

La batalla por el túnel

Una disertación sobre ingeniería subterránea



CARLOS
Oteo

Prof. Dr. Ingeniero de Caminos,
Canales y Puertos
Catedrático de Ing. del Terreno

RESUMEN

En el presente texto se presenta una Historia abreviada de los túneles: Desde los túneles hidráulicos, construidos en Mesopotamia, hasta los medievales, para pasar, posteriormente, a las técnicas de tipo manual para excavar túneles y llegar a las modernas tuneladoras. Se presta atención especial a los túneles relacionados con esfuerzos bélicos, los hidráulicos y los de transporte (de vehículos y viajeros), teniendo en cuenta la primera tuneladora de Brunel, para excavar un túnel bajo el Támesis, así como a los falso túneles y a los de cielo abierto.

PALABRAS CLAVE

Túneles, Historia, construcción túneles

ABSTRACT

In the present paper an abbreviated History of the tunnels is presented: From the hydraulic tunnels, constructed in Mesopotamia, until medieval, to later pass to the techniques of manual type to excavate tunnels and to arrive at the modern TBMs. Special attention is paid to tunnels related to warfare, hydraulics and transport (vehicle and passenger) tunnels, taking into account the first Brunel tunneling machine to excavate a tunnel under the Thames, and the urban open pit tunnels.

KEYWORDS

Tunnel, History, tunnel construction

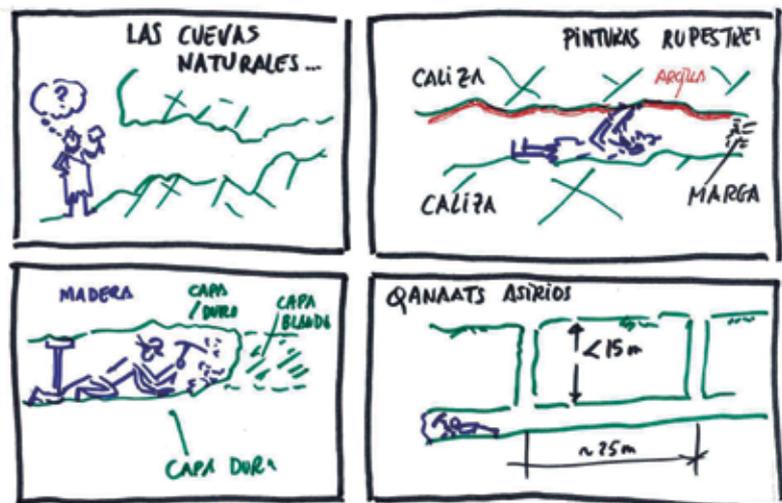


Fig. 1. "Túneles" en la Antigüedad



Fig. 2. Túnel natural en materiales cársticos (National Park en U.S.A.)

Fig. 3. Primer Túnel artificial viario en la Villa de Adriano

1 Introducción

La batalla por el Túnel es la antiquísima lucha del hombre por conquistar el espacio subterráneo y poder utilizarlo, debidamente, para el refugio, almacenamiento, la extracción de materias primas, el transporte de personas, vehículos, agua, etc.

La palabra española "túnel" proviene, según la R.A.E., del término inglés "tunnel" y viene a significar: Vía subterránea abierta artificialmente para el paso de personas y vehículos. Y también: instalación cubierta y alargada que comunica dos puntos, y sirve para distintos fines. Wikipedia define "túnel" como una obra subterránea de carácter lineal que comunica dos puntos para el transporte de personas o materiales. Normalmente es artificial. A su vez, el término inglés parece provenir del francés "tonnel", es decir un elemento casi cilíndrico de sección transversal circular y con dos extremos huecos, lo cual es una versión "poética de un túnel", salvo el cambio de sección que suele haber dentro de los toneles. Sin embargo ello ya implica algo importante en una estructura subterránea: El intento de aproximarse a la forma circular como figura más estable para una excavación y para un sostenimiento, sea con presión exterior (o sea, el del terreno, como es lo habitual) o para una presión interior (caso de túneles hidráulicos).

El ser humano, a lo largo de su existencia, ha tenido un contacto muy diferente con "lo subterráneo":

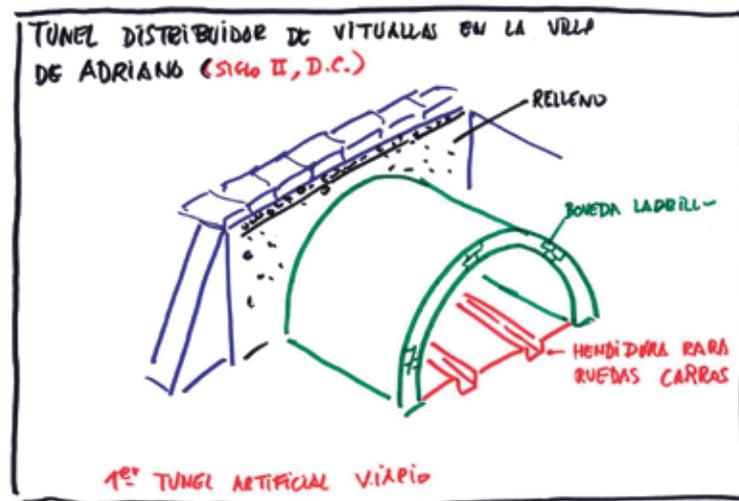
- En primer lugar, lo "oscuro y lo interior" eran, por un lado, posible refugio frente a los ataques de animales (aunque, a veces, tenía que conquistar las cuevas naturales a esos animales fig. 1a y fig. 2).

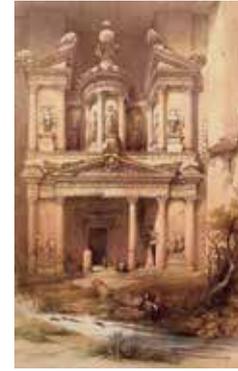
Pero, por otro, el interior de las grutas naturales eran el "misterio" y "lo sagrado", donde no podían acceder más que los iniciados. Y allí, en el fondo de esas galerías naturales, pintó sus dibujos rupestres, a salvo de las variaciones ambientales y del ataque de otros seres humanos (fig. 1b). Nace así el arte que nos ha deparado Lescaux, Altamira, etc. Por cierto, en Altamira el "pintor" trabajó tumbado en el suelo e hizo sus dibujos con pigmentos sobre una capa de arcilla que había quedado bajo una placa de caliza, después de la erosión de una zona más margosa (fig. 1b). La humedad mantiene (aún hoy) la capa de arcilla adherida a la caliza. Diversas obras de adaptación para permitir el acceso de visitantes aumentó la altura en las cámaras con pinturas, lo que junto con la inserción de pilares de hormigón-piedra, inyección con lechada de cemento de una diaclasa que surca la cabeza de la famosa "cierva", etc. han alterado las condiciones ambientales de las placas de calizas que mantienen la arcilla gracias a la humedad de infiltración, dando lugar a algunos daños en las pinturas.

- Esta idea de aprovechar la presencia de capas blandas (arcillo-margosas) entre capas cohesivas (calizas, areniscas, etc.) fue aprovechada desde antiguo, excavando con herramientas ligeras: martillos, cuñas, etc. y entibando la excavación, si era necesario, con madera (fig. 1c). Así se llegó a la construcción de verdaderas obras de conducción hidráulica subterránea: Los "qanats", persas y asirios, para transportar agua a través de zonas de elevada evaporación, mediante un sistema (después, clásico) de pozos (de acceso y extracción) y galerías cortas, de unos 40-50 m de longitud, emboquilladas desde los pozos (fig. 1d). Era importante la impermeabilidad del fondo de la galería y que, al final, el agua saliera por gravedad. Estas obras datan del año 1000 a.C., al menos. En la Antigüedad ya hubo varios túneles famosos de este tipo (hidráulicos), como el de Siloam, en Jerusalén, para abastecimiento de agua (Siglo VII a.C., JUNCA, 1990).

- En otras ocasiones se llega al túnel artificial, como el de la Villa de Adriano en que, bajo una bóveda construida a cielo abierto, hay una solera con carriles cincelados en piedra. Así podían circular por el túnel carros que permitían distribuir alimentos, enseres, etc., por la Gran Villa, sin que se pudiera ver su paso, de difícil estética (fig. 3).

En todo lo que se trata a continuación no se ha incluido el tema minero, por tener





personalidad propia y necesitar un tratamiento aparte.

2 Breve evolución histórica

La falta de herramientas adecuadas retrasa la construcción de túneles – salvo los casos citados y otros casos puntuales, como el túnel romano para carretera de Pansiloppo, cerca de Nápoles, de 1500 m de longitud y 4 m de ancho (36 A.C.), o como el que construyó Trajano en Montafuerte, entre el 98 y el 117 D.C., las galerías con misiones militares, de los que trataremos más adelante, etc. – hasta el final de la Edad Media y principios de la Edad Moderna, en que la disponibilidad de la pólvora empieza a cambiar el panorama de la construcción de túneles. Así, puede ejecutarse el Canal Real del Languedoc, de 156 m de longitud, hacia 1681, y otros túneles para canales, el principal objetivo de los túneles en los siglos XVII y XVIII, como los canales del Midi en Francia, construido por J. B. Colbert (1619-83), alguno de ellos de 155 m de longitud, con 6,5 m de ancho y 8 m de altura. Es decir, con dimensiones muy importantes.

Entre los “viejos” túneles europeos (de hasta 12.000 años de antigüedad) destacan una serie de ejemplos que van desde Escocia hasta Turquía, como ha resaltado el arqueólogo alemán Dr. Heinrich KUSCH, en su libro – escrito con Ingrid KUSCH, “Tore zur Unterwelt” o “Secretos de la puerta subterránea a un Mundo Antiguo”, (Ec. Harcover, 2009) No se sabe por qué se hicieron estos túneles, bien con misión habitacional, bien como refugio provisional y guerrero, bien con motivos religiosos, bien como tumbas, bien con motivos mixtos. Algunos de estos datan de la Edad de Piedra. El Dr. KUSCH cree que estos túneles megalíticos fueron utilizados como carreteras modernas, permitiendo la transición de personas y conectándose a lugares dis-

tantes de toda Europa, ya que algunos de los túneles están bajo docenas de asentamientos neolíticos en toda Europa (fig. 4 y fig. 5, tomadas de Internet). No todos los túneles se unen, pero, juntos, son como una enorme red subterránea. Según el matrimonio KUSCH, estos túneles “fueron construidos por personas que sabían exactamente lo que estaban haciendo”; “los constructores crearon un método de construcción en zig-zag que permitía a los túneles soportar un peso excesivo”. Hay otros expertos que consideran que esta extensa red de túneles de Europa (España, Hungría, Austria, Alemania, Inglaterra, Turquía, Bosnia...) fue una forma ideada para protegerse de los peligros del mundo exterior.

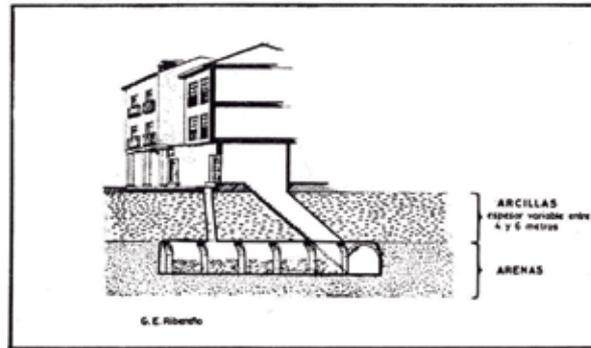
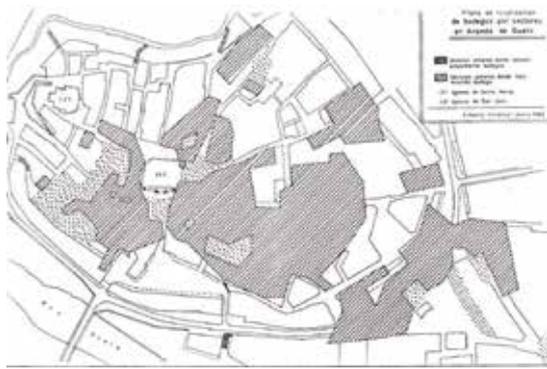
También existe una vasta red de túneles con cámaras bajo la superficie en la zona del Amazonas (en la región de los indios Macuxi), en que se dice que podía viajar-se de 13 a 15 días por ellos.

Se ha hablado de las construcciones subterráneas de los nabateos, pueblo árabe asentado en la actual Jordania, magníficos ingenieros hidráulicos, constructores de canales y de tuberías a presión. A ello ha contribuido la leyenda de Petra – su capital – como ciudad perdida durante unos 7-8 siglos. Pero entre los siglos IV a.C. y el Siglo II d. C. floreció en esa ciudad el comercio, al situarse en la ruta comercial con la India. Después, la Ruta de la Seda la dejó a un lado y pasó a ser conquistada por los romanos y, con posterioridad, fue ocupada por los Cruzados. La imagen de la Puerta del Tesoro o entrada a Petra (en la fig. 6 puede apreciarse como la vio en el siglo XIX el viajero-dibujante Roberts), con la fachada labrada en roca y la entrada a un túnel en “roca viva”, más la existencia de innumerables tumbas subterráneas en el valle principal de Petra (fig. 7) han llevado a considerar que practicaron, abundantemente, el urbanismo subterráneo. Nada más falso.

Detrás de la Puerta del Tesoro (construida para impresionar a los viajeros y comerciantes que llegaban a Petra) sólo hay una cámara de unos 8 m de anchura, 6 m de altura y 4-5 m de fondo, excavada en roca vulcano-areniscosa de gran calidad. En cuanto a los enterramientos, también están en cámaras similares (generalmente más pequeñas), detrás de fachadas de decoración, labradas en roca (fig. 7).

Durante la Alta Edad Media se desarrollan trabajos subterráneos con un destino no totalmente aclarado, como la construcción de los almacenamientos de Aranda de Duero, Burgos. A través de galerías, de desarrollo relativamente similar a un helicoide, se llegaba a una zona en que se ampliaba la excavación y se excavaba una cámara. En ella se podía almacenar viandas y vino y también, posiblemente, armamento, aunque dada la profundidad de las cámaras (10-15 m) no parece que fueran refugios guerreros. El desarrollo de estas cámaras fue relativamente fácil. Excavadas muchas veces en cavernas naturales, de origen kárstico, en que era relativamente fácil “limpiar” de “suelo” o “roca alterada”, la roca que quedaba era suficientemente estable. Y cuando había algún problema, se construían arcos de mampostería para sujetar bloques rocosos. En la fig. 8 y fig. 9 puede verse un plano de las “cuevas de Aranda” y algún esquema de las mismas. Hoy día, esas “cuevas” son propiedad de las Peñas y familias de Aranda; sirven para almacenar vino y, sobre todo, como lugar de reunión social, celebraciones, banquetes, etc. Estas figuras están tomadas del libro “La Bodegas de Aranda de Duero”, facilitado por Daniel García Espinel.

Pero en suelos blandos y semiduros el arranque del terreno con piquetas, azadones y palas, permitió el realizar los “Viajes de Agua” de Madrid para abastecer dicha ciudad, iniciados por los árabes (a lo largo del intervalo del siglo IX-XIII) y con-



tinuado por los cristianos hasta mediados del siglo XIX, en que – con la creación del Canal de Isabel II para abastecer Madrid – se desarrolla el transporte de agua por tuberías. El nombre “Viaje de agua” procede del latín “via aquae” (camino del agua) y el nombre árabe era de qanats (de donde derivan nombre locales como alcantarilla, costanilla, etc.) y de majra (de donde puede provenir el nombre de Madrid, al transformar este nombre en plural “majarit”).

Estos “Viajes” son galerías que van revestidas de ladrillo (cuando hastiales y bóveda están en “arenas de miga” y “arenas tosquizas), con lo que el agua puede llegar a la galería no sólo desde la fuente inicial, sino a lo largo del propio túnel. En solera solía ponerse un encachado, con una terminación de mezcla de cal y arena, para rellenar huecos entre piedras, que permitiera circular el agua sin daños al túnel. La pendiente de las galerías era de 1 % y podrían estar por encima del nivel freático. En los codos, se situaban “arcas” de sedimentación.

En el caso de terrenos tosquizos, los “viajes” a veces solo tenían un revestimiento en la parte baja del hastial, encachado en solera, ya que la arcilla rígida tosquiza se mantenía con el paso del agua. La humedad de la galería contribuía a esta estabilización. Como en los casos antiguos, el túnel se realizaba a través de pozos, con galerías horizontales de perforación relativamente cortos (50-100 m de longitud). El clásico trabajo de SOLESIO (Monografía del Instituto Eduardo Torroja) no solo recopiló la situación de casi todos los “viajes” madrileños, sino que permitió el conocer la distribución y administración de caudales.

La parte más moderna de estos “viajes” (a partir del siglo XVII) ha sido descrita con detalle por Prieto, Gil y Velasco (Fundación Canal de Isabel II). De la época árabe quedan pocos restos, pero de los pos-

teriores hay que destacar el de Amaniel (1610-1621), que llevaba agua desde el Pueblo de Fuencarral hasta casi la Gran Vía, el de las Fuentes de la Castellana (1617-1625), etc. Todos estos, más recientes, tienen revestimiento de ladrillo. En la fig. 10 y fig. 11 puede verse algún esquema de estos “viajes” (desde el que no lleva revestimiento hasta el que si lo lleva).

En España es de destacar el túnel o “mina” de Daroca, obra del francés Q. P. Bedel, de la época de Felipe II. Este túnel construido entre 1551 y 1556 e inaugurado en 1562, tiene 650 m de largo, con unos 6-7 m de anchura y otro tanto de altura. Fue construido como barrera natural, para evitar las inundaciones de la Calle Mayor de Daroca, en época de lluvias fuertes, a fin de drenar las aguas del barranco, en que se situaba dicha calle, hacia el Río Jiloca. Ha sido acondicionado varias veces por la Confederación Hidrográfica del Ebro y puede ser el túnel para usos hidráulicos más antiguo de Europa (considerando las edades Media y Moderna). Actualmente tiene algunos refuerzos (arcos) realizados en hormigón (Wikipedia Commons). Está declarado Obra de Interés Cultural (BOA nº 93, 7/8, 2002).

Otro túnel destacable es el de La Tablada (ferrocarril Villalba-Segovia), con 2.380 m de longitud y construido hacia 1884-88 (descrito por M. Romana, en su intervención para celebrar el 50 aniversario de la S.E.M.R., abril, 2017). Está ejecutado en granito y se excavó con galería central en clave y ensanches

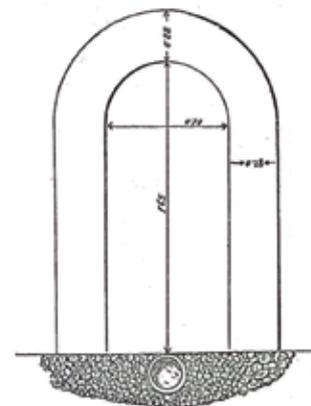
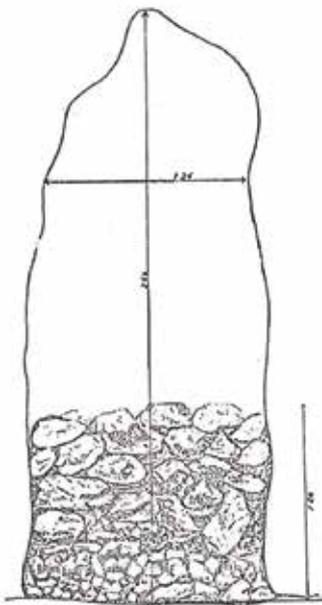


Fig. 4. Túneles neolíticos bajo Europa

Fig. 5. Galerías bajo Austria

Fig. 6. La Puerta del Tesoro en el siglo XIX (tal como la vio ROBERTS)

Fig. 7. Cuevas para instalar tumbas reales en Petra (Foto del autor)

Fig. 8. Plano de bodegas en Aranda de Duero (Burgos)

Fig. 9. Esquema de una bodega de Aranda de Duero (Burgos)

Fig. 10. Mina de un viaje de agua en Madrid con un lecho de grava (SOLESIO, 1965)

Fig. 11. Mina del viaje de agua de la Castellana (SOLESIO, 1965)

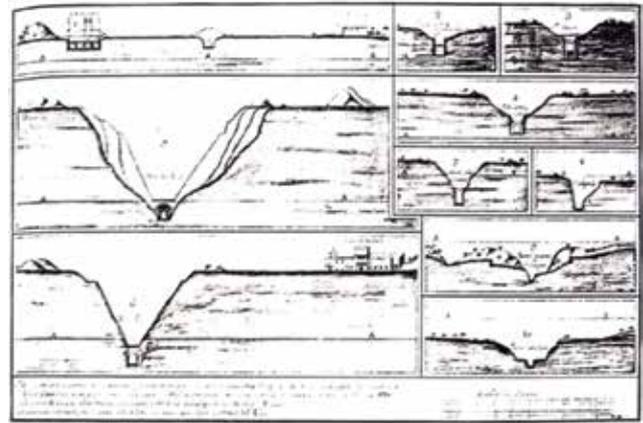
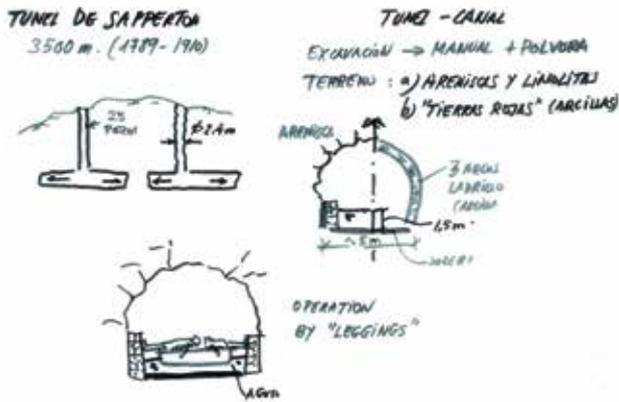


Fig. 12. Fig. 13. Diversas secciones del Canal de Huehuetoca y su río de Cautitlán en México. Año 1774, con indicación de los problemas de estabilidad de taludes. Al final, se resolvieron con taludes escalonados con inclinación media de 40° (GONZÁLEZ TASCÓN, 1992)

laterales, entibado con madera y revestido con mampostería (Método Austriaco de los Alpes).

También cabe destacar los “túneles secretos” de Madrid, que en gran parte son leyenda, como el de unión del Palacio Real (El Alcázar) con el Convento de la Encarnación. Realmente se trata de un paso por encima del suelo que atraviesa dependencias del Alcázar, la Casa del Tesoro, etc.

El Bunker del parque de El Capricho, realmente, es una galería descendente que lleva a una cámara (hoy visitable), que se empleaba como refugio durante la Guerra Civil del siglo XX y en la que se reunían autoridades militares, como en algunos sótanos bajo el Ministerio de Hacienda, en el que hubo una galería que se ejecutó para unir con la Línea 1 del Metro. Bajo el Banco de España hay una cámara (la del Oro) que se hizo en 1932, con 2.500 m² de superficie y a 36 m de profundidad. Más datos pueden verse en la Guía del Ocio del 25/5/2016 (Nacho Medina).

El Túnel de Bonaparte (de la época de José Bonaparte) une el Palacio Real con la Casa de Vargas de la Casa de Campo. En 1891 fue reparado. Ahora no puede accederse a él.

Todos estos túneles o no tienen revestimiento o lo tienen de ladrillo.

En Inglaterra destaca, entre los túneles con paso de agua, el túnel de Sapperton (hacia 1789), que estuvo en servicio hasta 1910. Se trata de un túnel-canal, cuya excavación se hizo combinando el arranque manual con el uso de la pólvora, ya que se perforó en dos tipos de terrenos:

a) “Tierras rojas” arcillosas (excavación manual, con entibación).

b) Areniscas y limolitas no excesivamente cementadas, pero suficientemente estables como para quedar sin revestimiento (fig. 12).

En cualquier caso en, los hastiales se hicieron muros de mampostería, que se prolongaban hasta la bóveda con tres arcos de ladrillo, en el caso del terreno arcilloso. Además, se construyó una solera de mampostería para que así (con la parte baja del hastial) quedara definido un canal, por el que podía circular agua con una lámina de 1,5 m de altura. Este túnel se excavó con el sistema clásico de pozos (veinticinco en total), de 2,4 m de diámetro (fig. 12), lo que limitaba el que las galerías tuviesen una longitud máxima de unos 100 m. Las filtraciones en la zona rocosa mantenían la estabilidad de la roca blanda y aportaban agua al túnel-canal.

La operación de las lanchas que circulaban por el túnel-canal (es decir, al final era un canal para barcazas y carga de personas y viandas, principalmente) es curiosa. Puede decirse que se operaba por “leggings” (fig. 12). Es decir, personas tumbadas en las barcazas apoyaban sus pies en las paredes del túnel y movían, así, el medio de transporte. Este sistema está muy bien descrito por C. S. Forrester, el autor inglés de la serie de novelas del marino Hornblower y “La Reina de África” (“Hornblower y la Atropos”, edición española de 1999. Ed. Edhasa). Actualmente este túnel está en fase de recuperación histórica.

En cuanto a las obras en Iberoamérica, a partir del siglo XVI el panorama ingenieril cambia y se abordan importantes obras hidráulicas (presas, canales, etc.).

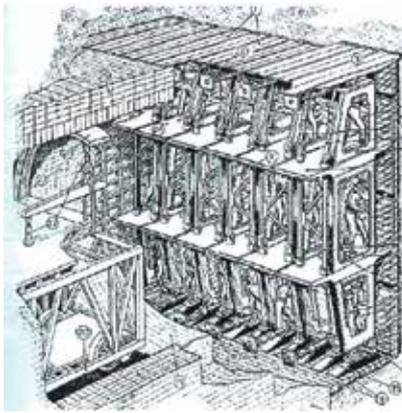
Entre otras, se plantea el gran problema del desagüe y saneamiento del Valle de México, problema aún sin resolver completamente. Ya en el siglo XVI, Cortés y sus sucesores se plantean el problema y chocan con los de estabilidad de taludes de excavación de las trincheras y túneles (o socavones). Después de varios intentos, se llega en el siglo XVIII a la solución del Ingeniero D. Álvaro de González esquematizado en la fig. 13, en la que, a la idea de una inclinación adecuada de los taludes, se une la del proceso constructivo seguido en el canal griego de Corinto (excavación manual, alterando lo mínimo el terreno) y en la realización de túneles en la parte baja de los valles, con escaso recubrimiento de material aluvial (GONZÁLEZ TASCÓN, 1992).

Todo esto va a cambiar en el siglo XIX con dos acontecimientos muy importantes en el mundo tunelero:

- La utilización del escudo de Brunel para perforar un túnel bajo el Río Támesis.
- La patente de la dinamita, por Nobel, hacia 1867.

Los Brunel (Marc y el más famoso Isambard Kingdom) trabajaron en la construcción de un túnel (excavado principalmente en la Arcilla de Londres) bajo el Támesis. Hoy hay un Museo que conmemora esta hazaña y en el que se considera que esta obra de ingeniería inaugura la modernidad de Gran Bretaña. Precisamente había habido otros intentos fallidos (el de Traithick, abandonado en 1808).

Marc Brunel se inspira en la acción excavadora del molusco marino *Teredo Navilis* (el que puede “comerse” el hormigón de pilotes portuarios en la zona de carrera



de marea o madera de barcos). Este “bichito” excreta fuera de su cuerpo, lo que “traga”, con lo que deja un “refuerzo” (de madera en esa época) en el hueco que va creando, con lo que éste se hace estable. A partir de esta idea, Marc Brunel inventa el escudo tunelero, de sección rectangular (lo que, hoy, parece poco lógico), con un marco dividido en treinta y seis celdas, en cada una de las cuales trabajaba un operario con pico y pala (fig. 14 y fig. 15). Los operarios quedan, así, protegidos por la parte superior del escudo. Cuando se ha excavado una cierta longitud, el escudo puede avanzar gracias a la acción de gatos hidráulicos y empezar una nueva fase de excavación. El frente está abierto, pero queda “algo sujeto” con el propio escudo y sus diferentes refuerzos verticales y horizontales.

Este sistema era bueno para proteger a los operarios pero permitía colapsos frecuentes (seguramente, por la forma de la sección de avance), con lo que el túnel no pudo acabarse.

Cuando su hijo Isambard Brunel llega a Ingeniero Jefe, las aguas del Támesis (contaminadas, con contenidos fétidos producidos por gases de metano de los vertidos, hasta el punto de tener riesgo de inflamación) habían ya creado problemas de salud en los operarios y lo hicieron en él mismo. Continúa los trabajos con el escudo rectangular proyectado por su padre Marc. Dentro de él se construían dos túneles, con un hastial intermedio común y sección en herradura, lo que hacía más estable los túneles (fig. 15). La idea era que todo el túnel se desarrollaría en un estrato de arcilla azul (la “London Clay” típica) y que no había problemas

de agua (1824). Lo primero que se hizo fue hincar un pozo indio, con sistema de bombeo, para llegar a la capa en cuestión. Después de hincar este pozo – de \varnothing 16 m – hasta unos 20 m de profundidad, se inició la construcción de otro pozo de menor diámetro (unos 8 m), que acabo hundiéndose por una rotura de fondo en arenas con agua. Solucionado este tema se inició la instalación del escudo Brunel y la excavación del túnel, a unos 20 m de profundidad. Poco después, el recubrimiento de arcilla resultó ser pequeño y se produjo una entrada de agua importante (Enero 1826).

Superado este incidente, se continuó la excavación. En enero de 1828, muy avanzado el túnel, en el cual el Río entró de nuevo a través de la solera, inundando el túnel en minutos y con seis víctimas (fig. 16). Los huecos en el lecho del río se rellenaron con sacos de arcilla. La obra quedó entonces suspendida 7 años, reanudándose en 1838, terminándose sin especiales dificultades. Una vez resueltos todos los problemas, Brunel organizó un banquete dentro del túnel (fig. 17) amenizado por la Banda de los Guardias de Coldstream. Durante las 15 semanas posteriores a la inauguración del túnel, un millón de personas (la mitad de la población de Londres) tuvo el privilegio de atravesar el Támesis sin utilizar puentes. El túnel pasó a ser ferroviario en 1869 (fig. 18).

Desde este escudo de Brunel pasaron muchos años para que el tema evolucionara. En 1952, Robbins diseña la TBM moderna, para un túnel en la Presa de Oahe, en Dakota del Sur. Previamente, ya se había introducido la ventilación (1927) en el túnel de Holland.

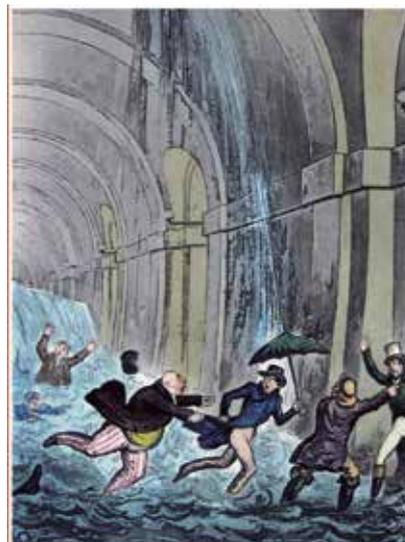
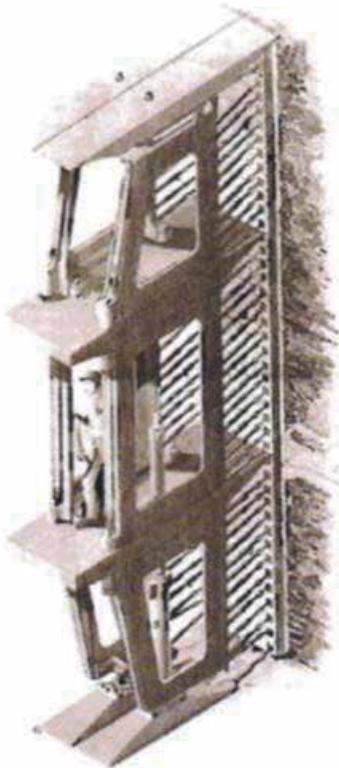


Fig. 14. El Escudo de Brunel

Fig. 15. Sección rectangular excavada y luego transformada en dos vías separadas

Fig. 16. Inundación del túnel bajo el Támesis



Fig. 17. Banquete en el interior del túnel bajo el Támesis

Fig. 18. Túnel bajo el Támesis. Permite cruzar el famoso río de la capital inglesa. Tiene 396 metros y une los barrios de Rogherhithe y Limehouse

En cuanto a la dinamita, nos referiremos a ella en el siguiente capítulo.

3 Herramientas

Como hemos señalado en algún trabajo anterior, el progreso de la actividad ingenieril relacionada con el terreno depende de:

- Útiles disponibles para excavar el terreno.
- Grúas o medios de elevación y remoción del material excavado.
- Sistemas de transporte para eliminar ese material excavado y llevándolo a terraplenes, vertederos o silos similares.

En el caso de los túneles, los dos últimos condicionantes se fueron resolviendo rápidamente: Pequeñas palas, de uso manual, permitían remover el material y verterlo a carros (después vagonetas), movidos con tracción humana y/o animal, como pueden ser mulos ciegos (lo que, en el Metro de Madrid llegó a ser utilizado hasta 1970, aproximadamente). Era, al principio, más difícil de disponer de herramientas para el arranque.

Sin entrar en detalle de la nomenclatura de los útiles de cantería o minería y sólo utilizando sus nombres genéricos, se puede indicar que los útiles usados para abrir galerías aparecen enumerados, en orden histórico en el Cuadro 1.

Van desde las mazas o martillos normales, para golpear y deshacer rocas blandas, hasta las piquetas y palas, para remover materiales blandos en la antigüedad. Estos útiles eran, primero, de bronce y, después, de hierro, manteniéndose durante muchos años el uso de estas

herramientas y la experiencia de la cantería, introduciendo los útiles de corte en discontinuidades o “vetas” de roca. Estas operaciones eran ayudadas con el uso del fuego para calentar la roca y su apagado rápido con agua fría, lo que inducía el resquebrajamiento de la roca, para su posterior desmenuzamiento con las mazas. A veces también se podía cortar con el enfriamiento del agua en esas discontinuidades (helada en climas fríos), lo que ayudaba a abrir las litoclasas, al aumentar el volumen el fluido aportado.

1º)	Martillo + piqueta + buril + agua
	Fuego y agua
	Experiencia de canteros
2º)	Pico y pala □ suelo
	Taladros manuales
	Pólvora
3º)	Barreno corto
	Taladradoras vapor
	Dinamita, barrenos largos
4º)	Otros explosivos. Goma 2
	Martillos y picas neumáticas
	Maquinaria retroexcavadora + pala ...
	Picas y movimientos circulares

Cuadro 1. Las herramientas de excavación (orden histórico)

Como resulta lógico, tanto el fuego como la helada eran sistemas lentos, pero también la “mano de obra” era muy poco costosa.

Las taladradoras manuales ayudaban pero no fueron realmente útiles hasta que se pudo utilizar la pólvora, para acentuar su efecto, como ya hemos comentado en el apartado anterior. De ahí se pasó a las taladradoras de vapor y de aire com-

primido (que ya pueden perforar metros), las cuales, en el siglo XIX, llegan a tiempo para pasar de la pólvora a la dinamita (patentada en 1867, como ya hemos dicho). Así pueden perforarse barrenos largos y bien distribuidos por la superficie de avance. Esa dinamita ha ido evolucionando a los explosivos plásticos, etc. En la fig. 19 puede verse el “jumbo” utilizado en el túnel de La Argentera hace unos 70 años.

Por otro lado el vapor – y la electricidad – hace que la potencia de las máquinas aumente y puedan utilizarse en martillos y picas neumáticos (de poca potencia, pero manejables para suelos, que todavía se usan en el Método Tradicional de Madrid) y en maquinaria pesada de arranque: Retroexcavadoras, palas, “pica-picas”, etc., ya en el siglo XX. De ahí al arranque por medios mecánicos o picas con penetración y movimiento circular sólo hubo un paso. De hecho ya aparecen en la patente de Robbins de TBM de 1952.

Los elementos de extracción también van evolucionando, esquematizándose su tipo en el Cuadro 2:

1º)	Carro arrastrado por personas y/o animales (con o sin vías)
2º)	Cinta transportadora
	Vagonetas autopropulsadas
3º)	Vehículos auxiliares

Cuadro 2. Elementos de extracción (orden histórico)

- Primero el capacho o cubo con residuos y transporte humano.

- El carro o vagoneta, arrastrado por animales o empujado por el hombre.



Fig. 19. Perforaciones con "jumbo" en el Túnel de La Argentina

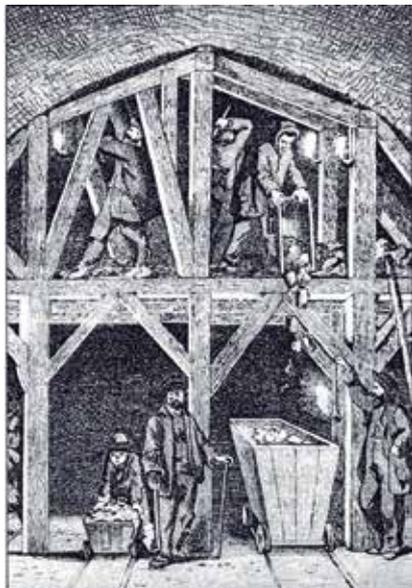


Fig. 20. Método Austriaco empleado en los túneles de los Alpes. Sostenimiento de madera



Fig. 21. Sostenimiento de ladrillo

1º)	Madera
2º)	Ladrillo
	Madera+Acero
3º)	Malla metálica + cuadros madera
4º)	Mampuestos fábrica
5º)	Hormigón
6º)	Bulonado y paraguas metálicos
7º)	Hormigón proyectado
8º)	Inyecciones de lechada cemento, resinas, etc.
9º)	Chapa bernold y otros medios auxiliares

Cuadro 3. Elementos sostenimiento-revestimiento (orden histórico)

- La cinta transportadora – actualmente incorporada a prácticamente todas la tuneladoras – ya se usaba en la construcción del Metro de Madrid, hacia 1916.

- Las vagonetas autopropulsadas, que pueden arrastrar containers con terreno, trasladar elementos prefabricados del revestimiento (dovelas), personal, etc.

- Vehículos auxiliares, como grandes "dumpers", "lagartos", etc.

Toda esta evolución, lenta a lo largo del tiempo y que se ha acelerado en los últimos 150 años (y especialmente en los últimos 60 años) va unida a los elementos utilizados para sostener y/o revestir el túnel, que pueden verse – en un orden aproximadamente histórico – en el Cuadro 3:

- La madera, como elemento más sencillo y más similar a la primera época de la minería: Hastiales algo inclinados, apuntalamiento horizontal en bóveda (fig. 20).

- El ladrillo, colocando roscas de 2-3 elementos e intentando rellenar el hueco entre estos elementos y el terreno. Siempre quedaban huecos (fig. 21). Esta solución se ha utilizado hasta hace poco, aunque era muy lenta, existiendo túneles del Metro de Madrid (de la primera mitad del siglo XX) con revestimiento de este tipo. Incluso hay, así, Estaciones como la de Sol de la Línea 2, que tuvimos que semi-descargar y reforzar al hacer la remodelación subterránea de la Puerta del Sol (hacia 1985).

- Los cuadros de madera y mallas metálicas (estilo minero) para sujetar el terreno, en general, y evitar desprendimientos de tipo "chineo".

- Madera y acero, con arcos o cerchas metálicas, (rectas y, después, curvas), para conseguir secciones resistentes

perpendiculares al túnel, recibiendo las presiones a través de la madera que unía los arcos, estando esa madera (o mallas metálicas) en contacto con el terreno.

- Bloques de mampostería. Es el caso de los túneles alpinos del siglo XIX, sostenidos con madera (fig. 20 y fig. 22). Estos túneles se construyeron con el llamado Método Austriaco (no el Nuevo), a sección partida, iniciando la excavación con dos galerías de avance (bóveda y solera), con sostenimiento de rollizos y tablonos de madera. Dado que no disponían de hormigón todavía, era necesario excavar (por fases) toda la sección y entibarla, a fin de empezar, desde la parte baja de hastiales, a colocar el revestimiento, constituido por mampostería de bloques elaborados en cantera, hasta llegar a la clave (como en el clásico arco de puente). El procedimiento era lento, pero bastante seguro. Para el arranque se podía usar pólvora o dinamita, en cantidades limitadas, ya que las secciones de avance eran pequeñas (2-5 m²).

- Cuando ya se puede utilizar el hormigón con cementos hidráulicos, hacia el último tercio del siglo XX, el panorama cambia. El Método Austriaco evoluciona y ya no hace falta excavar toda la sección sino que, una vez (con sostenimiento de madera) excavada y sostenida la mitad superior o de bóveda, se puede introducir un encofrado, rellenar de hormigón y tener un revestimiento resistente al cabo de un día o poco más. Nace así la variante al Método Austriaco que acaba llamándose "del belga" o "belga", ya que lo aplican, en Madrid y otros lugares, personas que habían trabajado en Austria. Realmente, en Madrid debería llamarse el "método del belga", por el origen de la persona que lo introdujo, conservando, al principio, las dos galerías, la superior de avance y la inferior comunicada con la superior por pozos, de evacuación del escombros. Este Método, con el tiempo, evoluciona

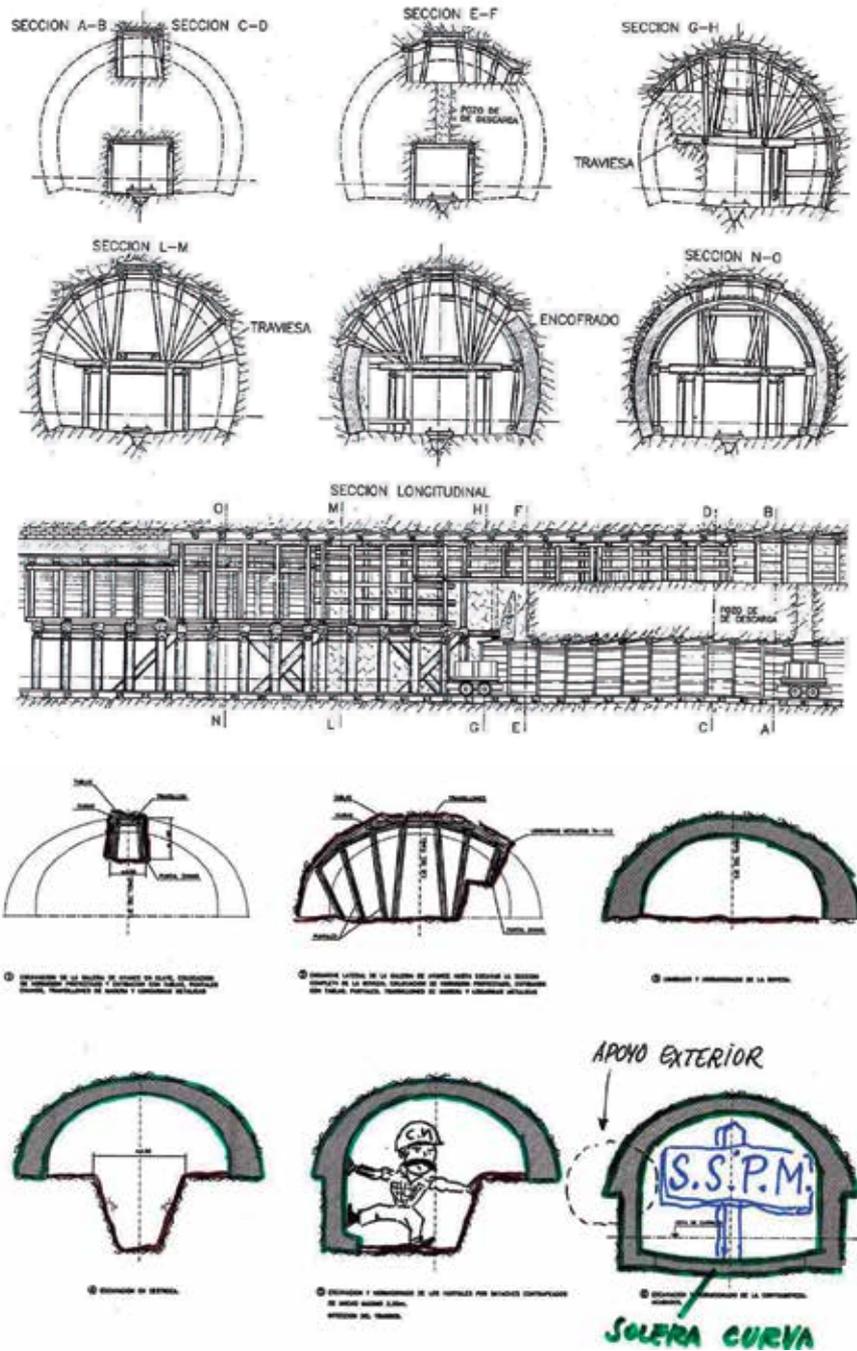


Fig. 22. Revestimiento de mampostería en el Método Austriaco

Fig. 23. El método Tradicional de Madrid

a su vez: Se elimina la galería inferior (fig. 23), se hacen los batches introduciéndose lateralmente desde una destroza central (con las bóvedas de hormigón parcialmente apoyadas en el terreno), se cambian los elementos de madera que se apoyan en los rollizos o pies derechos verticales para sustituirlos por vigas metálicas en V (ya que esos dos elementos, que van a trabajar a flexión, son útiles en el conjunto del sostenimiento)... Todos estos cambios (fig. 23) quedan completados hacia 1960-70 en el Método Tradicional de Madrid, aplicándose también este sistema en la excavación de túneles de Barcelona (y que, más recientemente, ha llegado a Sevilla, Málaga, etc.).

- Empiquetado o bulonado, unido a la posibilidad de realizar taladros relativamente largos, en que se introduce una piqueta metálica o perno para reforzar el terreno (bóveda antes de excavar) sujetar bloques de roca algo inestables (que quedan atravesados por el perno). En principio el diámetro de perforación era ligerísimamente mayor que el del perno, para que quedara algo sujeto. De ahí viene el "empiquetado" que se utiliza en el avance de túneles en materiales como las pizarras y esquistos, para limitar el efecto de las voladuras y evitar sobreexcavaciones. Con el tiempo, se pasó a colocar placa en el extremo del perno y a aplicar tensión en el anclaje y, por otro lado, a inyectar el interior de la perforación (lo que implica que el diámetro de perforación debe ser del orden de vez y media el del perno) o a utilizar cartuchos de resina bicomponente en el extremo de la perforación. Y por supuesto el más moderno sistema de anclaje mecánico, tipo Swellex, tan utilizado en obras reales, (aunque muchas veces no sea el más adecuado para el tipo de terreno), dada su rapidez de instalación. Por supuesto, el bulón autoperforante, con cabeza de rotación perdida e inyectable por su extremo o por válvulas intermedias, es el último paso (hasta el momento), desde hace unos 10-15 años. A veces el bulón queda sustituido por micropilotes (o sea, elementos metálicos, de mayor rigidez, con posibilidad de inyección tipo IU, IR e IRS (fig. 24 y fig. 25)

- El hormigón proyectado o "gunita" con sus variedades de vía seca y vía húmeda, base del desarrollo de los sostenimientos de colocación rápida y del Nuevo Método Austriaco (NATM) desde los años 40 del siglo XX, según las ideas de Rabcewick, con proyección de espesores de unos pocos centímetros (3-4, para protección de una roca competente) hasta de "corazas de gran espesor" (30-40 cm, en que

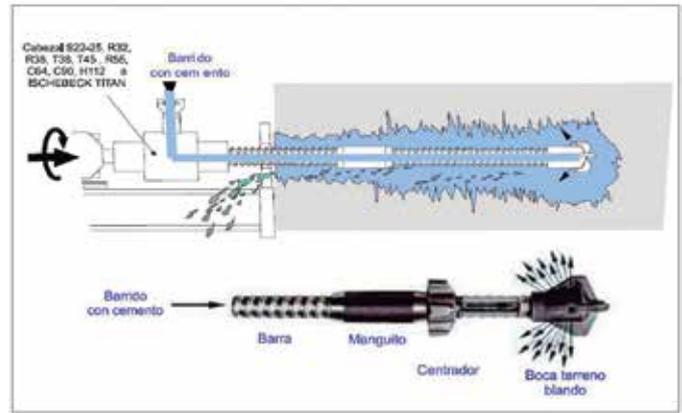
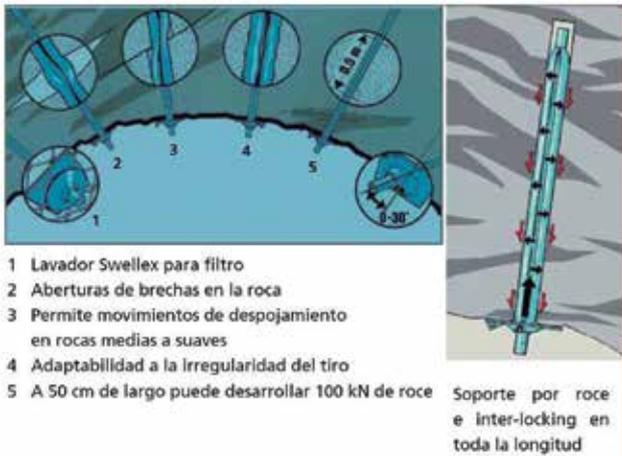


Fig. 24. Bulón Swellex (Gentileza deAtlas Copco)
 Fig. 25. Bulón autopercorante (Gentileza Ischebeck-Titan)

ya pasa a ser alternativa del hormigón con encofrado). Se ha desarrollado enormemente, gracias a la versatilidad de su puesta en obra. Al principio era necesario colocar un mallazo (o dos) sujeto a la superficie de la roca con pequeños pernos, a fin de que el elemento proyectado se “quedara” y cumpliera su función. Hoy incorpora fibras metálicas y fibras sintéticas, bien para resistir “ciertas” flexiones, bien para protegerlas del fuego (retrasar su acción). Existe una amplia discusión sobre el uso de estas fibras, pero debe tenerse en cuenta la proporción con que se aportan y, sobre todo, que la deformabilidad de las sintéticas es varias veces superior que la de las metálicas, por lo que su “entrada en carga” es mucho más lenta, en general. En la (fig. 26) puede verse un momento del “gunitado” de un avance, efectuado con robot, para mantener al operario lejos del terreno descubierto. Con este sistema – el NATM – se han realizado en España importantes túneles, como los de El Negrón, El Padrún, los de Niévares y Brañanueva, el tercer túnel carretero de Guadarrama, los de la L.A.V. Madrid-Barcelona, los de la Y vasca (en construcción), algunos de la L.A.V. Zamora-Orense (el de Prado, etc.) y otros muchos a lo largo del subsuelo español.

- Inyecciones por tobera, de lechada de cemento (con 3-4 % de bentonita), del tipo agua-reactivas, de bicomponentes orgánicos, etc. Estos son elementos auxiliares para realizar “prebóvedas” antes de excavar, tratar juntas con problemas de impermeabilización (agua-reactivas), mejorar terrenos inestables, etc. Estos elementos constituyen un auxilio a todo el sistema de excavación y sostenimiento, tanto en túneles excavados con métodos convencionales (MTM, NATM, etc.) como con tuneladoras. En la fig. 27 se muestran algunos tipos de tratamientos del terreno

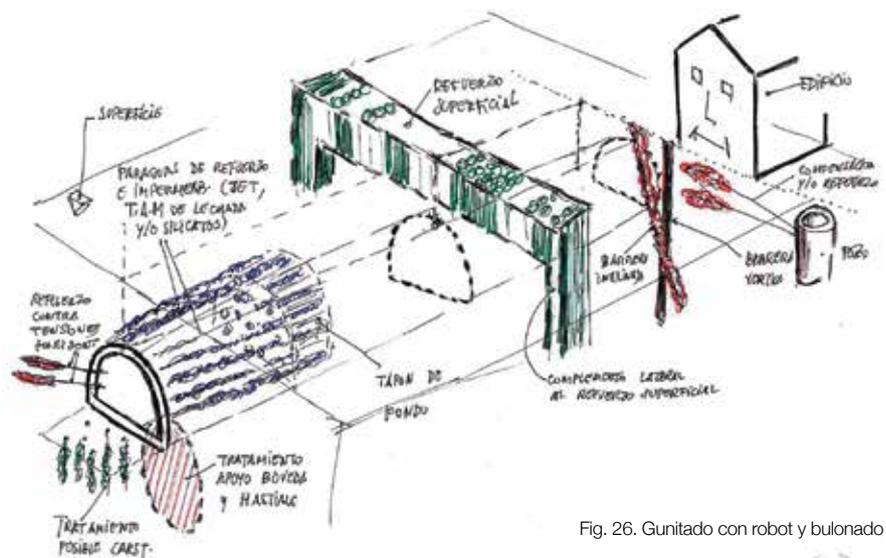


Fig. 26. Gunitado con robot y bulonado
 Fig. 27. Algunos tipos de tratamientos de terreno y de protección de edificios

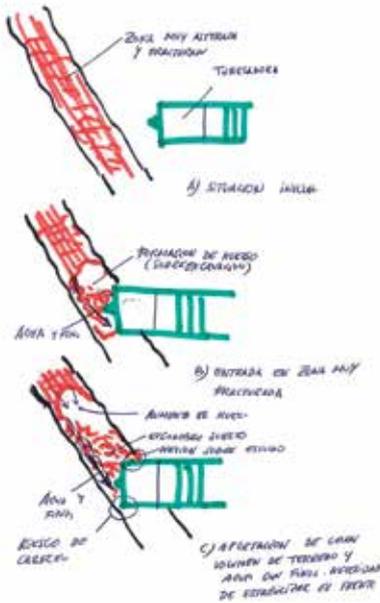


Fig. 28. Inestabilidad en zona de pizarras laminadas

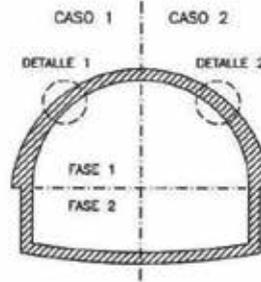


Fig. 29. NATM y Método Bernold

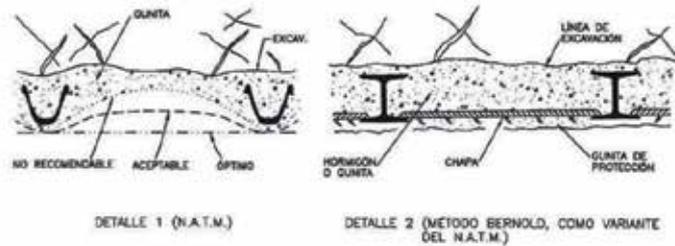


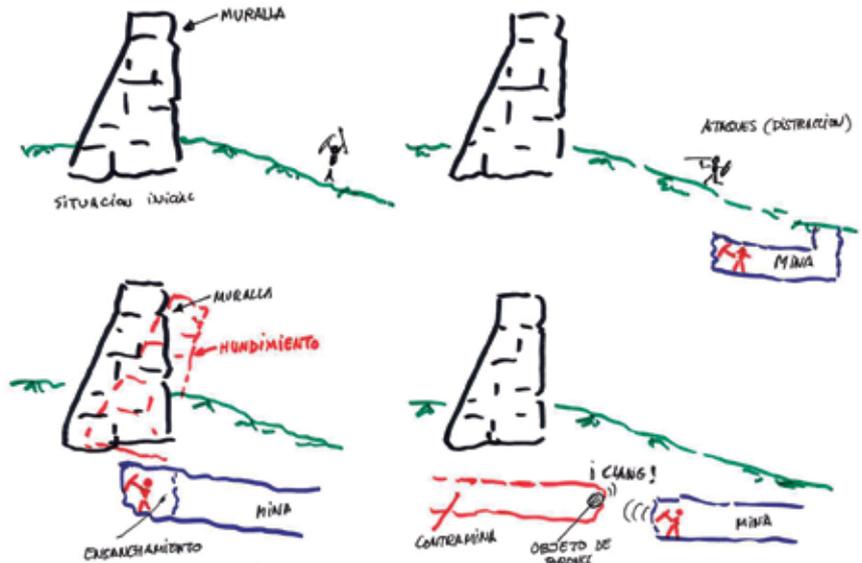
Fig. 30. Derrumbe de murallas con minados y contramina

con inyecciones de lechada y mortero, a fin de mejorar la estabilidad del terreno, reducir su deformabilidad, impedir su arrastre, etc. En este último caso, al atravesar terrenos muy tectonizados (como las pizarras laminadas, con ampelitas, del túnel de Bolaños), se creaban cavernas por sobreexcavación (con posible arrastre de finos por agua) delante de una tuneladora. Ese problema (como en otros casos en arenas en Madrid o en unas areniscas poco cementadas, cretácicas, en los túneles de Guadarrama) se ha ido resolviendo inyectando con lanzas (a una presión del orden de 50-70 bares) el frente y la bóveda del hueco formado por sobreexcavación, aportando una resina orgánica bicomponente (fig. 28), la cual da “cohesión” al material cosido.

- Otros medios auxiliares, como la chapa Lagin y la tipo Bernold, a colocar entre cerchas metálicas para reforzar el sostenimiento, servir de encofrado para un sostenimiento de hormigón (Método Bernold) o para zonas con huecos que se van a rellenar en el trasdós del túnel, etc. (fig. 29).

4 Los túneles “guerreros”

La utilización de túneles, galerías o minas, de tamaño limitado (2x1,5-2,2 m) en misiones relacionadas con la guerra fue, durante los últimos veinte siglos, casi una constante.



Los recintos amurallados se apoyaban, generalmente de forma continua, a poca distancia de la superficie, a través de mampuestos de fábrica, con una anchura bastante similar a la del muro que cimentaban, como ha sucedido –durante siglos– con los muros de carga que conformaban las edificaciones. Esta escasa penetración del cimientó (la suficiente para tener el muro estable bajo cargas verticales), hacia sensible a estos muros de carga frente acciones horizontales y asimétricas (léase excavaciones próximas).

Por ello la idea era construir una galería, desde el exterior del recinto amurallado (o

sea, del lado de los sitiadores), de forma que se creara un “hueco” hacia el borde del recinto, creando una zona “blanda”, débil y sensible al vuelco de la estructura, al estar solo semiapoyada (fig. 30). Ello podía originar el hundimiento de la misma, para lo que al llegar la galería a esa zona se bifurcaba en otras dos perpendiculares, para afectar al muro en una zona suficientemente extensa que provocara la ruina de la defensa.

Contra este ataque subterráneo, desde el interior del recinto cercado, podía realizarse alguna otra galería – o contramina – de defensa. Esta galería, estrecha y no

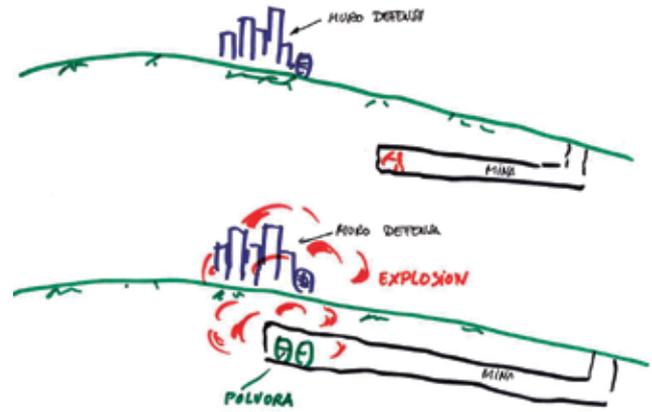
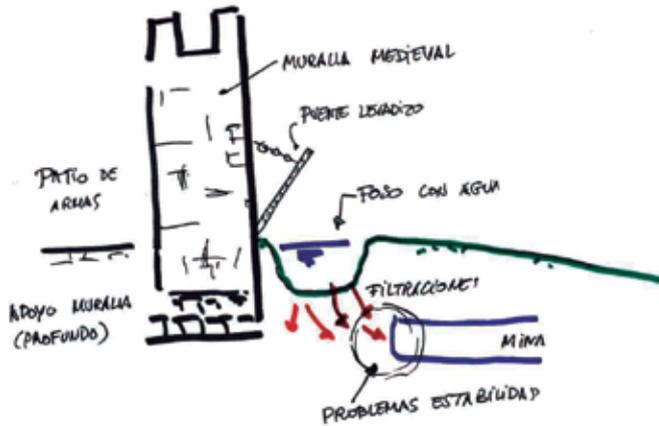


Fig. 31. Disminución del riesgo de minado por existencia de foso y apoyo profundo de muralla medievales

Fig. 32. Eliminación de defensas con minados y voladura

ampliada, se situaba bajo el muro o un poco más allá, disponiendo en su frente algún dispositivo sensible a las vibraciones que podía originar la excavación de la mina de ataque. Este elemento podía ser un escudo de bronce colgado de la bóveda de la contra mina. Así podía situarse la mina de ataque, la cual podía ser atacada, cuando no se esperaban, o inundar de agua, a través de la contra mina (fig. 30).

Más adelante, surgió el foso lleno de agua que rodeaba el castillo, con doble misión:

a) Dificultar el acceso de los atacantes a las paredes de la defensa.

b) Obligar a que las minas de ataque fueran más profundas y que tuvieran, encima, un terreno blando y con agua, lo que no iba muy bien con la perforación de las minas de ataque (fig. 31). Ello obligó a profundizar la cimentación de las defensas, ya que tenían que apoyarse por debajo del foso, lo que las hacía más estables y menos sensibles al vuelco (fig. 31)

La ayuda de taladradoras manuales en zonas duras permitió, en su momento, utilizar la pólvora en la Alta Edad Media. En España, concretamente, los almohades utilizaron por primera vez la pólvora en la defensa de la ciudad de Niebla ("La Roja", en Huelva), contra Alfonso X, El Sabio, el Rey castellano que reconquistó prácticamente toda la zona de Huelva, Cádiz y parte de Málaga. Poco a poco se extiende el uso de la pólvora en las "guerras" y pasa a ser utilizada en la construcción de alguna galería, con intenciones militares. Así, la galería podía llegar a la zona de cimentación de las defensas del enemigo y, juntando



Fig. 33. Túneles de Cu Chi. Se localizan en Vietnam, cerca de la actual Ho-Chi-Minh, (Tomada de Internet)

barriles de pólvora en el extremo de la galería, se pretendía hundir los cimientos de esas defensas. Existen algunos ejemplos en Italia durante El Renacimiento (fig. 32).

En algún caso especial, la galería subterránea se hizo después de tomar la instalación amurallada. Así sucedió en 1522 en el Castillo de Amair. Las tropas de Carlos I, después de rendir la fortaleza con artillería, demolieron la misma, perforando más galerías por debajo, colocando barriles de pólvora en su fondo y haciendo volar la fortaleza. Hoy un obelisco recuerda la existencia del Castillo, en el Baztán.

Esta idea o "solución explosiva" se ha ido utilizando, con mayor o menor intensidad hasta prácticamente nuestros días, en labores de cercos militares. En la Indochina Francesa, en Vietnam, se usó esta técnica para "volar recintos defensivos" (ya con dinamita) y, después, el Vietcong usó la técnica de los túneles para infiltrarse tras las líneas norteamericanas, primero y tras las líneas chinas, en la posterior guerra Vietnam-China. La han descrito diversas novelas con esta historia de enfrentamientos personales dentro de esas galerías, con soldados ("ratas") arrastrándose por las galerías, con armamento muy ligero. Los más famosos son los túneles de



Fig. 34. Túneles de Gaza

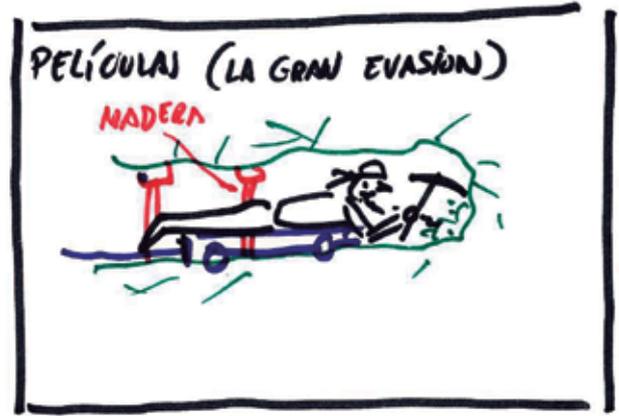


Fig. 35. Construcción de túnel para evadirse de un campo de prisioneros

Cu Chi (fig. 33) de 200 Km de longitud, con niveles subterráneos a 6, 10 y 15 m de profundidad, situados a unos 40 Km de la actual Ho-Chi-Minh, (antes Saigón). Hoy son una atracción turística (fig. 33). Con posterioridad esta técnica fue utilizada por el ejército soviético en Afganistán, en los antiguos túneles empleados para transportar agua (denominados “kariz” y usados por los muyahidines) y por las “comadreja” israelitas, reconociendo (como se ve en la fig. 34) los túneles que los palestinos excavan en Gaza.

Por supuesto, el uso militar del mundo subterráneo se ha ido ampliando en el sentido de realizar algún “túnel secreto” de acceso a refugios para personal dirigente de naciones (refugios hasta antia-tómicos) o para almacenar, en cavernas, elementos de alto costo (aviones, por ejemplo), que se conservan fuera del alcance de posibles bombardeos o atentados terroristas. En España hay experiencias – alguna inconclusa, a falta de la caverna – en este sentido. Por cierto, en una ocasión en que el autor de estas líneas tuvo que visitar un túnel “secreto”, acabó preguntando “tímidamente” por la zona y le contaron: “¡Ah, dice usted el túnel secreto ese!”

La Guerra Civil española (1936-39) generó la construcción de galerías en Madrid para refugio contra posibles bombardeos. Estas galerías, excavadas en “arena tosca” y “tosco”, solían tener del orden de 2x1,5 m y conducían a cámaras de 5x6 m (en general) que servían de verdadero refugio antiaéreo, almacenamiento de munición, etc. En general, estas galerías están por debajo de cerros en que se instalaban baterías antiaéreas. Hemos encontrado estas galerías bajo el Cerro de San Blas (donde está el CEDEX y el Instituto Isabel La Católica), en la zona de

Tetuán, etc. Hoy día, algún edificio nuevo con sótanos, ha construido sus zapatas, inmediatamente encima de alguna de estas galerías.

A estos “túneles guerreros” podemos añadir los utilizados para “fugas” de campos de concentración, como el de la película “La Gran Evasión” (fig. 35), reflejo de un caso de túnel real, con poco recubrimiento (con problemas de estabilidad) y nombre de personaje de Walt Disney y el que, recientemente (2015), ha salido en la prensa por haber sido utilizado por un preso influyente para evadirse de la cárcel de El Altiplano (Méjico). Este último caso resulta interesante por el tamaño de la sección del túnel (1,7 m de ancho) y su longitud (1500 m), al haber permitido la fuga con motocicleta. No sabemos cómo se construyó, dónde se vertieron los escombros (había carriles en el túnel para su extracción), etc. Probablemente era una galería existente a la que se conectó con otra corta (pozo de 10 m de profundidad) desde el desagüe de la ducha de la celda del preso. La primera noticia fue que el túnel final el preso lo recorrió en moto (fig. 36), aunque probablemente no sea verdad.

5 Métodos auxiliares de excavación

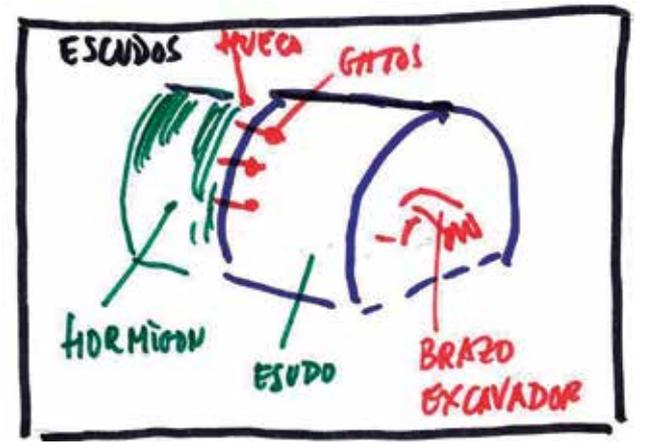
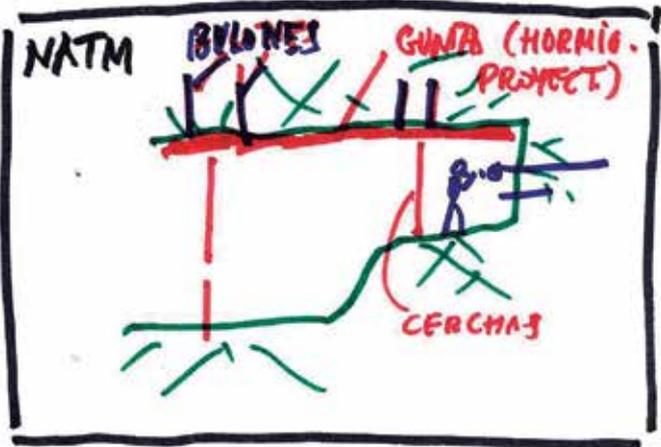
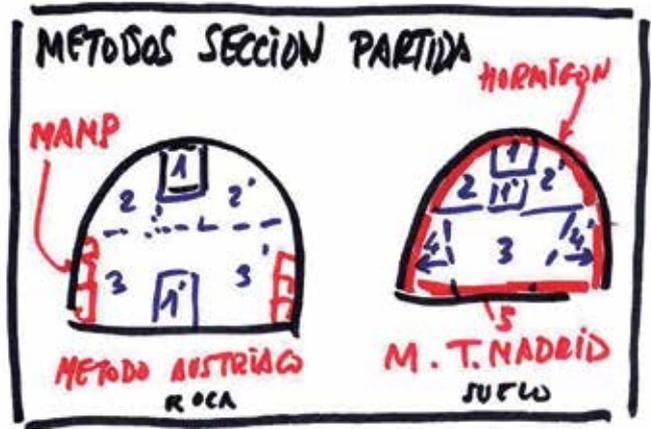
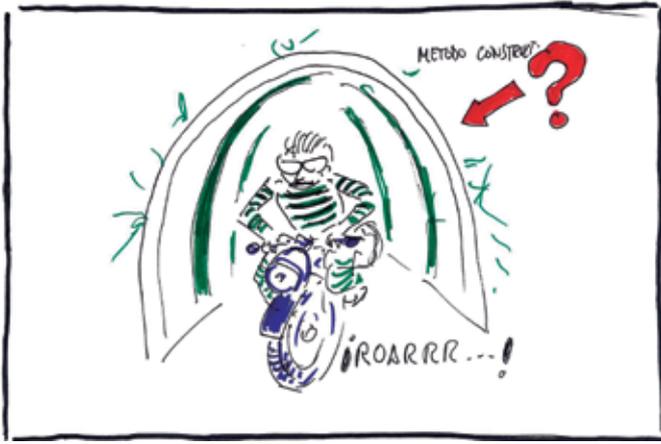
Los medios para excavar túneles sí que han sufrido una importantísima evolución en los últimos 150 años.

En el Cuadro 4 se resumen los más importantes, en orden histórico de aparición:

- Sistemas sencillos como el pico, pala, martillo neumático, etc., más cinta de

transporte y/o carretilla, utilizados en los sistemas de sección partida (fig. 37) que pueden llegar a necesitar retroexcavadora, pala, etc., como en el NATM (fig. 38).

- Los escudos en suelos a sección parcial, como el de Brunel ya citado, cuya misión es doble: Intentar estabilizar el frente de ataque, al partirlo en secciones pequeñas (pero que acaba abriéndose a sección total), y proteger a los operarios de las inestabilidades por encima de su cabeza. Estos escudos fueron evolucionando hacia la sección en herradura, bien excavada en dos fases (avance en bóveda y destroza inferior), bien a sección plena. El escudo, así, tiene un espacio libre amplio y puede utilizar un brazo excavador (fig. 39) o retroexcavador, que opera dentro del escudo. Este se apoya en el revestimiento (hormigón “in situ”) mediante gatos hidráulicos, que permiten hacer avanzar el escudo metálico de protección, poco a poco. En la fig. 40 puede verse un escudo de este tipo, en que la protección metálica está dividida en “lanzas”, en cada una de las cuales actúa uno o dos gatos hidráulicos, resultando, así, más fácil el avance de la protección, que puede adaptarse al de la excavación. Estos escudos, usados en España en algunas obras de Metro, en la Línea de cercanías C-5, etc., han dado un resultado variable: Tienen a cabecear en su parte frontal, dejan huecos en el trasdós del revestimiento, tienen el frente abierto,... Ello ha dado lugar a que, en obras que el autor de estas páginas ha intervenido, se hayan abandonado escudos de este tipo cuando han surgido problemas de empujes excesivos, inestabilidad de frente, desvíos, etc., como en la C-5 de Madrid (Avenida Carpetana) y ferrocarril a Alcobendas, continuando el túnel con el Método Tradicional de Madrid.



1º)	Métodos manuales: pico, pala, martillo neumático, retro y pala cargadora
2º)	Escudos en suelos □ protección + frente abierto (sección parcial)
3º)	Escudos en suelos □ protección + frente abierto (sección completa)
4º)	Escudos circulares
4.1) suelos	
• Hidroescudos	Revest. Prefabricado
• EPB	
• Mixtos	
4.2) rocas	
• Rozadoras	
• Escudos cerrados pero posterior zona abierta	
• Escudos cerrados con revest. Prefabricado	
• Dobles escudos	

Cuadro 4. Otros elementos auxiliares de excavación (orden histórico)



Fig. 36. ¿Fuga de presidiario?

Fig. 37

Fig. 38

Fig. 39

Fig. 40. Foto de un Escudo de lanzas

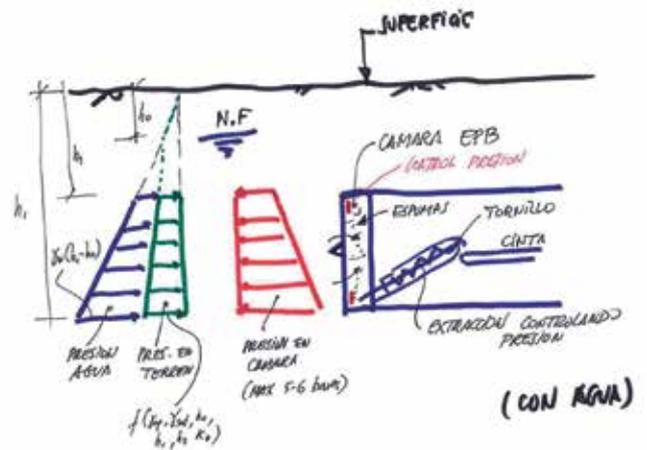
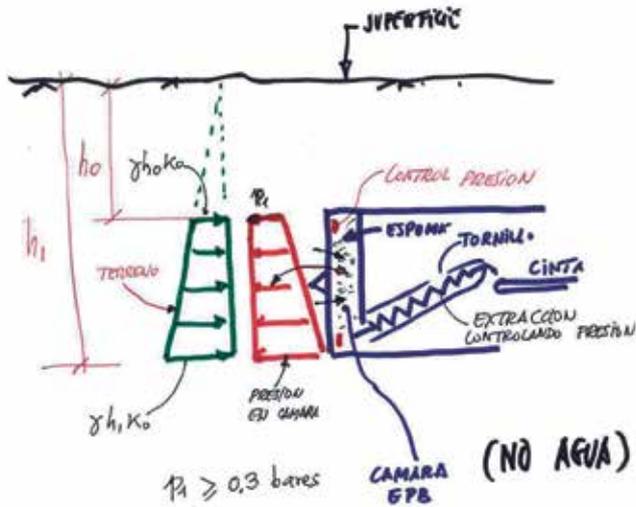
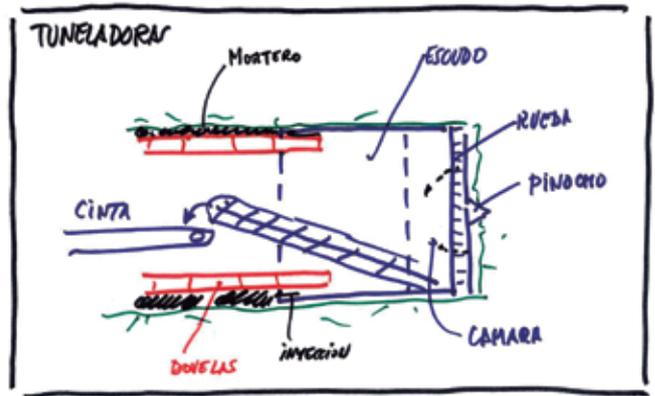
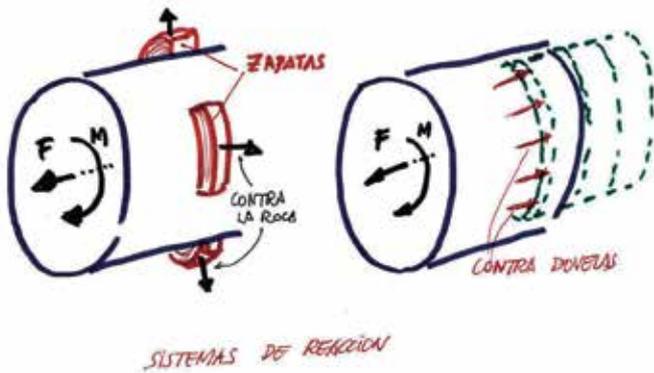


Fig. 41. Sistemas de reacción

Fig. 42. Esquema de tuneladora con cámara frontal

Fig. 43. Tuneladora EPB

Fig. 44. Tuneladora EPB con agua en su frente

- Escudos a sección completa, verdaderas tuneladoras con sección circular, en que el sistema de reacción se consigue con gatos hidráulicos instalados en el escudo contra un revestimiento prefabricado de dovelas (de fundición, en origen, hoy día de hormigón armado con barras o con fibras), que constituyen un anillo que se monta dentro del escudo. El hueco que queda entre anillo y terreno (gap) se inyecta con mortero de cemento especial o con un mortero bicomponente (para hacerlo más impermeable). En la fig. 41 puede verse el sistema de reacción de forma esquemática. Así, puede conseguirse el empuje para avanzar y el par motor necesario para que gire la cabeza al frente de la tuneladora, en la que se instalan picas, cortadores y elementos de gálbo para realizar la excavación del terreno. El escombros puede salir por una cinta que se coloca en el centro de la tuneladora (sistema abierto) o puede introducirse, primero, en una cámara frontal de la máquina en que se dispone un "fluido" para presionar el terreno del

frente de excavación, para evitar que éste se decomprima y se produzcan asientos e inestabilidades. Esta cámara puede incorporar agua con bentonita (hidroescudo, para materiales granulares), con lo que el escombros se mezcla con la bentonita y se extrae por un tornillo de Arquímedes con facilidad. Posteriormente, mediante decantación, se recupera la bentonita en el exterior del túnel. Otra solución es llenar la cámara frontal de polímeros y/o espumas que se mezclan con el terreno excavado, formando un "barro" que se extrae con un tornillo de Arquímedes. Controlando el caudal de éste, se puede conseguir que el material de la cámara alcance la presión deseada (de tipo hidrostático) y, así, presionar el frente, a fin de evitar su decompresión. En la fig. 42 puede verse un esquema del funcionamiento de este tipo de tuneladoras, denominadas E.P.B. (Earth Pressure Balanced o de Presión de Tierras Controlada), mientras que en la fig. 43 y la fig. 44 aparecen los sistemas de equilibrio de presiones. Todos estos escudos o



Fig. 45. Montaje de una tuneladora de doble escudo en los Túneles ferroviarios de Guadarrama

“tuneladoras” son de sección circular y frente cerrado, lo que las hace más útiles. Con tuneladoras de este tipo se han perforado multitud de túneles en España, como los de Guadarrama, Pajares, Abdalajis, Bolaños y unos 250 Km de túneles para el Metro de Madrid, Valencia, Barcelona, Sevilla, etc. En el caso de los hidroescudos, la cámara frontal se llena de un fluido bentonítico para presionar al frente de excavación. La bentonita se recupera, separándola, por decantación, del escombros extraído. Estos hidroescudos son más apropiados para terrenos granulares.

En el caso de excavación en roca pueden distinguirse, esquemáticamente:

- Las rozadoras móviles, con cabeza dotada de picas y cortadores, cuya movilidad permite excavar la sección deseada, muy utilizadas en el caso de suelos muy duros y rocas blandas.

- Los escudos cerrados, con cabeza frontal de sección circular, con picas y cortadores, que consiguen la reacción mediante “grippers” o zapatas radiales que lleva el escudo y que permiten –por presión– anclar el escudo a la roca (fig. 41) mientras se realiza la excavación. Estas TBM (Tunnel Boring Machine) van abiertas a continuación del escudo, en una zona en que ya se pueden instalar bulones (y, a veces, gunitar las paredes del túnel excavado), viniendo –seguidamente– la cola del escudo con los motores hidráulicos o eléctricos, instalaciones auxiliares, etc.

- Escudos cerrados con revestimiento prefabricado, cuya colocación permite conseguir la reacción adecuada para la excavación, dejando, además, el sostenimiento del túnel instalado. En España (Variante de Camarillas, Gijón, etc.) se han utilizado tuneladoras de este tipo para excavar túneles en roca de resistencia media (calizas y margas).

- Escudos mixtos, que incorporan un doble escudo para poder avanzar con el sistema de “rippers” en roca dura (granito, gneis, etc.) y con el sistema de gatos hidráulicos y anillos de dovelas prefabricados en margas, arcillas, arenisca descompuesta, etc. Puede, así, excavar en un túnel con fuerte variación en las propiedades mecánicas del terreno. Su uso fue un total éxito en las cuatro tuneladoras utilizadas para excavar los dos túneles ferroviarios de Guadarrama, de 27 Km de longitud cada uno (fig. 45).

6 Túneles a cielo abierto

Estos tipos de túneles suele denominarse como “falsos túneles”, ya que, primero, se hace la excavación, después se construye la estructura del “túnel” (con un encofrado y hormigonado “in situ”, con mampuestos o con elementos prefabricados), para –a continuación– enterrar esa estructura (fig. 46). Esta sería la solución que suele denominarse “*cut and cover*”.

Esta solución es muy antigua y ya hemos comentado la existencia del túnel de transporte de víveres y enseres en la Villa de Adriano. Y fue muy utilizada desde la Antigüedad para la construcción de servicios de evacuación de aguas negras (cloacas romanas), abastecimiento de agua próximo a estructuras especiales o viviendas.

Su desarrollo fue muy importante al iniciarse la construcción masiva de líneas del Metro (Londres, Nueva York, Madrid...). Se trata de construir líneas ferroviarias cerca de la superficie (no se concebía, entonces, bajar muchas escaleras para llegar al nivel de circulación), pero cubiertas para que no molestaran al tráfico superficial, tanto peatonal como de vehículos con caballerizas o motor. Así, el Metro de Nueva York, en su parte primitiva está construido a unos pocos metros de profundidad, con sección de excavación rectangular y al abrigo de “muros berlineses”. En ellos, primero, se hincaban perfiles metálicos, para después excavar poco a poco, colocando tabloncillos de madera entre perfiles, para recibir el empuje del terreno y transmitirlo a los perfiles. Ello dio lugar a diversas teorías sobre el empuje de tierras que, después de varios intentos, fueron culminados por las recomendaciones de Peck (1969, Ponencia General en el Congreso Internacional de Mecánica del Suelo de México), lo que conduce, a veces, a empujes de diseño inferiores al clásico empuje activo, aunque mayores en la parte superior

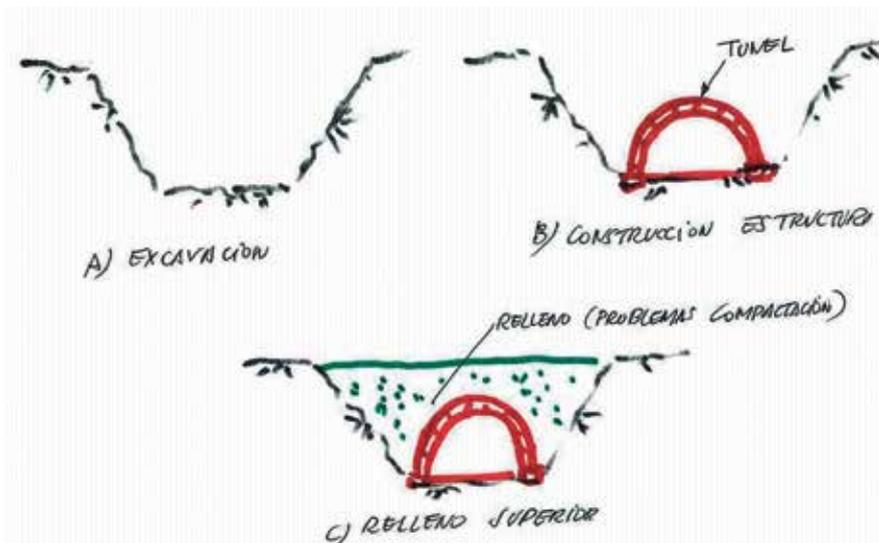


Fig. 46. Túnel a cielo abierto clásico

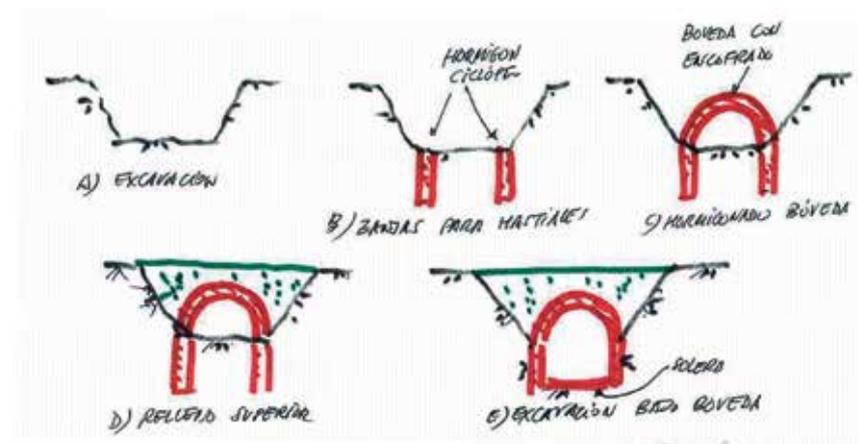


Fig. 47. Túnel a cielo abierto con excavación subterránea bajo bóveda

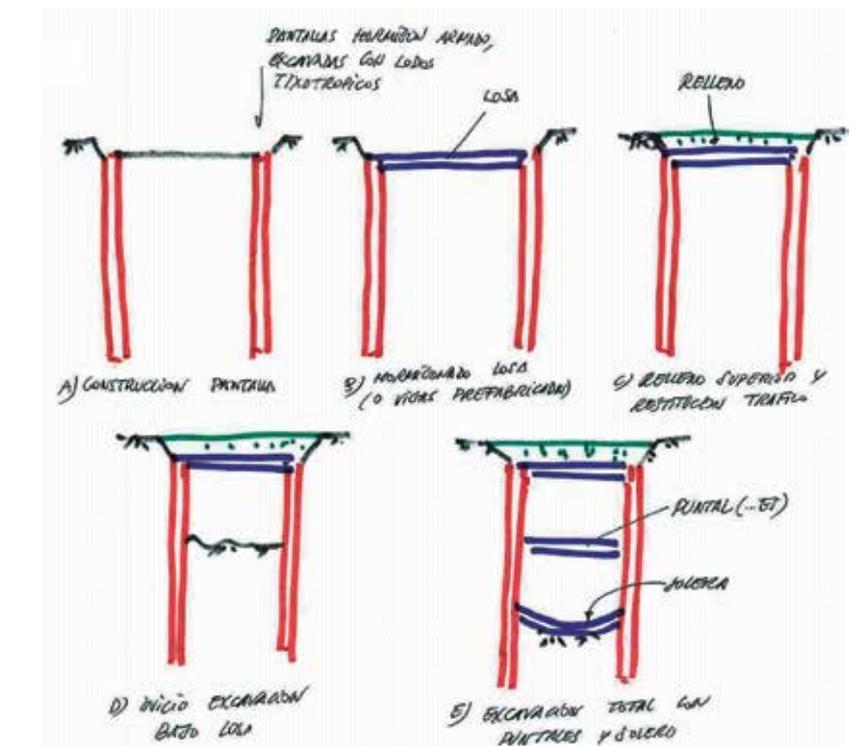


Fig. 48. Método Milán con pantallas

de la excavación (arcillas y limos sobreconsolidados).

En el Metro de Madrid (Línea 1 entre Cuatro Caminos y Gran Vía) se utilizó un procedimiento mixto (fig. 47):

a) Primero se excavaba una amplia zanja hasta la profundidad de apoyo de la futura bóveda.

b) Desde esa zanja se construían otros dos laterales y se rellenaba de hormigón ciclópeo (áridos con diámetros de hasta 8-10 cm), que iban a constituir los hastiales.

c) Se construía la bóveda de hormigón en masa, encofrando desde la base de la excavación de forma que se apoyara en los hastiales ya hormigonados. Este hormigón de la bóveda alcanzaba resistencias medias de 13-15 MPa y era de bastante calidad.

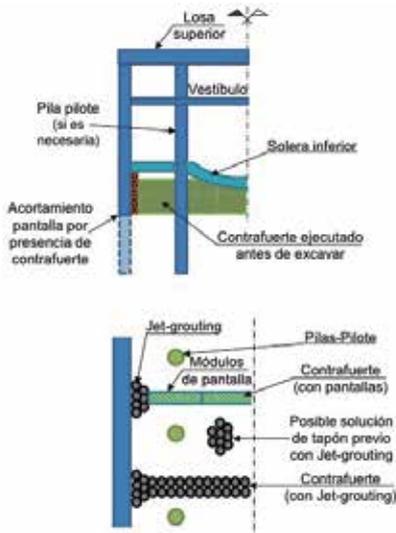
d) Después, se rellenaba la zanja hasta llegar a superficie y restituir el tráfico.

e) Por último se excavaba – ya en subterráneo – por debajo de la bóveda y se construía la solera del túnel.

Este es un procedimiento en que hay un falso túnel, pero también una excavación subterránea. La superficie quedaba a 1,5-2,0 m sobre la bóveda (fig. 47). Con el tiempo, se han ido produciendo algunos problemas, ya que al no compactar bien el relleno de la zanja, el agua penetraba en la antigua excavación y alteraba el hormigón ciclópeo de los hastiales. En algunos túneles ha habido que reforzar dichos hastiales con mallazo y gunita.

También se utilizó una solución similar a la de la fig. 46 en el caso del “Túnel de la Risa” del Paseo de la Castellana de Madrid (Ferrocarril de Cercanías).

Pero, más modernamente, se ha acudido a la solución de túnel a cielo abierto al abrigo de pantallas continuas (o discontinuas) de hormigón armado, lo que, a veces, se conoce como “Método Milán”, ya que en esta obra se empleó (al parecer, por primera vez) de forma masiva. Es una solución muy extendida por todo el mundo (Madrid, Barcelona, Valencia, Sevilla, Granada, Málaga, Singapur, Ho-Chi-Min,



Buenos Aires, etc.). La metodología queda resumida en la figura 48:

1º) Se construyen las pantallas desde superficie (e incluso, además, pilas-pilotes, si la excavación va a ser de mucha luz, como en estaciones de Metro o aparcamientos subterráneos).

2º) Se hormigona la losa superior, lo que permite apuntalar las pantallas en cabeza y, además, restituir el tráfico superficial.

3º) Se excava por debajo de la losa y se van colocando puntales o anclajes, acodando las pantallas, según se vaya necesitando su presencia, hasta llegar a la solera inferior.

A veces, si el agua está cerca de la superficie y el terreno es muy blando, puede necesitarse el hacer "puntales previos", antes de excavar y, por debajo de la solera inferior, mediante jet-grouting, inyecciones, módulos de pantalla, etc. (fig. 49) Hoy día, el uso de pantallas continuas (o discontinuas con pilotes "tangentes", si no hay agua, o con pilotes "secantes", si no se excava a mucha profundidad) está muy extendido para obras subterráneas en ámbito urbano: Estaciones de Metro y Autobús, aparcamientos subterráneos, Museos, etc., túneles para ferrocarril o para vehículos automotores (como Calle 30 de Madrid, fig. 50 y fig. 51, o el Bulevar periférico de París).

En este caso hay que cuidar la ejecución de juntas, sobre todo si hay agua, los recubrimientos de armaduras, el evitar los "tecleos" de los paneles de pantallas, etc. En la fig. 52 se indican algunos posibles problemas en este tipo de obras,

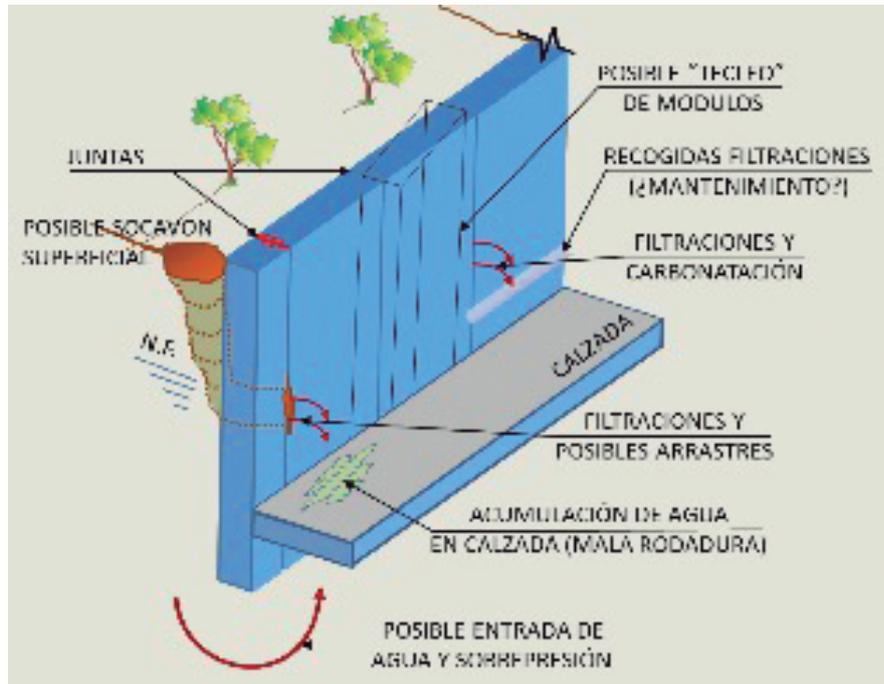
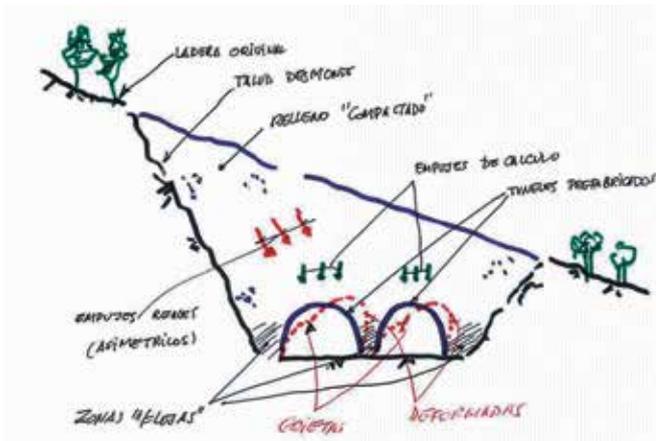


Fig. 49. Solución de contrafuertes previos a la excavación

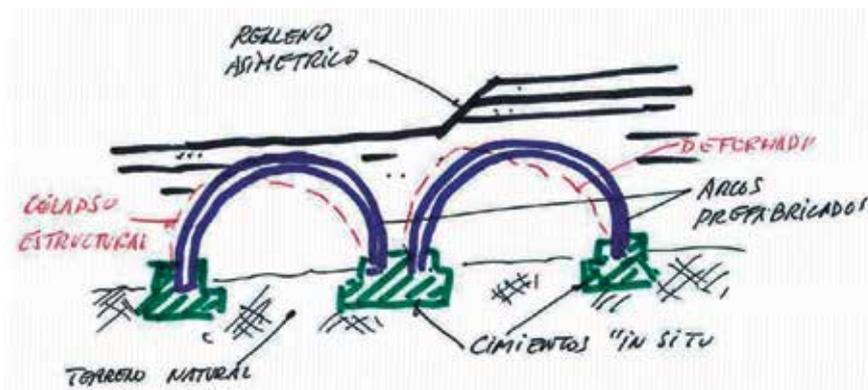
Fig. 50. Los túneles de Calle 30

Fig. 51. Detalles de los túneles de Calle 30 de Madrid

Fig. 52. Algunos posibles defectos en pantallas continuas



a) Túneles paralelos artificiales deformados por empujes asimétricos



b) Colapsos de túneles artificiales por diferencia de cota en el relleno

Fig. 53. Colapso de túneles artificiales por empujes asimétricos

Es pronto para cantar victoria y pensar que todo está resuelto. Es cierto que:

- Con las tuneladoras la seguridad de los operarios es claramente mayor. Aunque puede haber accidentes imprevistos (golpes, resbalones, etc.) que no son provocados por la inestabilidad del terreno.

- Con tuneladoras, la seguridad en la clave del túnel parece asegurada y también en el frente.

- Si las tuneladoras están bien diseñadas, de cara al terreno que deben atravesar (incluyendo anomalías), los rendimientos pueden ser elevados: 40-50 m/día.

- La repercusión en instalaciones y edificios – en el caso urbano – pueden ser, cada vez, menores, etc.

Pero todo ello supone una adaptación al medio que no siempre se produce. El terreno todavía tiene su última palabra y pueden producirse problemas:

- Inestabilidades dorsales, cuando se presentan capas en clave con poca o ninguna cohesión (lo que suele ir asociado a un contenido de finos menor del 15 %), que lleva a sobreexcavaciones y formación de huecos, con la posibilidad de originar socavones sobre el túnel, al avanzar la excavación (fig. 54). En el Sudeste de Madrid y en Metronorte se han tenido problemas de este tipo en la Ampliación del Metro.

- Inestabilidades frontales en casos de rellenos antrópicos y/o con recubrimientos pequeños (medio diámetro en terrenos blandos, por ejemplo), sobre clave (Parque del Conde Orgaz, Línea 4 del Metro).

- Falta de capacidad portante del terreno que circunda la tuneladora cuando ésta se apoya en grippers, lo que impide conseguir la reacción necesaria (incluso, a veces, no pueden retraerse los grippers). Esto sucedió en los túneles ferroviarios de Guadarrama, al iniciar las excavaciones, como si el terreno fuera una roca competente. Se trataba de unos "metasedimentos" muy fracturados (y con poco recubrimiento) y se produjo un socavón. Afortunadamente, una vez arreglado el problema puntual, las tuneladoras eran del tipo de doble escudo y pudo seguirse la excavación apoyándose en las dovelas con gatos hidráulicos, como si el terreno fuera un suelo. Sin embargo, en el Túnel de San

que no siempre "cantan" nada más hacer la excavación. En el ferrocarril Málaga-Fuengirola, alguna junta falló diez años después de inaugurar la obra, penetrando 60 m³ de terreno y agua en el túnel (Calle Cuarteles, cerca de la Estación María Zambrano).

En estos túneles artificiales (estructura + relleno de tierras) pueden producirse problemas importantes, si el relleno es asimétrico, puesto que se generan empujes inclinados que –a veces– no se tienen en cuenta en el diseño de la estructura que quedará enterrado (fig. 53a). O bien el relleno se hace por tongadas asimétricas (como en el caso de doble bóveda), con lo que también se origina una asimetría de esfuerzos (fig. 53b).

Además, en alguna ocasión que conocemos, el diseñador de la estructura confunde la densidad seca aparente del relleno (del orden de 16 KN/m³) con la que produce el empuje del terreno (que viene a ser la densidad saturada aparente, del orden de 20 KN/m³, cuando el relleno se carga de agua). En este últi-

mo caso se viene a superar el coeficiente de seguridad a flexión y se producen también importantes problemas.

7 Recapitulación

En los capítulos anteriores hemos pasado una breve revisión de la historia de la lucha del hombre por el dominio del espacio subterráneo, de la batalla por el túnel, sin incluir la minería. Con lo expuesto parece que la batalla la ha ganado la Humanidad a la Naturaleza, empezando por pozos y galerías cortas, de dimensiones reducidas (generalmente para conducción de agua, impidiendo su evaporación y filtración) hasta llegar a los grandes túneles (de 18-22 m de diámetro aparente), dedicados al transporte de vehículos y que pueden –o no– construirse con tuneladoras, de sección circular y frente cerrado.

Con esto último parece que se cierra el círculo. Pero no es exactamente verdad.

Pedro (entre Madrid y Guadarrama), con un terreno muy fracturado (fig. 55), al no utilizarse tuneladoras de doble escudo, hubo que abandonar la coraza del escudo y seguir la excavación por el Nuevo Método Austriaco.

- Más de una vez se ha dado una situación de este tipo, como sucedió (por otros motivos) en el Colector de Fabra y Puig (Barcelona, probablemente la primera obra ejecutada con tuneladora en España). En Canadá y otros países hay varios ejemplos de fracasos similares.

- Presencia de zonas falladas o de roca muy alterada en el frente de tuneladora, lo que lleva a grandes sobreexcavaciones (150-300 %), lo que obliga a la utilización de resinas bicomponentes para estabilizar el hueco generado (fig. 28).

Es decir que no siempre todo se soluciona con una tuneladora. Lo primero, tiene que estar adecuadamente diseñada. En el Metro de Sevilla, sufrimos los efectos de un inadecuado diseño del sistema de corte, no sólo por los rendimientos y los desgastes al atravesar elementos de hormigón, sino por los asentos que llegaron a inducir (hasta unos 14 cm sobre clave). Además los detalles deben cuidarse, como el tipo de mortero que se inyecta para rellenar el "gap", terrendovelas, la situación de los puntos de inyección de este mortero, la inyección de bentonita en el contacto escudo-terreno, situación de los elementos de corte y su soporte, % de huecos de la cabeza cortadora, par motor y empujes máximos disponibles, etc.

Además, no debe olvidarse que para usar una tuneladora la longitud de excavación debe ser importante (algunos kilómetros) tanto porque el equipo puede ocupar una longitud importante (200-250 m), como por el gasto de su amortización.

Quedan por hacer muchos túneles "cortos" (docenas y cientos de metros) que no podrán excavar con tuneladoras, lo que supone el utilizar medios más convencionales y de menor capitalización: Sistemas de sección partida, NATM, Método Bernold, túneles a cielo abierto, etc.

Por eso, a continuación incluimos una serie de comentarios adicionales, como guía para el técnico inquieto por el tema de túneles:

- ¿Cuál es el mayor problema al construir un túnel? Sostener frente y bóveda, ya

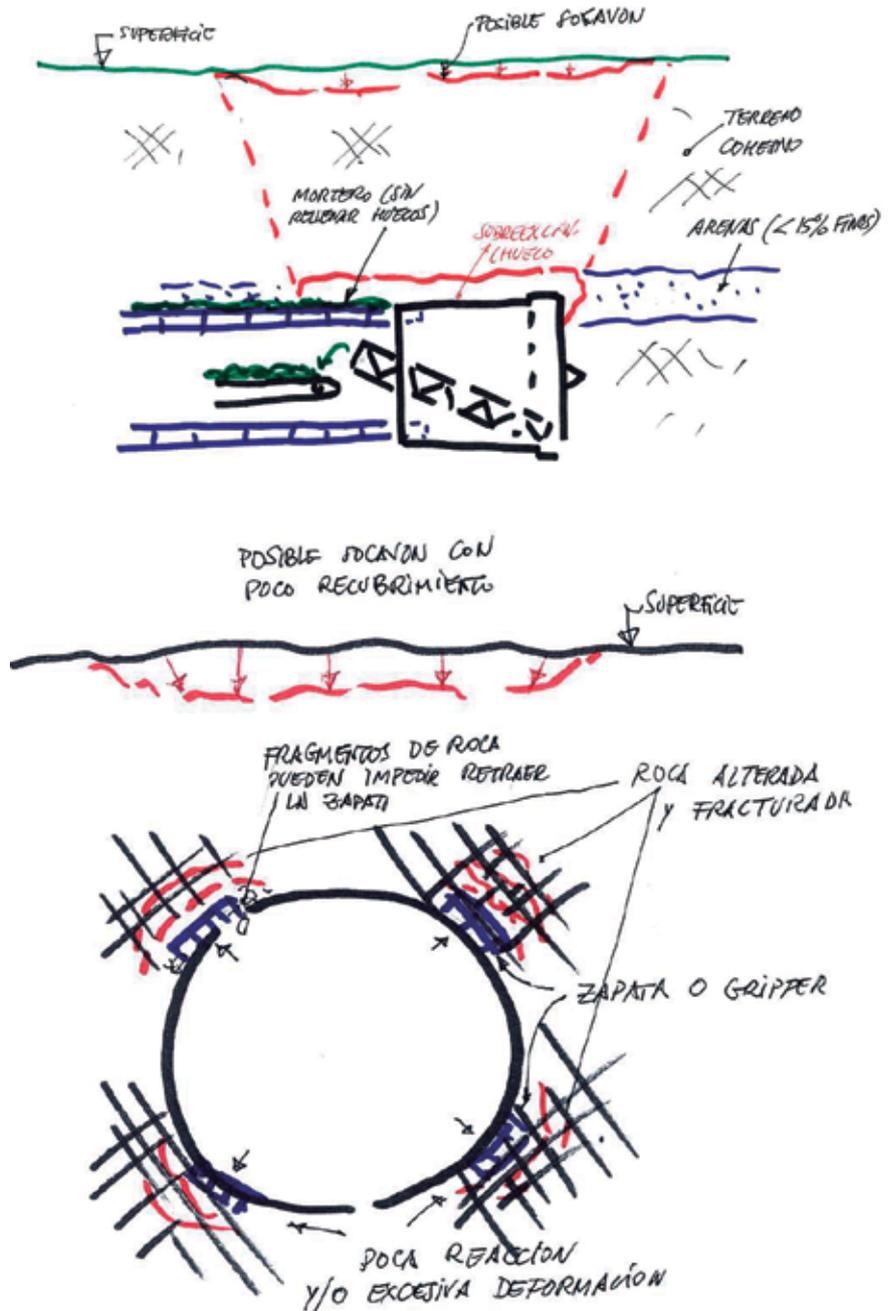


Fig. 54. Inestabilidad dorsal

Fig. 55. Problemas con los grippers en materiales muy fracturados

que ambas zonas van prácticamente, a efectos resistentes, unidas. Sin embargo, en muchos métodos constructivos se le da más importancia a la bóveda, puesto que su excavación supone una gran decompresión (realmente, extensión) del terreno sobre ella, mientras que la excavación del frente supone una decompresión principalmente en horizontal, lo que parece menos importante.

- Por esas razones, el diseño del sostenimiento / revestimiento de un túnel (en la primera mitad del siglo XX) se consideraba como la definición de un arco apoyado en el terreno, sometido a cargas verticales, mayores cuanto peor fuera la calidad del terreno (es decir, su cohesión aparente). El apoyo del arco (que se haría en los hastiales) se representaba como un “empotramiento” y no se tenía en cuenta lo que pasaba en hastiales.

- Sin embargo, ya en el siglo XIX, en el Método Austriaco usado en Los Alpes, se tienen en cuenta bóveda y frente, excavando a sección partida (de pocos metros cuadrados de superficie en el frente) y sosteniendo inmediatamente la bóveda con madera. A veces se entablillaba el frente, como se hace hoy día en el Método Tradicional de Madrid, cuando el terreno es arenoso y/o con agua.

- Ya en la segunda mitad del siglo XX, se tiene en cuenta la sección entera de excavación, con empujes verticales y horizontales, bien preestablecidos (a partir de la calidad del terreno) o bien deducidos desde unos valores prefijados pero teniendo en cuenta la interacción terreno-revestimiento, o sea la deformabilidad del conjunto que hace llegar a unos empujes finales distintos de los iniciales. Para esto último ya se necesitan códigos numéricos, desde muy sencillos (en que la interacción se define a través de muelles sujetos al revestimiento) a más complejos de elementos finitos o diferencias finitas, en 2D y 3D.

- Como acabamos de indicar es la resistencia al corte del terreno la que va a intervenir decisivamente en la estabilidad de la excavación y en el valor de los empujes del terreno. Y, sobre todo, la cohesión aparente del terreno. El valor inicial de la cohesión del terreno intacto se ve afectada por la propia excavación, ya que la decompresión (hastiales), extensión (bóveda) y descarga (solera) afectan a la estructura del terreno y hacen disminuir (algo o mucho) esa cohesión aparente. O sea, afecta a ese

grado de cementación en arenas preconsolidadas (generalmente, terciarias), esa resistencia al corte en fisuras de roca, al abrir algo dichas fisuras o alterar la estructura continua de una roca fracturada y sometida a tensiones internas importantes, al pasar esa roca a un estado semicontinuo o de cuarteamiento de su masa, etc.

- En el pasado hemos desarrollado modelos básicos de comportamiento de la roca al ser excavada con tuneladoras, haciendo variar las propiedades deformacionales y resistentes con la distancia de la sección del túnel al frente de excavación. Este es el caso del modelo de la fig. 56, desarrollado para el análisis del comportamiento de la excavación de los túneles ferroviarios de Guadarrama en zonas con fracturación importante y terreno “débiles” (Paso de la Falla de La Umbria). Puede ser criticable la reducción de la cohesión introducida en ese modelo, pero, sin duda, en materiales con índice de calidad de la Roca de Bieniawski del orden de 35 o menos sucede algo similar a lo propuesto en el modelo de la fig. 56. Ello, de otra manera, se introduce en la teoría de líneas características, al hacer la respuesta no lineal.

- En el caso de rocas de calidad media a alta ($RMR > 40-45$), en que se usa con éxito el NATM, es necesario y conveniente –para diseñar el sostenimiento– considerar la reducción de presión que –respecto a la presión inicial del terreno– se produce por la excavación. Los bloques de roca definidos por las diaclasas se mueven hacia el túnel, encajándose unos en otros y liberando la presión inicial, lo que requiere una cierta deformación, que debe controlarse con el sostenimiento de hormigón proyectado, bulones, etc. Esta relajación permite utilizar sostenimientos desde muy ligeros ($RMR > 65-70$) a muy pesados (RMR del orden de 35-40). Para valores de RMR inferiores a 25-30 el comportamiento de la roca viene a ser el de, prácticamente, un suelo y hay que tomar medidas especiales (paraguas de micropilotes, cosido del frente con bulones de fibra de vidrio, reducción de la sección excavada etc.)

- Las formas redondeadas son muy buenas para los revestimientos. Si la presión fuera de tipo hidrostático lo mejor sería una sección circular, lo que es fácil de conseguir, hoy día, con una tuneladora. Pero con excavaciones con otros medios (voladuras, rozadoras, palas retroexcavadoras, etc.) el conseguir

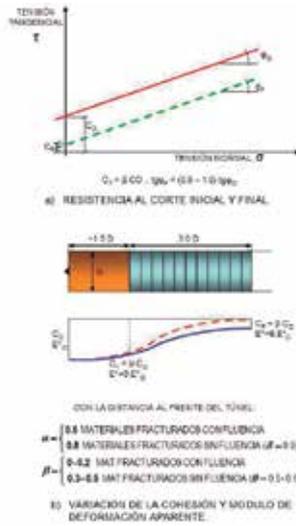
la sección circular no puede hacerse de una sola vez, por lo que hay que llegar a la sección final a través de fases de excavación. Entonces no es tan claro que lo mejor sea redondear (sobretudo, en la parte baja del hastial y extremos de solera) la sección, ya que el revestimiento pasa por fases de trabajo que no corresponden a presiones de tipo radial. Cuanto peor sea el terreno, más problema hay en conseguir, por fases, una sección redondeada, ya que la bóveda ha de transmitir adecuadamente sus cargas al terreno en una de las fases intermedias. Hasta el punto que, en suelos, es mejor llegar a hastiales con apoyo plano y que los empujes que recibe sean, al final, contrarrestados por la solera haciendo de puntal (plana, triangular o curva, según si no hay presión de agua o si la hay).

- En materiales arenosos de poca cohesión (como, por ejemplo, los suelos residuales del granito) las convergencias se producen muy rápidamente, por lo que lo que se mide (instalando referencias después de excavar al avance) sólo es una parte, que puede ser muy pequeña respecto al movimiento de convergencias (horizontal y vertical) total. Eso puede hacer que se avance con confianza, en túneles de anchura importante (más de 15 m), creyendo que la convergencia es de 2-3 cm, cuando – en realidad – es del orden de 4-5 veces mayor y, por lo tanto, muy peligrosa, ya que puede estar en magnitudes de convergencia horizontal del orden del 1 % de la anchura del túnel. Esto lo hemos podido comprobar en algún caso, en que se midieron (desde el exterior, al haber poco recubrimiento) asientos del terreno cerca de la bóveda de 14-15 cm, mientras que las convergencias en el interior del túnel eran de 2-3 cm. Ello, que debería haber servido como alarma, no se interpretó debidamente y el túnel llegó a hundirse (entre otras cosas, por recibir empujes asimétricos que originaban flexiones importantes sobre el sostenimiento de gunita).

- El control de convergencias debe interpretarse debidamente, analizando no sólo la convergencia horizontal sino las medidas respecto a la clave (y el descenso de la clave, que puede medirse topográficamente). En túneles con tensiones internas de fuerte componente horizontal (pizarras fracturadas), hemos medido acortamientos horizontales de 400 mm y se ha podido deducir que la sección se cerraba y se desplazaba hacia un lado, lo que con sólo la convergencia horizontal no puede deducirse.



a) Variación de la deformabilidad y de la cohesión alrededor del túnel



b) Variación de la resistencia

Fig. 56. Posible modelo de variación de la deformabilidad y resistencia al corte para estudio del atrapamiento por efecto de la decompresión y fluencia del terreno

- La instrumentación del terreno y de la estructura de un túnel puede ser muy importante para deducir su comportamiento y el grado de seguridad de la obra, amén de proporcionar nuevos conocimientos y permitir el avance en experiencia a los tuneleros. Así, obras, como la Ampliación del Metro de Madrid 1995-2011 permitieron aumentar los conocimientos en el entorno del terreno de Madrid, deducir nuevas formulaciones para la estimación y previsión de subsidencias superficiales inducidas por excavaciones subterráneas, conocer la existencia de inestabilidades dorsales, establecer reglas para aplicar inyecciones de compensación y de excavación en materiales yesíferos, etc.

Si la obra está bien estudiada, los riesgos debidos a la excavación disminuyen y también lo hace la incertidumbre de conseguir realizar la obra sin apenas problemas. Aunque no por ello hay que dejar de prestar atención al diseño de las estructura finales (revestimientos, pantallas, etc.), a sus deformaciones y repercusiones en estructuras próximas.

Es decir, aún falta para poder decir que la Humanidad ha ganado la Batalla por el Túnel... pero todo se andará. 📧

REFERENCIAS

- BRUNEL, M. J. (1838). "An explanation of the works of tunnel under the Thames". En Traducido y reeditado en 2002 por INTEMAC. Prólogo de J. Calavera. London: W. Warrington.
- GONZÁLEZ TASCÓN, I. (1992). "Ingeniería española en ultramar". Colegio de Ing. de C. C. y P. Colección Ciencias, Humanidades e Ingeniería(nº 42). Madrid.
- JUNCA, J. A. (1990). "El túnel: Historia y Mito, I". Colegio de Ing. de C. C. y P. Colección Ciencias, Humanidades e Ingeniería(nº 34).
- OTEO, C. (2005). "Geotecnia, auscultación y modelos geomecánicos en los túneles ferroviarios de Guadarrama". En Capítulo del Libro "Túneles de Guadarrama" (págs. pp. 189-220). Madrid: Ed. Entorno Gráfico.
- OTEO, C. (2013). "Actuaciones Geotécnicas en construcciones hasta el siglo XIX". En Ingeoter (Vol. nº 14, pág. Capítulo 7). Madrid: Entorno Gráfico.
- SOLESIO, M. T. (1965). "Antecedentes histórico-constructivos de la Villa de Madrid". Instituto Eduardo Torroja. Expediente 4504-I.
- THE BRUNEL MUSEUM. (1961). "The Brunels and their Tunnel Vision". Rotherhithe, London: Railway Av.