes cambios que consideren pertinentes para la correcta ejecución de las actividades que integran los hitos de obra.
- Registró en bitácora todos los eventos, incluyendo todos aquellos que estén fuera del plan de desarrollo de la obra.
- Monitoreó mensualmente el ejercicio presupuestal para identificar si los costos del proyecto estuvieran dentro de lo considerado en la propuesta económica inicial.
- Midió integralmente el desempeño de la obra, tanto e tiempo como en costo.
- Realizó un informe conciliado y aprobado por la supervisión de obra del estado de las erogaciones (señalando lo contratado y por contratar).

Aunado a lo anterior ya mencionado, el departamento técnico de la constructora propuso un procedimiento constructivo para la fabricación y montaje de los prefabricados, el cual constituye la planeación a detalle donde se estandariza y controla las actividades de producción, considerando los requerimientos técnicos y controles aplicables para mantener la trazabilidad de los insumos de dicha fabricación.

La metodología para las dovelas consistió en lo siguiente:

1. Preliminares; inspección al recibir los materiales.

2. Preparación del molde; geometría, limpieza, revisión de soldadura y desmoldante (el ciclo total de un molde ronda las ocho horas, de las cuales permanece alrededor de 6 en la cámara de curado de vapor).
3. Habilitado y armado del acero de refuerzo; anillos, grapas, ganchos, izajes, soldadura, conectores, roscado y cuerdas en varillas.
4. Colado de concreto; descuerdo a resistencias de proyecto, únicamente dovelas fibra metálica y polipropileno.
5. Curado a vapor; alcanzando temperaturas de 60 a 70 grados Celsius.
6. Descimbrado y extracción; descimbrado.
7. Izaje y almacenamiento.
8. Detallado: resane o reparación de alguna oquedad.
9. Liberación y carga del vehículo.
10. Permisos y licencias para el transporte del elemento.
11. Transporte del elemento.
12. Preparación de grúas para el traslado de las piezas al túnel.
13. Montaje de la pieza; transporte de dovelas en tren de colocación de la tuneladora conforme a logística.
14. Elaboración de mezcla de inyección; únicamente dovelas y colocación de mezcla de inyección.
15. Topografía; revisión y alineamiento de la pieza.

Por otra parte, la metodología para los prefabricados se enlista a continuación:

1. Preliminares; inspección al recibir los materiales.
2. Preparación del molde; geometría, limpieza, revisión de soldadura, desmoldante.
3. Habilitado y armado del acero de refuerzo; anillo, grapas, ganchos, izajes, soldadura, conectores, roscado y cuerdas en varillas.
4. Colocación de armado en el molde, dejando recubrimiento.
5. Colado de concreto; desacuerdo a resistencia de proyecto.
6. Curado a vapor; alcanzando temperaturas de 60 a 70 grados Celsius.
7. Transferencia de presfuerzo; únicamente vigas.
8. Desmolde y extracción; destroquelamiento, descimbrado.
9. Transporte y estiba; equipos modulares.
10. Detallado; resane, reparación de alguna oquedad.
11. Liberación y carga del vehículo.

12. Permisos y licencias para el transporte del elemento.
13. Transporte del elemento.
14. Preparación de grúas para el montaje de las piezas.
15. Seguimiento de la cinemateca de montaje.
16. Montaje de la pieza.
17. Topografía; revisión y alineamiento de la pieza.

Trabajos relativos a la construcción y adecuación de vialidades aledañas y vialidades coincidentes (provisionales y de servicio).

Antes de dar inicio a la obra, se realizó un análisis de Ingeniería de Tránsito previo a la implementación de los dispositivos para cada etapa del proyecto; resultado de esto, se colocaron señales claras y precisas, con el fin de delimitar el sitio de la obra y los lugares con mayores riesgos. Estas señales fueron de carácter indicativo, preventivo, restrictivo y prohibitivo, conteniendo información de localización de oficinas, servicios, riesgo potencial en zonas restringidas y preventivas en zonas de riesgos de trabajo.

En cada etapa se realizó un estudio de planeación del lugar y de la periferia del área de trabajo, y así se procedió a tomar la decisión sobre qué tipo de señalamiento utilizar en cada lugar.

El área de construcción fue la encargada de reunir la información y hacer el planteamiento de los desvíos, bandeos y cierres, además del control de vehículos y personas que pueden ser afectadas por las actividades de construcción del túnel. Esta misma área fue la encargada de realizar la gestión ante las autoridades competentes, así como de restituir las vialidades y color el señalamiento requerido.

Para lograr lo anterior, la empresa contratista se apegó en todo momento a las normas y reglamentos vigentes, los cuales se enuncian enseguida:

- Manual de Difusión de Obras de la SCT
- Reglamento de Construcciones de la Ciudad de Guadalajara
- Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes
- Manual de Señalamiento Turístico y Servicios de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes
- Manual de Dispositivos para el Control de Tránsito en Calles y Carreteras.

Durante la fase de construcción de la obra, se establecieron las acciones a realizarse para la adecuación de las vialidades coincidentes y se logró la gestión de los recursos necesarios para el arranque ordenado de los dispositivos de control del tránsito, garantizando la seguridad y operación efectiva del flujo vehicular y peatonal logrando hacer de la vialidad un elemento funcional.

Dados los casos necesarios y para su correcto funcionamiento, para asegurar el cumplimiento de los requisitos antes mencionados, se procedió de la siguiente manera:

- Realización de los estudios de ingeniería de tránsito con:
 - Levantamiento de datos en campo, para la elaboración del proyecto ejecutivo de vialidades.
 - Anteproyecto con el esquema general de los dispositivos y acciones de control para su revisión
- Proyecto Ejecutivo con:
 - Proyecto de señalamiento vertical y horizontal.
 - Proyecto de vías alternas para:
 - Transporte Público.
 - Transporte Ligero.
 - Transporte de carga.
 - Proyecto de confinamiento.
 - Proyecto de estacionamiento temporal.
 - Proyecto de ubicación de personal en campo para manejo de vehículos y personas.
 - Logística de traslado y montaje de elementos prefabricados.

En excavaciones con profundidad mayor a 2 metros, se colocó protección perimetral a 70 cm de altura, consistente en barreras de plástico para evitar caídas.



Figura 2.5 Esquema para la colocación de trafitambos.



Figura 2.6 Esquema para la colocación de mallaflex.

En obras exteriores, áreas de circulación y/o pasos peatonales o viales, se colocaron señales de inducción, y para el turno nocturno, se usaron señales luminosas, cuidando que las áreas de obra y pasos peatonales se mantuvieran con iluminación permanente.

Señalamiento.

En relación a este tipo de medida de seguridad, se aseguró la combinación de las características de los dispositivos: tamaño, color, forma y composición; de igual manera se puso énfasis en que el diseño que se combinen forma, tamaño, color y simplicidad del mensaje para que el significado que se intente transmitir sea comprensible.

Para que los dispositivos de control de tránsito surtieran efecto, se tomaron en cuenta los siguientes requisitos básicos:

1. Proporcionar seguridad en los cruces.
2. Llamar la atención del usuario para su propia protección.
3. Transmitir un mensaje sencillo y claro.
4. Estar ubicados de tal modo que permitan al usuario recibir el mensaje.
5. Estar localizado de manera que el usuario cuente con el tiempo suficiente para tener una reacción efectiva y oportuna.
6. Organización y canalización de movimientos vehiculares en cada intersección.

Señales.

Son aplicables en todo el ancho de la vialidad, no obstante su aplicación podrá limitarse a uno o más carriles. Las señales pueden ser placas con elementos gráficos en forma individual, colocadas en postes separados o en montajes; su localización se planeó con el fin de optimizar la visibilidad nocturna y, dependiendo de su ubicación, se pueden clasificar en señales bajas y señales elevadas.

Para las señales elevadas, los factores que justifican la instalación sobre los carriles son:

- Si las distancias de visibilidad son restringidas
- En espaciamientos de pasos a desniveles más cortos.
- En salida con rampas.
- Si circula un elevado porcentaje de camiones.
- Si se circula a velocidades mayores a 60 km/h
- Por causa del alumbrado público en el área
- Para dar consistencias en la ubicación de las señales con mensajes.
- Si el espacio es insuficiente para instalar señales fuera de acotamientos laterales.
- En las rampas de salidas de vías rápidas.

Restauración de las vialidades aledañas y vialidades coincidentes.

Terminados los trabajos de construcción y liberación del área de vialidad afectada, se realizó la remodelación, acondicionamiento y construcción de las vialidades aledañas y coincidentes a la obra y requeridas en el proyecto.

Para dicha remodelación y construcción de vialidades, se tomaron en cuenta las normas y el reglamento correspondiente de la entidad en donde se ubica el proyecto. Dicha remodelación y adecuación de las vialidades, están enfocados arquitectónicamente a una infraestructura vial acorde a los planes de desarrollo urbano la entidad federativa donde se llevó a cabo el proyecto.

Normatividad

En lo relativo al Sistema de Gestión Ambiental

Las actividades de prevención y control en materia de medio ambiente se realizaron a través de un sistema de Gestión Ambiental basado en la Norma ISO 14001:2004-Sistemas de Gestión Ambiental. Dichas actividades tuvieron como objeto prevenir, dar solución y seguimiento a los

impactos ambientales particulares generados por los trabajos ejecutados, y estuvieron basadas en la legislación ambiental vigente, así como en las especificaciones ambientales aplicables al contrato.

Se presentan las normas, leyes y reglamentos aplicables en materia ambiental para este proyecto:

- Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al ambiente (LGEEPA).
 - **Materia:** Lineamientos generales para impacto ambiental y control de la contaminación del aire, suelo, agua y protección de la flora y fauna silvestre.
- Reglamentos de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al ambiente.
 - **Materia:** regulan los lineamientos de la LGEEPA, particularmente en materia de contaminación atmosférica, impacto ambiental y ruido.
- Ley General para el Desarrollo Forestal Sustentable y su Reglamento.
 - **Materia:** tiene por objeto regular y fomentar la conservación, protección, restauración, producción, ordenación, cultivo, manejo y aprovechamiento de los ecosistemas forestales. Aplica en lo referente a las actividades de cambio de usos de suelo y restauración.
- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos y su reglamento.
 - **Materia:** establece lineamientos de protección ambiental en materia de gestión integral de residuos.
- Código para la biodiversidad del Estado de México.
 - **Materia:** el presente Código es de observancia general en el Estado de México; sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto regular las materias siguientes:
 - I. **Equilibrio Ecológico, la Protección al Ambiente y el Fomento al Desarrollo Sostenible.**
 - II. **Fomento para el Desarrollo Forestal Sostenible.**
 - III. **Prevención y Gestión Integral de Residuos.**
 - IV. **Preservación, Fomento y Aprovechamiento Sostenible de la Vida Silvestre.**
 - V. **Protección y Bienestar Animal.**

- Reglamento del Libro Segundo del Código para la Biodiversidad del Estado de México.
 - **Materia:** este ordenamiento tiene por objeto reglamentar las disposiciones del Libro Segundo del Código para la Biodiversidad del Estado de México, relativo a la conservación ecológica y protección al ambiente para el desarrollo sustentable: regulación de instrumentos de política ambiental – ordenamiento ecológico, impacto ambiental, información ambiental, ANP, Manejo de Flora y Fauna silvestres, preservación y aprovechamiento del agua, suelo y prevención de la contaminación. Aplicable de acuerdo a la competencia estatal.
- Ley ambiental del Distrito Federal.
 - **Materia:** especificaciones para impacto ambiental de obras bajo su jurisdicción, manejo de residuos no peligrosos, protección de aire, suelo y agua, zonas naturales.
- Ley de Residuos de Distrito Federal.
 - **Materia:** tiene objeto regular la gestión integral de los residuos sólidos considerados como no peligrosos, así como la prestación del servicio público de limpia.
- Manifestación de Impacto Ambiental y Resolutivo en materia de impacto ambiental. **Oficio No. SGPA/DGIRA/DG/03773** de fecha 25 de abril del 2014.
 - **Materia:** descripción general del proyecto y medidas de mitigación propuestas. Términos y condiciones en materia de impacto ambiental, establecidas por la autoridad y que sean aplicables al contrato.
- Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos.
 - **Materia:**
 - Registro como generador de residuos peligrosos.
 - Almacenamiento y bitácora.
 - Requisitos para recolección, transporte, reciclaje, tratamiento o confinamiento de residuos peligrosos.
 - Reportes a SEMARNAT.
- NOM-052-SEMARNAT-2005
 - **Materia:** establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligros por su toxicidad al ambiente.

- NOM-054-SEMARNAT-1993
 - **Materia:** que establece el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos por la Norma Oficial Mexicana.
- NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002
 - **Materia:** protección ambiental – Salud ambiental – Residuos peligrosos biológico-infecciosos- Clasificación y especificaciones de manejo.
- NOM-059-SEMARNAT-2010
 - **Materia:** protección ambiental – Especies nativas de México de flora y fauna silvestres – Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio – Lista de especies en riesgo.
- NOM-081-SEMARNAT-1994
 - **Materia:** que establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de las fuentes fijas y su método de medición.
- Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente para la prevención y control de la contaminación generada por los vehículos automotores que circulan por el Distrito Federal y los municipios de su zona conurbada.
 - **Materia:** tiene por objeto reglamentar la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en lo referente a la regulación del sistema de verificación obligatoria de emisiones de gases, humos y partículas contaminantes de los vehículos automotores que circulen en el territorio del Distrito Federal y los municipios de su zona conurbada; y el control de la circulación.
- NOM-041-SEMARNAT-2006
 - **Materia:** que establece los límites máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina como combustible.
- NOM-085-SEMARNAT-2011
 - **Materia:** contaminación atmosférica – Fuentes fijas – Requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos que funcionan por combustión.

- NOM-045-SEMARNAT-2006
 - **Materia:** que establece los niveles máximos permisibles de opacidad del humo, provenientes del escape de vehículos automotores en circulación que usan diesel como combustible.
- NOM-127-SSA1-1994
 - **Materia:** salud ambiental – Agua para uso y consumo humano – Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
- NOM-001-SEMARNAT-1996
 - **Materia:** que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas nacionales.
- NADF-007-RNAT-2004
 - **Materia:** norma ambiental para el Distrito Federal NADF-007-RNAT-2004, que establece la clasificación y especificaciones de manejo para residuos de la construcción en el Distrito Federal.
- NTEA-011-SMA-RS-2008
 - **Materia:** Norma Técnica Estatal Ambiental que establece los requisitos para el manejo de los residuos de la construcción para el Estado de México.
- NTEA-013-SMA-RS-2011
 - **Materia:** Norma Técnica Estatal Ambiental NTEA-013-SMA-RS-2011, que establece las especificaciones para la separación en la fuente de origen, almacenamiento separado y entrega separada al servicio de recolección de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, para el Estado de México.
- NADF-001-RNAT-2006
 - **Materia:** que establece los requisitos y especificaciones técnicas que cumplirán las autoridades, empresas privadas y particulares que realicen poda, retiro y restitución de árboles de El Distrito Federal.
- NADF-006-RNAT-2004
 - **Materia:** los requisitos, criterios, lineamientos y especificaciones técnicas que deben cumplir las autoridades, personas físicas o morales que realicen actividades de fomento, mejoramiento y mantenimiento de áreas verdes públicas.

- NTEA-015-SMA-DS-2012
 - **Materia:** norma técnica estatal ambiental que establece las condiciones de protección, conservación, fomento y creación de las áreas arboladas y verdes de las zonas urbanas en el territorio del Estado de México.

En lo relativo a la construcción de Obras Hidráulicas

Para ejecutar las obras necesarias en cuanto a la infraestructura hidráulica, la empresa contratista debió alinearse con la siguiente normativa:

- N-CTR-CAR-1-03-003/00: Drenajes y Subdrenajes, Cunetas.
- N-CTR-CAR-1-03-004/00: Drenajes y Subdrenajes, Contracunetas.
- N-CTR-CAR-1-03-006/00: Drenajes y Subdrenajes, Lavaderos.
- N-CTR-CAR-1-03-012/00: Drenajes y Subdrenajes, Drenes de Penetración Transversal.
- N-CTR-CAR-1-03-014/09: Drenajes y Subdrenajes, Alcantarillas de tubo corrugado de polietileno de alta densidad.
- N-CMT-3-06/10: Materiales para obras de drenaje y subdrenaje, Tubos corrugados de polietileno de alta densidad.

En lo relativo al Diseño Estructural

La empresa contratista revisó todos los documentos que conforman el Proyecto Ejecutivo de Diseño Estructural, mismo que fue elaborado en base a normas, especificaciones y reglamentos de construcción del Estado de México y Distrito Federal, así como sus normas técnicas complementarias:

- Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias.
- Manual de Diseño de Obras Civiles-Diseño por Sismo.
- Manual del Instituto Mexicano de la Construcción de Acero
- Manual del American Institute of Steel Construction
- Normas de la American Welding Society
- Manual del Prestressed Concrete Institute
- Normas del American Concrete Institute

II.4 Material Rodante

En 2014, la Secretaria de Comunicaciones y Transporte de México (SCT) adjudicó al consorcio encabezado por CAF –en el que participan Isolux, Corsar, Azvi y Thales– el suministro de 30 trenes de cercanías para la línea entre las ciudades de México D.F. y Toluca por un monto de 13 mil 570 millones de pesos.



Figura 2.6 Logo de la empresa que encabezó el consorcio que suministró el material rodante.

Estas unidades eléctricas están compuestas por 5 coches y cuentan con pasillos de intercomunicación que permiten una mejor distribución de los pasajeros. Su interior es diáfano y puede transportar hasta 700 pasajeros aproximadamente. El diseño del tren garantiza también la plena accesibilidad de las personas con movilidad reducida al disponer de rampas manuales para facilitar el acceso y de espacio reservado para dos sillas de ruedas en el coche central.

El primero de mayo de 2018 la empresa española CAF (Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles) informó que concluyó con el suministro de los 30 trenes, cada uno con capacidad para 700 personas sentadas.

Los trenes fueron desembarcados en Veracruz y enviados a la planta de ensamblaje de Huehuetoca, estado de México, donde se afinaron detalles para después enviarlos a los talleres ubicados a unos metros de la terminal Zinacantepec, en el valle de Toluca.

Cabe mencionar que ya el año 2017 la empresa CAF envió los primeros trenes a Toluca para que se realizaran pruebas de operación.

Por otra parte, el alcance del proyecto incluye también parte de la señalización del sistema, las instalaciones electromecánicas y la ingeniería de integración de todo el proyecto. Para ello,

participan las empresas CAF Signalling, CMFS y CAF TransportEngineering respectivamente, todas pertenecientes al Grupo CAF.

El material rodante o móvil entonces lo constituyen:

- a) 30 unidades de 5 coches
- b) Composición Mc-M-M-M-Mc
- c) Longitud de 98.978 m
- d) Número de plazas: 711
- e) Velocidad de diseño de 200 Km/h y velocidad máxima de 160 Km/h
- f) Equipamiento:
 - Climatización para pasajeros
 - Central de registro de eventos
 - Equipo de Videovigilancia (CCTV)
 - Cámara frontal y cámaras retrovisoras
 - Sistema de Información al Viajero, displays interiores e indicador de destino frontal
 - Espacio disponible para dos sillas de ruedas
 - Comunicación con tierra mediante red inalámbrica de banda ancha
 - Radio GSM-R
 - ERTMS Nivel 2
 - Sistema de detección de incendios



Figura 2.7 Imagen lateral de una unidad del material rodante.



Figura 2.7 Vista del interior del material rodante.

III.PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DEL BITÚNEL

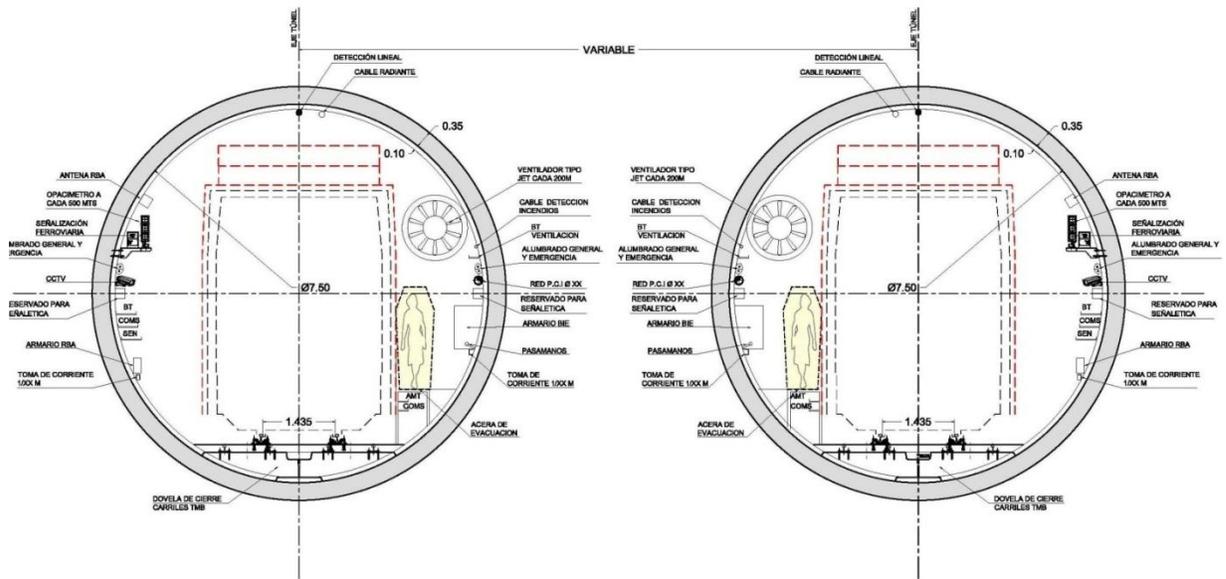
III. 1 Preliminares

Antes de haber transportado las partes pesadas que conforman la TBM a través de las calles citadinas, fue necesario realizar un estudio completo y un chequeo directo sobre la ruta de transportación, analizando la capacidad de acomodo de esas mismas partes que conformarían la tuneladora. Las actividades de montaje requirieron, también, un espacio grande, el cual no siempre existirá dentro del contexto urbano, por ende, en ocasiones, será necesario el uso de áreas distantes para operaciones de pre-montaje, pero en este proyecto no fue necesario, ya que se contó con un espacio óptimo para el ensamblado. Planear tanto las fases como los espacios es de suma importancia para lograr una organización correcta de trabajo, así como para la seguridad de los trabajadores. La existencia de un espacio grande donde montar no necesariamente significa que habrá menores riesgos; por lo regular, los espacios pequeños a tener un plan más riguroso y un diseño mucho más organizado, logrando así respetar la regla *“la organización es seguridad”*.

Las operaciones para el montaje de los componentes metálicos de gran peso, la descarga por ejes y el manejo de la superficie representaron un riesgo para los trabajadores que estuvieron relacionados a estas actividades. Los planes de montaje requirieron de un pulcro conocimiento de cada una de las partes de la máquina, así como las instrucciones para su correcto armado. En relación al diseño del montaje, éste incluyó una eficiente selección de equipo y herramientas necesarios para cubrir todos los espacios de trabajo dentro de la máquina. La forma de la máquina tuneladora TBM impidió que existieran accesos en niveles superiores, donde las partes curvadas y el interior del escudo son los lugares donde más se complica la instalación de este tipo de accesos, ya que se corría el gran riesgo de una posible caída de alguna pieza metálica. Por lo tanto fue importante suministrar: pequeños elevadores para acceder a los vagones de apoyo; andamios para alcanzar los puntos a los cuales el elevador no puede entrar; barandales para la protección del transeúnte a lo largo de la plancha; así como cabestrillos y cables con el fin de para prevenir caídas.

Para levantar cargas pesadas, los puntos de enganche fueron sumamente planeados y se checó la estabilidad de la grúa. Se precisó que el personal encargado de esta operación, trabajase en áreas con estricta protección. El operador de la grúa fue proveído con los procedimientos y los instrumentos de monitoreo, ya que, una vez que el asta de la grúa llegó a

su máximo alcance, éste no pudo tener rango de visión para saber lo que estaba ocurriendo en las alturas.



SECCION BITUBO EN TANGENTE

Figura 3.1 Geometría del Bitúnel.



Figura 3.2 Imagen de la tuneladora que se usó en el proyecto.

III .1.1 Ensamble de la Tuneladora

El suministro ensamble y puesta en marcha de la TBM se realizó de la siguiente manera: Primero se conformó una plataforma de trabajo en el área de instalaciones superficiales, posteriormente se inició el ensamble del escudo en superficie a pie de portal conforme a las especificaciones del fabricante y del proyecto ejecutivo, mismas que garantizaron la funcionalidad del escudo para la excavación del túnel.

Para que el escudo iniciara con el proceso de excavación se necesitó también la instalación en la superficie, de recursos básicos para su correcto funcionamiento, tales como: área de recepción del material excavado, sistema de carga del material excavado, las líneas de suministros y comunicación al túnel (aire, agua, etc.), almacén y suministro de anillos de dovelas (parte que se vio o verá en el subtema correspondiente), planta de fabricación de lechada, acometida de energía, subestación, laboratorios, oficinas, etc.



Figura 3.3 Proceso de construcción de la cuna para el armado del escudo.



Figura 3.4 Ensamble de la rueda de corte.



Figura 3.5 Montaje de la rueda de corte.



Figura 3.6 Montaje de la tuneladora



Figura 3.7 Montaje de la rueda de corte.



Figura 3.8 Ensamble de una de las dos tuneladoras.

III. 2 Proceso de Excavación

III.2.1 Colocación de anillos de atraque

Ensamblado el escudo y accionados todos los sistemas del equipo se empezaron los trabajos de excavación del túnel procediendo con la colocación de los primeros anillos de atraque. Se inició con la colocación de dovelas del primer anillo, pieza por pieza y se introdujeron por el espacio que había quedado entre el faldón del escudo y el muro de atraque que previamente se construyó.

La primer dovela se arrastró con “tirfors” y/o diferenciales de cadena, hasta donde el brazo erector del escudo pudo tener acceso a ella. El brazo erecto levantó la dovela, mediante un perno mecánico para transportarla a su posición de armado. Una vez que fue colocada, se retiró el brazo erector moviéndose de tal manera para tomar y colocar la siguiente, sujetando la primera dovela mediante pasadores que se sujetaron a los casquillos instalados en la propia dovela.

Este mismo procedimiento se realizó para la colocación del resto de las dovelas, hasta configurar el primer anillo circular, el cual se rigidizó contraventeando con tubo de 4” de diámetro para evitar que perdiera su configuración circular.

Una vez colocado debidamente el anillo de atraque y en contacto tanto los gatos del escudo como del muro de atraque, se demolió el mortero colocado en el portal de salida y todo lo necesario para permitir que el sello cumpliera su función al inicio de la presurización de la cámara del escudo.

Se procedió entonces a empujar el anillo, accionando los gatos hidráulicos del escudo, hasta que se tuviera un espacio mínimo de 1.50 m para iniciar la colocación del segundo anillo de atraque que se colocó de forma similar al primero.

Se continuaron colocando los anillos de atraque restantes en función de la longitud necesaria indicada por la Dirección de la obra, y, a partir del tercer anillo consistieron únicamente de cuatro dovelas quedando el espacio superior como acceso de materiales, personal y equipo menor, y denominándose a este tipo de anillos como anillos “tipo alcancía”.

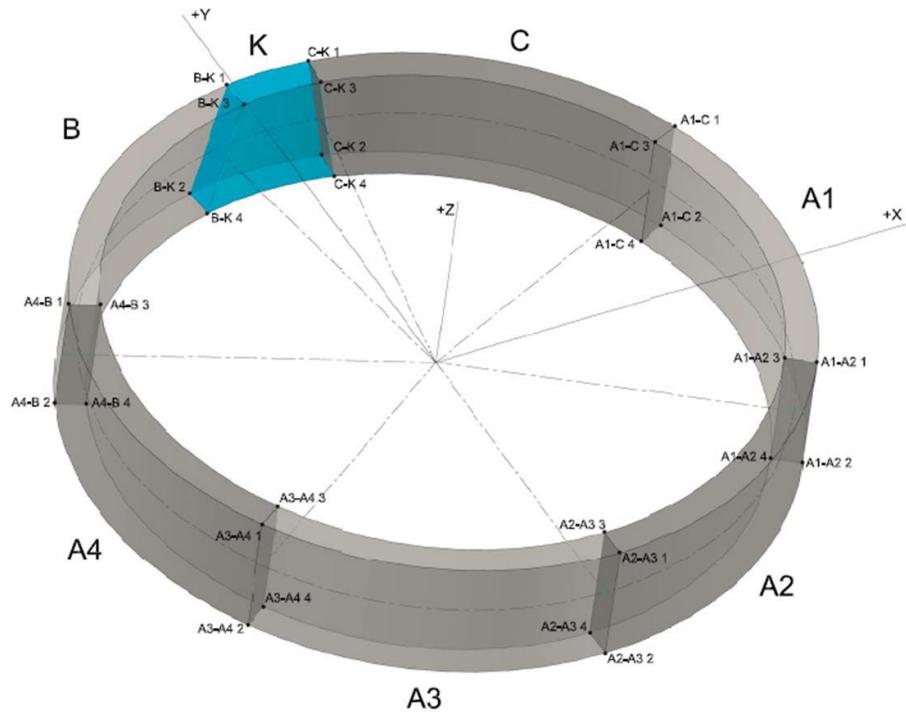


Figura 3.9 Componentes del anillo de concreto del revestimiento primario.

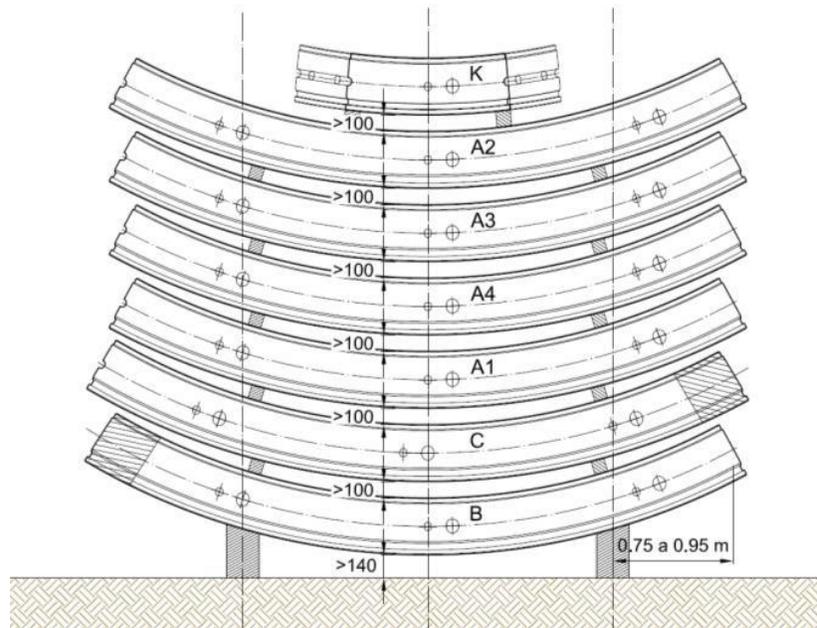


Figura 3.10 Comparación de las dovelas y anillo de ajuste del revestimiento primario.

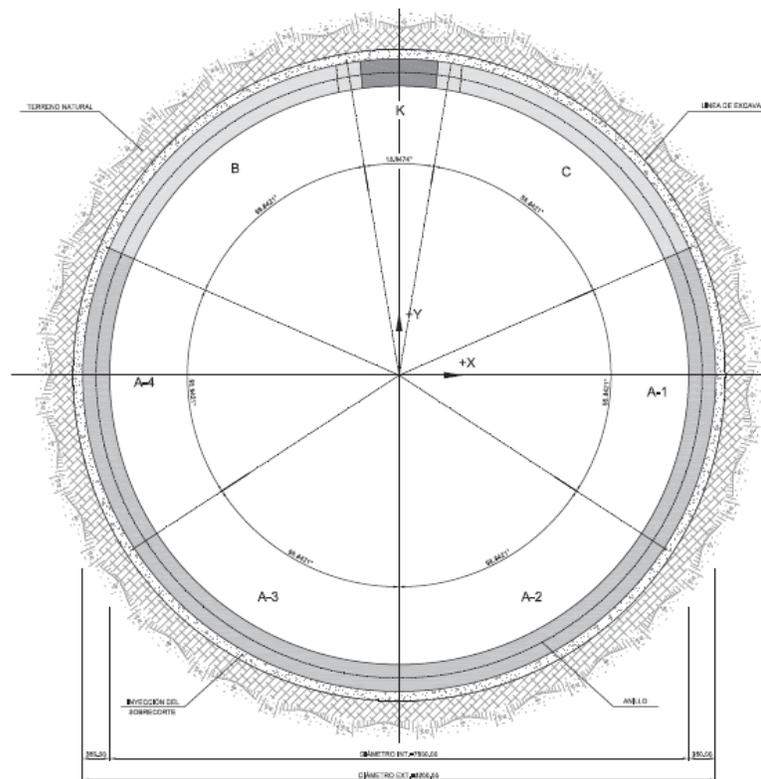


Figura 3.11 Dovelas en arreglo 6+1.

III.2.2 Excavación de los primeros metros

Cuando el escudo tuvo contacto con los anillos de atracción y con la estructura de reacción, se verificó que el sello de salida instalado en el portal cubriera uniformemente la camisa del escudo y se inició con la excavación de los primeros metros del túnel.

A medida que se colocaban los anillos se determinó la conveniencia de ampliar la alcancía de los anillos de atracción, en función de los anillos que se liberaban del faldón del escudo (esto se lograba retirando las dovelas superiores y la cuña).

Una vez obtenida el área necesaria para el ingreso de personal, suministro y equipo menor, se troquelaban completamente los anillos de atracción que se alojaban en el faldón del escudo contra el muro de atracción en su parte superior, mediante dos tubos de 8" de diámetro, así se evitaban problemas de elevación del escudo por falta de apoyo de los gatos en la zona de la clave y se podía tener un control en el nivel del escudo apoyando los gatos superiores.

Cuando se tuvo al fin al escudo en contacto con el terreno, se procedió a cortar el mismo accionando los motores de transmisión y el cortador en baja revolución para comenzar con el

empuje y excavación. Se accionaron los gatos de empuje del escudo en baja velocidad verificando que la presión del cortador no excediese a la del propio material cortado.

El material excavado se expulsaba del frente mediante una banda de rezaga, clásica en este tipo de escudos.

La carrera de los gatos se verificó revisando continuamente la separación entre las dovelas y el faldón del escudo (estrados) en cuatro partes opuestas como mínimo, para corroborar el correcto desplazamiento del escudo. Al tener en la carrera un desplazamiento mínimo de 1.50 metros, se procedía a su paro, lo cual significaba que el empuje había concluido, iniciando la colocación del anillo de dovelas siguiente.

Al término de cada empuje se verificaba topográficamente la línea, el nivel real del escudo y se comparaba con el teórico, lo cual daba la pauta para seguir la programación de los gatos para el siguiente empuje y así corregir la línea y nivel del escudo.

Para la colocación de los anillos subsecuentes se realizaban las siguientes actividades:

1. Retracción de los gatos del escudo ubicados en la posición donde se colocó la primera dovela.
2. Sujeción de la dovela por el brazo erector, colocando previamente el empaque perimetral (sello hydrotite o neopreno), además se verificaba que tuviera los pasadores necesarios para colocarla, y proseguir con la colocación de la dovela en su sitio correspondiente, fijando los pasadores a los casquillos.
3. Apoyo de uno o dos gatos en la dovela para el retiro del brazo erectores, trasladándolo para posesionarse en la siguiente dovela por colocar.
4. Retracción de los gatos necesarios para alojar la segunda dovela.
5. Se hacían coincidir los orificios del pasador con el de los casquillos de la dovela, colocando los pasadores correspondientes.
6. Nuevamente se apoyaban uno o dos gatos de acuerdo a la posición de la dovela, retirando el brazo erector para desplazarse hacia la siguiente dovela.
7. Se repetía la misma secuencia descrita hasta colocar las seis dovelas y finalmente la cuña en la clave del escudo, dovela tipo “K” para cerrar el anillo de dovelas. Posterior al cierre se instalaba la dovela base para vías.
8. Estas actividades en la colocación de anillos eran repetitivas durante todo el proceso de excavación del túnel, procurando que las dovelas se traslaparan en la posición de

la cuña para que no se formaran líneas de falla longitudinales por la posición repetitiva de los anillos.

Una vez colocado el anillo, se tenían las condiciones para realizar el siguiente empuje o avance, que comenzaba con el arranque del cortador y el empuje de los gatos programados.

Al cortarse el terreno, el material desprendido se introducía en la cámara frontal del escudo, para posteriormente fuera rezagado. Dependiendo las condiciones del material excavado y de los desgastes en las herramientas de corte, se utilizaban aditivos para mitigar los desgastes y mejorar su manejabilidad.

Al salir de la cámara, el material llegaba a un sistema de bandas que lo trasladaban por el túnel hasta el portal correspondiente.

Paralelo a la excavación y colocación de anillos, se colocaban las vías de acuerdo con lo indicado en el proyecto ejecutivo, por las que circulaban los carros que alimentaban dovelas, equipo y demás materiales, al frente, durante los primeros metros de excavación.

La inyección de lechada anular se realizaba simultáneamente a la excavación a lo largo de todo el túnel, en los anillos que iban saliendo del faldón del escudo, con un sistema integral de tuberías de inyección colocadas en el faldón del escudo y/o por el cono interno de la dovela.

III.2.3 Excavación de los metros subsecuentes

Una vez detectado el cortador del escudo desde el lado del portal de salida y liberado éste, se procedió a la colocación de la cuna metálica así como su nivelación para la recepción del equipo en el portal de salida.

Teniendo el escudo en el portal de salida se revisaban las condiciones del escudo, y posteriormente se procedía a su desensamble y retiro del portal para proceder a la terminación de los trabajos.

Con esta misma secuencia se excavaron ambos tramos de túnel para los escudos duales de 8.50 m.

III. 3 Proceso de Fabricación de las Dovelas

Las dovelas se construyeron en una planta de dovelas automatizada tipo carrusel; ésta contó con un conjunto mecánico de moldes los cuales se desplazaban sobre rieles de manera cíclica permitiendo la rotación de los moldes de prefabricación entre una línea de trabajo y tres líneas paralelas de curado a vapor.

Esto permitió una producción continua de dovelas, por lo cual se disponían de carros mecánicos a la entrada y salida del túnel de curado a vapor y una línea de salida hacia los patios de pre-almacenamiento. El conjunto funcionaba eléctricamente, según un ciclo automático de operaciones.

El ciclo total de un molde era de aproximadamente 8 horas, de las cuales permanecía aproximadamente 6 horas en la cámara de curado a vapor. Dentro de la línea de trabajo se destacaban estaciones con actividades diferentes en cada una de ellas, en donde a través de cadenas y trinquetes, los moldes se movían automáticamente y pasaban por cada una de las etapas del proceso.

Tabla 5 Proceso de fabricación de Dovelas

No.	OPERACIÓN	NATURALEZA DE LOS TRABAJOS	HERRAMIENTAS
1	Apertura de Molde	Retirar las inserciones. Apertura de molde.	Llave de impacto neumática para 20 ml/Kg
2	Desencofrado	Desencofrado de la dovela de concreto hacia la línea de acabado	
3	Limpieza del Molde	Limpieza de: Fondo del molde Inserciones Caras perimetrales Junta perimetral Cierre del molde	Pistola de aire comprimido Cepillo metálico Fanelas Aceite especial para limpieza Llave de impacto neumática para 20ml/Kg
4	Armadura	Después del control de molde y armadura Colocación de armadura Colocación de la inserciones	Llave de trinquete para apretar inserciones

5	Control antes del colado	Colocación de las tapas de los moldes Verificación visual de los cuatro ángulos y en el centro	Conexión rápida del vibrador en la cabina del cuarto de colado. Pupitre de mando del carrusel
6	Colado	Conectar el aire comprimido en el molde Colado de la dovela por el centro del molde Vaciado de concreto lenta y regularmente para verterlo correctamente en el molde Duración de colado de concreto entre 5 y 7 minutos como máximo No dejar caer concreto sobre las tapas del molde No poner demasiado concreto para facilitar el alisado y la limpieza Respetar los tiempos de vibración Calidad de la dovela Desconectar el aire comprimido en el molde.	
7	Alisado de dovelas	Acabado alisado	Regla de alisado Paleta de alisado Tolva de recuperación del exceso de concreto Agua para alisado Franela o esponja

8	Pre limpieza del molde	Antes del ciclo de termo maduración, limpiar bien el molde para que no tenga concreto endurecido durante el desencofrado o limpieza. Este puesto es importante para la calidad final del producto, la durabilidad de los moldes, la productividad y los tiempos de operación de los puestos de trabajo(desencofrado, limpieza y control de los moldes)	Pistola de aire comprimido
9	Inversión	LÍNEA DE ACABADO Llegada de la dovela de concreto de la línea de fabricación. Inversión de la dovela de concreto	
10	Colocación de la junta	Aplicación del pegamento Colocación de la junta	
11	Control	Control final visual	
12	Almacenamiento	Retiro de la dovela para su almacenamiento.	

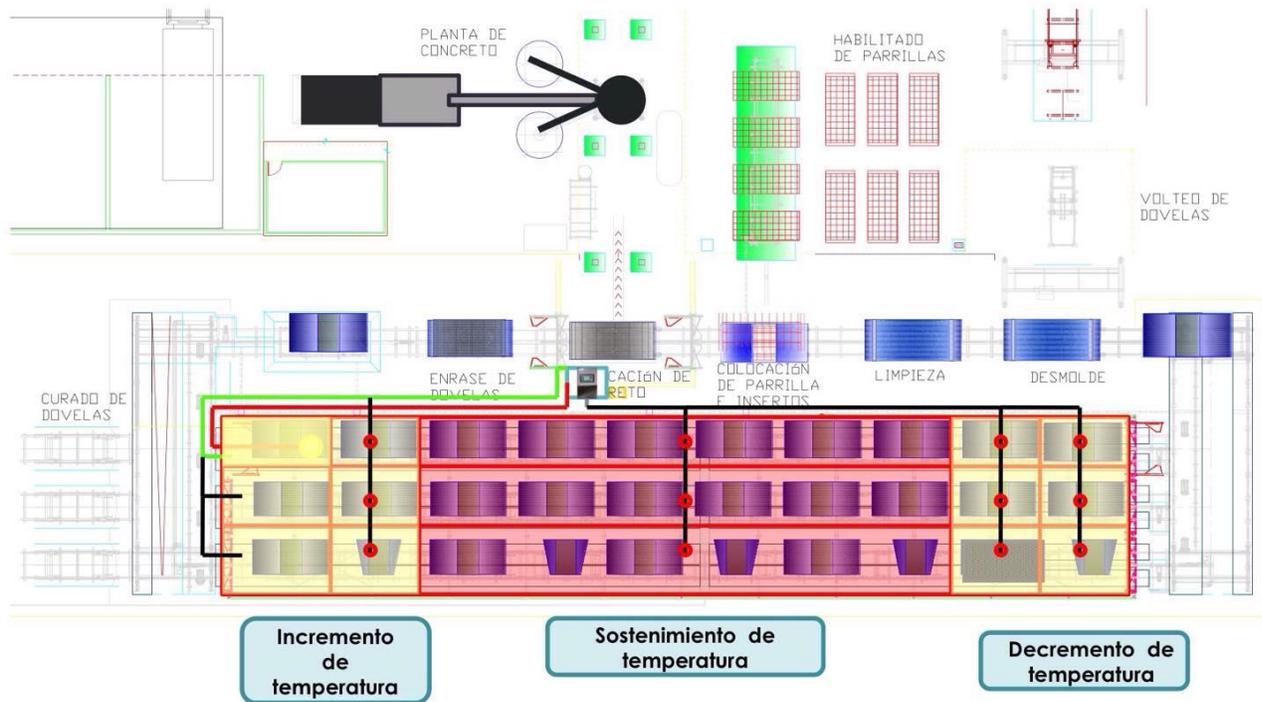


Figura 3.12 Layout del carrusel de producción de las dovelas.



Figura 3.13 Ciclo Sistematizado de la fabricación de las dovelas.

III. 4 Medidas de Seguridad

Los estándares de seguridad para la operación de una TBM son desarrollados por el Comité Europeo de Normalización, Comité Técnico. Los fabricantes de las TBM están obligados a proveer un manual técnico, el cual incluye un análisis completo de riesgos que refiere a la información extraída de las normas europeas.

Por motivos de seguridad, se decidió adoptar una solución bitubo de vía única con galerías de conexión entre ambos tubos situadas cada 244 m (Por la norma NFPA130). Este tipo de diseño es habitual para túneles de una longitud igual o mayor a la prevista pues evita choques causados por descarrilamiento o cargas desplazadas, facilita además la evacuación y actuación de los equipos de intervención a través del tubo no incidentado y favorece la ventilación longitudinal.

Conforme a los requerimientos legales de la Secretaría de Trabajo y Previsión Social, se elaboró un plan de seguridad para el cumplimiento de dichos requerimientos:

- Matriz con la identificación de posibles riesgos, así como una evaluación del impacto cualitativo y cuantitativo de cada riesgo por zonas.
- Acciones propuestos para la mitigación de cada riesgo.

III. 5 Recomendaciones de Operación del TBM

Un análisis de riesgo en la operación de la TBM debe considerar todos los peligros relacionados a su uso, para así pues tomar las precauciones necesarias siguiendo las recomendaciones siguientes:

Excavación y desperdicio

Si se forma una cavidad en el extradós del escudo, ésta debe ser localizada y reparada. Un llenado rápido de estas cavidades se puede lograr mediante la inyección de materiales expansivos (como lo es la resina de poliuretano bicomponente. El manejo y ejecución de estas inyecciones subterráneas debe hacerse como sumo cuidado, ya que algunos de sus componentes resultan nocivos o perjudiciales al tener contacto con ellos o al inhalarlos y, en caso de un incendio, se pueden producir gases tóxicos. Se deberá contar con herramientas específicas, así como seguir ciertos procedimientos para controlar los peligros o riesgos que el manejo de estas sustancias representa. El atento control y monitoreo de la excavación aminora o incluso eliminar la necesidad del uso de este tipo de inyecciones y, como consecuencia,

puede también eliminar el riesgo inminente de incendios y la contaminación química en el personal.

Transporte

El transporte de residuos (si no se hizo mediante una banda transportadora), segmentos, desperdicios, materiales sobrantes así como de personal, se hace mediante el uso de trenes, lo cual implica los siguientes riesgos:

1. Descarrilamiento
2. Atropellamiento de personal y/o materiales
3. Incendios y humo
4. Contaminación del área de trabajo

La reducción u obstrucción de la visibilidad de manejo en la cabina del tren, en referencia a la dirección de la entrada del túnel y hacia la TBM, representa una particularidad de este sistema de transporte, la cual necesita ser compensada con videocámaras y un monitor instalado en la cabina de mando del tren. Sin embargo, la visibilidad del operador permanece incierta a pesar del uso de estas herramientas; por lo tanto, es necesario que el operador se familiarice con los lugares de trabajo que se encuentran a lo largo de la ruta, los cuales deberán contar con una buena iluminación.

La entrada a la TBM estará controlada por semáforos y, en ocasiones, se recomendará el uso de estos semáforos a lo largo de la ruta para que así el operador del tren pueda realizar un recorrido con suma seguridad. La velocidad del convoy es un parámetro importante que precisa ser controlado; ésta va a depender de la calidad e inclinación de los trayectos, así como del peso acarreado. Es esencial contar con un excelente sistema de comunicación que conecte el tren de transporte, el centro de mando de la TBM y la estación exterior.

El transporte de personal se realiza generalmente mediante vagones especiales. La construcción de túneles dentro del contexto urbano se caracteriza por contar con una serie de puntos de acceso, para así poder llegar a la TBM en una distancia que no rebase los 1000 m.

Revestimiento

Los riesgos o dificultades que pueden presentarse durante el manejo de segmentos y su colocación, representan un alto riesgo si los trabajadores no se encuentran en una zona de

seguridad y si los procedimientos no son estrictamente aplicados. Un segmento de concreto tiene un peso considerable en toneladas, y las consecuencias de su colocación desde una altura considerable dentro del escudo pueden estar limitados solamente a daños materiales solamente si las posiciones de trabajo y los procedimientos de seguridad fueron estrictamente organizados. Se recomienda revisar la eficiencia de enganche tanto mecánicamente como neumáticamente, esto al elevar el segmento unos pocos centímetros y por un lapso corto de tiempo.

Muchos accidentes han sido ocasionados por el choque de segmentos durante las fases de acercamiento al erector.

Una correcta decisión en la manera de colocar los segmentos entre sí y los anillos sucesivos, tendrá un gran impacto en la organización del trabajo y en la misma estructura de la TBM. Recurrir a conectores automáticos, por ejemplo, evita el atornillado manual, el cual debería llevarse a cabo a grandes alturas.

Mantenimiento

Los trabajos de mantenimiento se pueden dividir en las siguientes tres fases:

1. Instalaciones a lo largo del túnel y en la superficie
2. Mantenimiento electro-mecánico de la TBM
3. Sustitución de herramientas y reparaciones en el frente excavador

Las primeras dos fases son actividades rutinarios que necesitan de una vigilancia especial ya que son realizadas mientras ocurre el tránsito de trenes.

Acceder al plenum y su preparación requiere de un profundo análisis. El plenum, donde se realiza el remplazo de herramientas y las operaciones de mantenimiento de las máquinas de corte se llevan a cabo, es un espacio angosto y resbaladizo, y el personal que está dentro de éste, corre el riesgo de caídas por obstáculos metálicos, así como también de sufrir fatiga y pérdida de equilibrio al estar en un área presurizada. Ya que se cuentan con muchas desventajas al estar dentro del plenum, se opta por requerir a personal especializado para trabajar dentro de este espacio.

Para el mantenimiento de una tuneladora cuya presión sea mayor por 1 a 3 veces a la presión atmosférica, las siguientes condiciones deben ser garantizadas:

1. Personal habilitado con calificación hiperbárica
2. Bloqueo garantizado de la rotación del frente excavador
3. Presencia de andamios móviles en la zona de excavación

4. Disposición de puntos de enganche
5. No vaciar al cien por ciento la zona de excavación cuando la ejecución se lleva acabo en la parte superior para así reducir la altura de caída de personas o materiales.
6. En caso de existir, cerrar todas las puertas corredizas.

IV. CONCLUSIONES

Como ya se mostró en el trabajo a través de las diferentes perspectivas que nos dieron los tres temas anteriores, y en particular en el apartado de historia, se puede ver que el desarrollo de los túneles ha sido muy difícil debido al terreno a tratar-sea el tipo de suelo que sea- y las limitantes tecnológicas al momento de construir. Hoy, en este creciente desarrollo que nos ha dado el siglo XXI, estas limitantes tecnológicas han ido decreciendo abruptamente, y es posible ya proponer un túnel como solución más viable frente a otras, y más por los dilemas ambientales, sociales, y algunas veces también económicos, para salvar un obstáculo, pero para llegar a estas instancias, la humanidad, y en especial los profesionales de la ingeniería, debieron superar situaciones adversas tanto en lo financiero como en lo técnico (véase el caso del túnel de Brunel).

El trabajo propone conocer a fondo el empleo de tuneladoras cada vez más eficientes para poder ejecutar excavaciones en el material que se presenta y en la dificultad que sea, y para eso es necesario que el interesado lector de esta tesis, conozca a grandes rasgos la historia de los túneles y sus diferentes métodos de construcción, para así poder crear el panorama que permita dimensionar la importancia del uso de una tuneladora en la construcción de este tipo de obra civil en relación a la eficiencia en tiempo y en dinero, así como al cuidado del medio ambiente.

Muchos proyectos se han ejecutado en base al uso de este tipo de máquinas, algunos con más impacto social e ingenieril que otros, pero absolutamente todos con un grado de complejidad considerable. Uno de ellos, y probablemente el más conocido en cuanto al uso de tuneladoras, es el del Túnel Emisor Oriente, el cual se fondea anualmente con recursos públicos desde el 2008 (año en que inició su construcción); para su construcción, CONAGUA compró seis de estas máquinas (las cuales son de tipo *Earth Pressure Balance*). El TEO se adjudicó como proyecto de carácter de emergencia, lo que condujo a la inexistencia de un proyecto ejecutivo ni estudios geológicos consecuencia de ello, una de las seis tuneladoras sufrió un averío al toparse con piedras redondas y de superficie lisa que eran casi imposibles de romper.

A lo largo del desarrollo del presente trabajo, fue interesante analizar el mejoramiento que han presentado las máquinas tuneladoras hoy en día, derivado de esto, hoy podemos hablar que los costos de excavación son más baratos en comparación con los métodos convencionales. A su vez, no podemos relegar el aumento en la magnitud de las exigencias en

cuanto a las medidas de seguridad, ya que, como se vio en el primer capítulo, se sufrieron de bajas mortales en la construcción de algunos túneles, por lo que esta fase de planeación, dentro de una construcción civil, sea cual sea, ha cobrado relevancia en los últimos años, porque, debido a la concientización de las personas (y a lo severo de las sanciones), ya no es solamente lo económico lo que más importa, sino la seguridad del personal que ejecuta la obra.

Otra ventaja que supone el uso de las tuneladoras en comparación con el uso de explosivos es el ruido y la resonancia que provocan estos últimos. Prueba de esto, se tienen los múltiples casos de quejas de vecinos que se suscitaron durante la construcción de dos túneles en el "Ramal de Camelinas" en la ciudad de Morelia, Michoacán, específicamente en el túnel número dos, el cual, situado a escasos metros de edificaciones urbanas, fue foco de atención de numerosos quejosos circunvecinos a la obra, quienes argumentaban que debido a las explosiones, habrían aparecidos grietas en sus viviendas (argumento desmentido después de un peritaje realizado a cada una de las casas de los quejosos). Esto fue suficiente para retrasar algunos días los trabajos, durante los cuales los ingenieros se dieron a la tarea de idear una mejor manera de realizar las voladuras.

El bitúnel del tren Interurbano es una obra de gran magnitud, y requirió de un gran número de profesionales de la ingeniería, así como de personal de obra. Es cierto que el proyecto del Tren Interurbano presenta un atraso considerable, así como un sobre costo, pero su construcción resulta necesaria por temas sociales, ya que la conexión entre la Ciudad de México y la Ciudad de Toluca, provoca alrededor de 400 accidentes automovilísticos por año, en los cuales mueren 30 personas en promedio. Otra ventaja es que el uso de este transporte eléctrico traerá múltiples beneficios a la calidad del aire en la zona poniente de esta metrópoli, cuando 34,500 toneladas de CO₂ dejen de emitirse por los vehículos. En temas económicos, se reducirán 680 millones de pesos al año en gastos de mantenimiento a la infraestructura de vialidades y a unidades de transporte público y privado.

GLOSARIO

- **Abrasión:** es la acción y el efecto mediante los cuales se produce el desgaste de algo por el método de la fricción.
- **Acueducto:** conducto artificial para conducir agua, especialmente para el abastecimiento de una población.
- **Aluvial:** que se ha formado a partir de materiales arrastrados y depositados por corrientes de agua.
- **Anillo de atraque:** elemento estructural conformado de cierto número de dovelas el cual ayuda a una tuneladora a comenzar los primeros metros de excavación.
- **Arcilla:** tierra constituida por agregados de silicatos de aluminio hidratados.
- **Arenisca:** roca sedimentaria formada por pequeños granos de arena compactados, cuya dureza depende del tamaño de los granos que la componen.
- **Banco de nivel:** punto de referencia sobre un objeto fijo cuya elevación es conocido y desde la cual se pueden determinar otras elevaciones. También llamado cota fija o punto topográfico de referencia.
- **Banqueo:** limpieza, corte y allanamiento de un terreno en planos escalonados para formar bancales.
- **Barcaza:** barco grande y descubierta que se utiliza para el transporte de carga entre barcos o entre un barco y tierra.
- **Caliza oolítica:** tipo de roca sedimentaria que consta de núcleos granulares de 2 mm de diámetro originados por precipitación de carbonato cálcico.
- **Canal:** construcción destinada al transporte de fluidos, generalmente utilizada para agua, y que, a diferencia de las tuberías, es abierta a la atmósfera.
- **COTRISA:** Construcciones y Trituraciones SA de CV.
- **DGTFM:** Dirección General de Transporte Ferroviario y Multimodal.
- **Dinamita:** explosivo sólido formado por una mezcla de nitroglicerina y un material poroso.

- **Dovela:** elemento estructural de concreto armado, que en conjunto forma el soporte del túnel, también llamado revestimiento primario. El conjunto de siete dovelas conforma un anillo.
- **Dren:** tubo de arcilla cocida, concreto poroso o similar, que se utiliza para el drenaje de un terreno.
- **Ensayo AVS (Abrasion Value Steel):** está íntimamente relacionado con el desgaste de los cortadores. La máquina utilizada para este ensayo mide la abrasión producida por polvo de roca, de granulometría inferior a 1 mm, en un trozo de acero del cortador. El valor del AVS es igual a la pérdida de peso en miligramos de dicha pieza de acero después de 20 revoluciones del plato.
- **Esclusa:** recinto con compuertas que se construye en un canal de navegación para que los barcos puedan pasar de un tramo a otro de distinto nivel, mediante el llenado y vaciado del espacio comprendido entre dichas compuertas.
- **Extradós:** línea formada por la parte exterior de las dovelas.
- **Feldespatos:** mineral silicato de aluminio que es el principal componente de la corteza terrestre.
- **Fluvial:** de los ríos o que tiene relación con ellos.
- **Gálibo:** dimensión máximo de un vehículo grande que sirve para determinar si puede pasar por un túnel o por debajo de un puente, un paso elevado, etc.
- **Gelignita:** explosivo gelatinoso utilizado habitualmente en canteras, minas y en voladuras bajo agua.
- **Geotextil de gramaje:** es una tela permeable y flexible de fibras sintéticas, principalmente polipropileno y poliéster, las cuales se pueden fabricar de forma no tejida o tejida dependiendo de su uso o función a desempeñar.
- **ICA:** Ingenieros Civiles Asociados SA de CV.
- **Índice DRI (DrillingRateIndex):** estima la velocidad de penetración de los martillos de perforación. Se utiliza para predecir la velocidad de avance de una TBM.
- **Limo:** sedimento transportado en suspensión por los ríos y por el viento.
- **Lutita:** roca sedimentaria clástica de grano muy fino.
- **Mojonera:** en topografía: distintivo que se utiliza para la rápida ubicación de puntos de control. Generalmente son construidas en concreto colocando una varilla justo en medio de la mezcla, la cual indicará la coordenada buscada.

- **Nitroglicerina:** sustancia pesada y aceitosa resultado de la acción del ácido nítrico en la glicerina que, mezclada con un absorbente, forma la dinamita.
- **Nivel Freático:** es el nivel superior de una capa freática o de un acuífero en general. También se conoce como capa freática, manto freático, capa freática o simplemente freático.
- **Plano alimétrico:** son los planos que contienen el estudio del conjunto de cotas o alturas con respecto a un plano de referencia.
- **Planos Planimétricos:** son los planos que contienen no solo los lindes y superficie del terreno, sino también los elementos singulares tanto de obra como del territorio.
- **Pendiente:** inclinación de un elemento constructivo respecto de la horizontal.
- **Rasante:** nivel de una calle o camino, considerado en su inclinación respecto del plano horizontal.
- **Ruta Crítica:** método que se emplea para calcular los tiempos en la planificación de un proyecto.
- **SCT:** Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- **Tungsteno:** metal sólido de color blanco plateado, dúctil y difícil de fundir.
- **Talúd:** inclinación que se da a las tierras para que se sostengan las unas a las otras.
- **Voladura:** destrucción total de una cosa utilizando explosivos y haciendo que salte por los aires.

ANEXOS

FOTOS	Descripción
	<p>Vista de tuneladora "La Mexiquense".</p>
	<p>Tren de traslado de personal.</p>
	<p>Interior de la tuneladora "La Marquesa".</p>



Vista interior de túnel construido por TBM "La Marquesa"



Pasantes tesistas visitando el proyecto en cuestión.



Desensamblaje de tuneladora "La Marquesa".



Proceso de desensamblaje de TBM "La Marquesa".



Disco de corte ubicado en el escudo de la TBM.



Pasantes tesistas dentro de túnel excavado por TBM "La Marquesa".

BIBLIOGRAFÍA

MEGAW, T., & BARTLETT, J. (1988). *Túneles: Planeación, diseño y construcción Volumen 1*. México D.F.: LIMUSA.

MEGAW, T., & BARTLETT, J. (1990). *Túneles: Planeación, diseño y construcción Volumen 2*. México, D.F.: LIMUSA.

AUTORES VARIOS (2012): *Ingeniería y Construcción. Con experiencia y Calidad Hacemos Realidad Grandes Ideas. 65 Aniversario ICA*.

Términos de Referencia de la Licitación Pública Nacional No. LO-009000988-N19-2014, para la contratación de la obra pública a precios unitarios referente a la "CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL FERROVIARIO "PORTAL PONIENTE DEL TÚNEL AL PORTAL ORIENTE DEL TÚNEL" DE 4.634 KILÓMETROS DE LONGITUD, CON INICIO EN EL KILÓMETRO 036+150.00 Y TERMINACIÓN EN EL KILÓMETRO 040+784 EN EL DISTRITO FEDERAL, EL CUAL FORMA PARTE DEL PROYECTO INTEGRAL DE TRANSPORTE DE PASAJEROS "TREN INTERURBANO MÉXICO-TOLUCA".