

## TEMA 10.- TOPOGRAFÍA DE TÚNELES.

### 10.1.- Introducción.

Los túneles son obras subterráneas destinadas, normalmente, a establecer comunicación a través de un monte, por debajo de un curso de agua o salvando otro tipo de obstáculos, para permitir el transporte, almacenar determinados productos o albergar conducciones.



Fig. 10.1. Túnel de El Serrallo. Granada

La construcción de un túnel suele venir motivada por la configuración topográfica del terreno: en muchas ocasiones resulta más económico perforar un túnel que rodear un determinado obstáculo, lo que obligaría a un trazado de mayor longitud y mayores costes. En el caso de ferrocarriles metropolitanos, se prefiere el transporte subterráneo porque no interfiere con el tráfico de superficie. En otros casos existen razones de tipo estético o sanitario, como en los sistemas de saneamiento y evacuación de aguas residuales. También se construyen túneles para albergar determinadas instalaciones científicas o por motivos defensivos.

Las características de cada túnel dependerán de su función, de la configuración topográfica, del tipo de terrenos a atravesar y del método de excavación elegido:

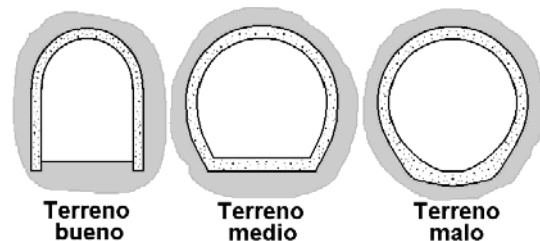


Fig. 10.2. Sección en función del tipo de terreno

- Los métodos de excavación son muy variados. Pueden emplearse máquinas tuneladoras a sección completa, explosivos o excavación en zanja que luego se rellena. La elección del método dependerá de la

naturaleza de los terrenos a atravesar y de los medios económicos de que se disponga.

- El trazado del túnel dependerá de la configuración topográfica y de la función del mismo. Dependiendo de ésta podemos encontrarnos con determinadas limitaciones en el trazado, relativas a la pendiente, al radio de las curvas, etc.
- La sección del túnel dependerá del estudio geológico previo, de la profundidad y de la función del mismo (figura 10.2). Estos factores condicionan, también, el tipo de revestimiento a emplear para que la obra pueda resistir las presiones del terreno.

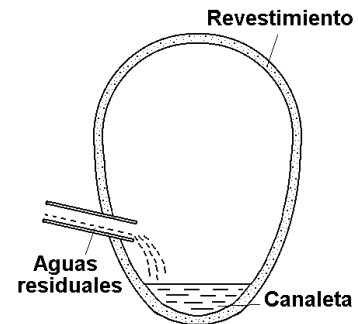


Fig. 10.3. Galería ovoide

Los túneles más sencillos están constituidos por simples tuberías enterradas, generalmente de hormigón. Se excavan en zanja, que se rellena una vez situadas las tuberías.

Otras galerías de saneamiento presentan forma ovoide (figura 10.3). Suelen construirse mediante elementos prefabricados de hormigón y, habitualmente, se excavan en zanja.

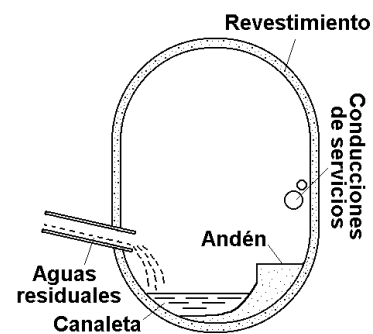


Fig. 10.4. Galería visitable

Las galerías visitables (figura 10.4) tienen un andén que permite el paso de un hombre y además de su función principal (generalmente, redes de saneamiento) permiten instalar conducciones para gas, agua y/o electricidad.

En otros casos se construyen grandes colectores, que recogen las aguas de todo el sistema de tuberías y galerías (figura 10.5). Suelen disponer de doble andén y se aprovechan para instalar conducciones de servicios. En todas estas obras, la pendiente del trazado debe ser compatible con la conducción de agua por gravedad.

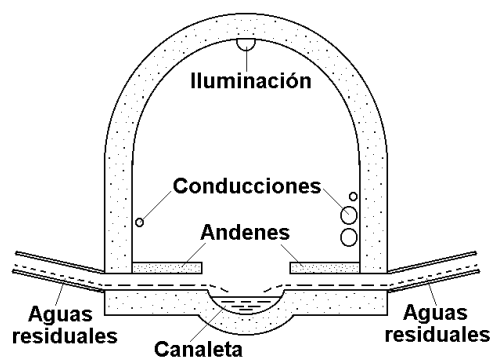


Fig. 10.5. Grandes colectores

Los túneles de carretera o autopista (figura 10.6) suelen presentar sección circular, aunque en ocasiones se prefieren secciones de otro tipo. Normalmente van revestidos y disponen de sistemas de ventilación y drenaje, de iluminación y de control y vigilancia. En ocasiones, disponen de áreas de

parada. Siempre que sea posible se prefiere el trazado en línea recta. La pendiente debe ser suficiente para permitir la evacuación de las aguas por gravedad. En cualquier caso, la pendiente máxima vendrá condicionada por las limitaciones del tipo de transporte a que se destina. Por esta razón, si la diferencia de nivel entre sus extremos es grande, puede ser conveniente elegir un trazado en curva para aumentar la distancia y reducir, por tanto, la pendiente.

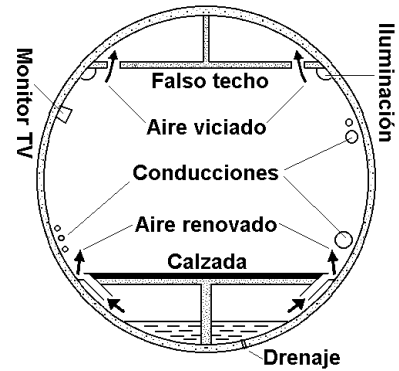


Fig. 10.6. Túnel de carretera

Los túneles para ferrocarril (figura 10.7) plantean limitaciones aun más estrictas en cuanto a la pendiente y al radio de las curvas, especialmente en líneas de ferrocarril de alta velocidad. Al igual que en los de carretera, la pendiente mínima debe ser suficiente para permitir la evacuación de las aguas por gravedad. Los túneles para ferrocarril metropolitano suelen ser poco profundos y se construyen, cuando es posible, mediante excavación en zanja y relleno. Suelen presentar sección circular, salvo en las estaciones (figura 10.8).

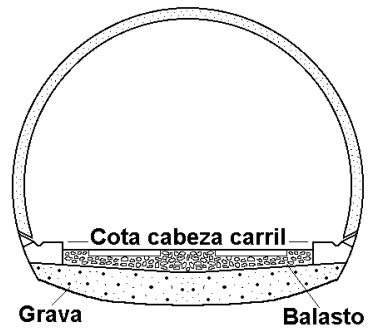


Fig. 10.7. Túnel de ferrocarril

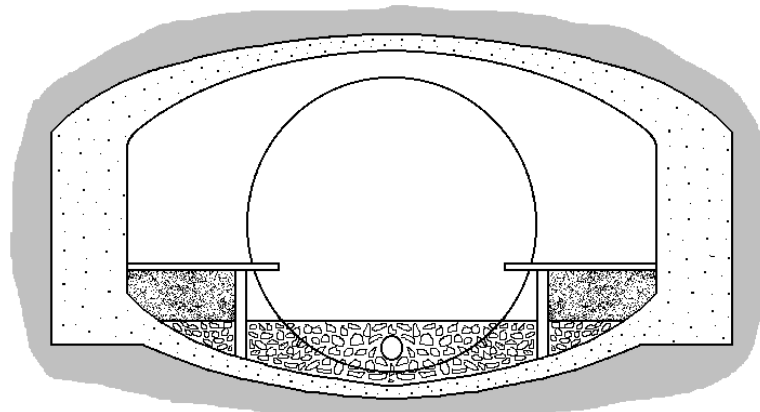


Fig. 10.8. Estación de ferrocarril metropolitano

La conducción de agua a presión desde, por ejemplo, un embalse hasta una central de producción de energía eléctrica puede hacerse mediante túneles, a veces de gran longitud y pendiente (figura 10.9). Para esta función se construyen túneles de sección

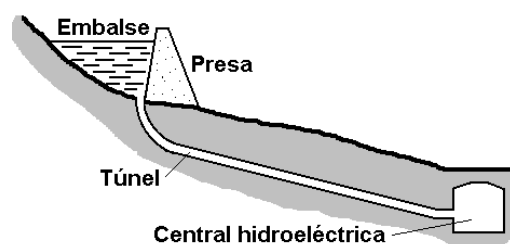


Fig. 10.9. Conducción de agua a presión

variable, que siempre van revestidos.

En este capítulo no entraremos en el diseño y la perforación de túneles, sino que nos limitaremos a exponer los aspectos topográficos de la construcción de este tipo de obras.

## 10.2.- Proyecto del túnel.

Antes de que se pueda plantear el diseño del túnel con un mínimo de detalle, será necesario recopilar o generar toda la información relevante sobre el terreno afectado por el proyecto. Al menos, esta información supone:

- Plano topográfico a escala suficientemente grande y totalmente actualizado. Si no se dispone de esta información, será necesario realizar un levantamiento topográfico de la zona.
- Estudio geológico y geotécnico: El conocimiento de los terrenos que va a atravesar el túnel es fundamental. Se realizarán los sondeos y los ensayos que sea preciso para caracterizar y plasmar en planos y secciones la estructura geológica del terreno.

El proyecto, como en cualquier obra de ingeniería, consiste en estudiar distintas alternativas y seleccionar la más adecuada, aplicando criterios técnicos, económicos, medioambientales, etc. La solución elegida debe quedar perfectamente definida, mediante:

- Los puntos de entrada y de salida y los enlaces con los tramos anterior y posterior de la obra (carretera, ferrocarril, etc.)
- El trazado en planta, con las distintas alineaciones que lo conforman. Se indicarán longitudes, radios de curvatura, etc.
- El perfil longitudinal, tanto del terreno (denominado *perfil por montera*) como de la rasante (figura 10.10). Se indicarán las pendientes, acuerdos parabólicos, cotas, etc. Se indicarán todas las obras subterráneas con las que se cruce o a las que pueda afectar el túnel proyectado.
- Secciones: se indicarán las dimensiones, elementos, revestimiento, etc. en los distintos tramos del túnel. Se indicará el procedimiento constructivo a aplicar en cada uno de ellos.

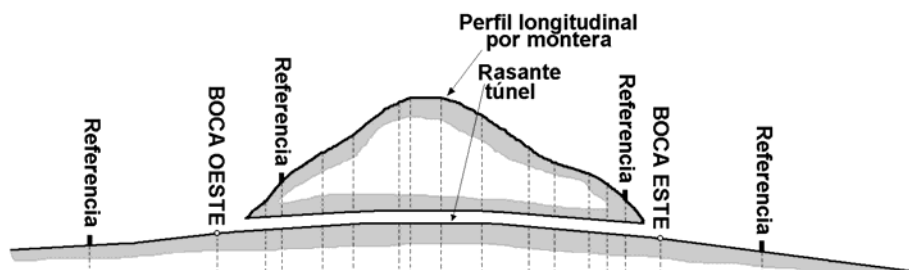


Fig. 10.10. Perfil longitudinal

La perforación del túnel puede realizarse excavando desde uno de sus extremos, únicamente, o desde los dos, simultáneamente (figura 10.11).

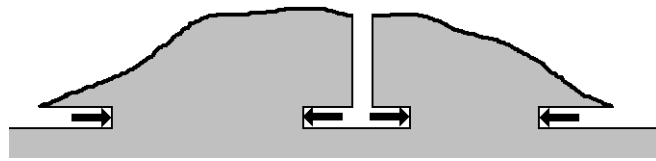


Fig. 10.11. Excavación con varios puntos de ataque

En ocasiones, con el fin de disponer de más puntos de ataque y aumentar la velocidad de excavación, se perforan pozos o rampas que terminan en puntos intermedios de la rasante. A partir de estos puntos se perfora en dirección a los extremos del túnel.

Como hemos indicado, las características de la obra dependerán de la configuración topográfica del terreno y del estudio geológico/geotécnico del mismo. El proyecto de un túnel, como cualquier proyecto de ingeniería, se plasma en una serie de documentos: Memoria, Planos, Pliego de condiciones, Presupuesto, etc.

### **10.3.- Trabajos en el exterior.**

Los trabajos topográficos en el exterior tienen por finalidad proporcionar toda la infraestructura topográfica necesaria para la elaboración del proyecto del túnel y para el replanteo de las labores de interior. Especial importancia tiene el enlace topográfico entre los distintos puntos de ataque de la obra.

#### **Plano topográfico de base.**

En muchas ocasiones no se dispone de un levantamiento topográfico previo de precisión suficiente y a una escala adecuada. En estos casos se realizará un levantamiento ex-profeso de la zona. Los vértices que se hayan marcado y medido para este levantamiento, servirán además para apoyar los trabajos topográficos de precisión necesarios para realizar el enlace entre puntos de ataque y el replanteo de la obra.

El levantamiento de exterior también puede realizarse por fotogrametría aérea. En ambos casos se trata de levantamientos convencionales, que suelen limitarse a zonas relativamente reducidas en las que puede desprejarse la curvatura terrestre y la convergencia de meridianos. Sólo en el caso de túneles extraordinariamente largos podrían estos factores afectar significativamente a la obra.

### **Enlace planimétrico entre bocas.**

La situación de los puntos de ataque de la obra debe marcarse en el terreno y medirse con la máxima precisión disponible. Además, para evitar la acumulación de errores en el replanteo, que podría impedir que las labores “calen” correctamente, conviene enlazar topográficamente los distintos puntos de ataque de la obra (figura 10.2). De esta forma podremos determinar conjuntamente todos los parámetros (coordenadas, acimutes, distancias) necesarios para replantear la excavación, eliminando las imprecisiones que se tendrían si nos limitamos a obtener estos datos del plano topográfico.

Para ello, una vez elegidos los puntos de ataque, podemos incluirlos en la red de triangulación de nuestro levantamiento topográfico y medirlos como si fueran vértices de la red, recalculándola si es preciso. Es habitual establecer una red en forma de cadena, con dos bases distintas, cada una en las proximidades de una de las bocas del túnel.

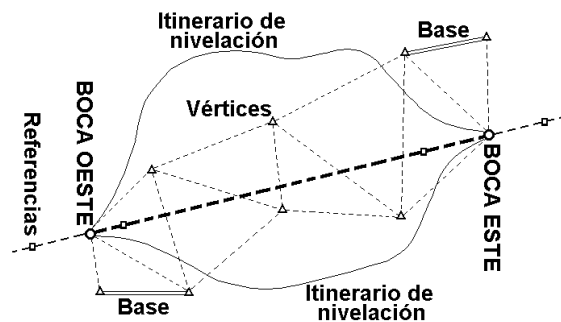


Fig. 10.12. Enlace entre bocas

La red se calcula y se compensa de la forma habitual, sirviendo la segunda base como comprobación, y se enlaza con la red geodésica.

En ocasiones se prefiere enlazar las bocas mediante un itinerario de precisión cerrado, partiendo de una de ellas. El itinerario se calcula de la forma habitual y debe enlazarse con la red geodésica. Si se dispone de equipos suficientemente precisos, el enlace también puede hacerse determinando las coordenadas de las bocas mediante GPS.

Como resultado de este trabajo, dispondremos de las coordenadas de los puntos de ataque medidas conjuntamente y relacionadas entre sí, lo que nos permitirá acometer la excavación del túnel con las debidas garantías de precisión.

### **Perfil por montera.**

El trazado del perfil longitudinal del terreno, o perfil por montera, se puede obtener del levantamiento topográfico de exterior, marcando sobre el plano el trazado previsto para el túnel. No obstante, es recomendable comprobar en exterior la dirección de la excavación, realizando (si las

condiciones del terreno lo permiten) la operación denominada *paso de línea por montera*.

Para ello, y suponiendo el caso más sencillo de un túnel de trazado recto, se establecerá un itinerario de exterior encuadrado comenzando por una de las bocas y acabando en la otra. Todas las estaciones estarán situadas en el plano vertical que contiene al eje del túnel y, por tanto, las proyecciones horizontales de todos los tramos del itinerario estarán alineadas y sus acimutes coincidirán con el de la alineación que forman las dos bocas. Una vez comprobado que los errores son inferiores a la tolerancia fijada, podemos emplear este itinerario para situar una serie de *referencias* que se emplearán posteriormente para el replanteo de la excavación. El itinerario nos permitirá también situar planimétricamente posibles puntos de ataque adicionales (pozos) que no hubieran sido enlazados previamente con las otras bocas.

Si el túnel fuese en curva, o una combinación de tramos rectos y curvos, se replantean sobre el terreno las trazas de las distintas alineaciones que lo forman y, a continuación, se realiza el itinerario de exterior siguiendo estas trazas.

### **Nivelación entre bocas.**

El enlace entre bocas también debe hacerse altimétricamente. Lo más recomendable es establecer una nivelación geométrica de precisión, a partir de un punto de la red de nivelación de alta precisión (NAP). Los itinerarios de nivelación deben ser cerrados y servirán para calcular la coordenada Z de todos los puntos de ataque de la obra, incluyendo pozos y rampas si los hubiese.

### **10.4.- Replanteo del eje del túnel.**

Una vez realizados los trabajos de enlace entre bocas y el paso por montera, y antes de comenzar la excavación, se marca, siguiendo la alineación del eje del túnel, un mínimo de tres puntos en cada uno de los extremos. Estas *referencias* se eligen de forma que no se vean afectadas por los trabajos de excavación y se señalan de forma permanente.

Estacionando un instrumento topográfico en el punto central y visando al siguiente, tendremos materializada la alineación inicial del túnel y podremos comenzar el

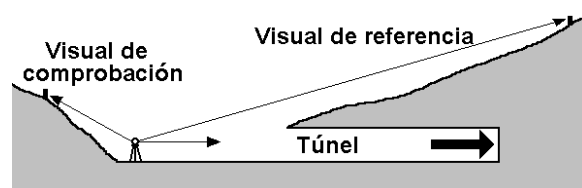


Fig. 10.13. Replanteo del eje

replanteo del mismo (figura 10.13). El tercer punto nos servirá como comprobación. A partir de ese momento, el replanteo se realiza empleando las técnicas descritas en los apartados 6.3 y 6.4.

Por razones prácticas, especialmente la visibilidad, el replanteo en altimetría suele hacerse marcando una rasante sobreelevada una magnitud constante (1 a 1,5m) respecto a la altitud del piso teórico del túnel. Esta rasante puede señalizarse mediante una cuerda horizontal tendida entre los hastiales.

Si la excavación se realiza también a partir de un pozo intermedio la operación es más complicada. Las coordenadas de la boca del pozo se habrán determinado con precisión, comprobando que se sitúa en la vertical de la rasante del túnel y enlazándola planimétrica y altimétricamente con las bocas extremas del túnel. El pozo se excava hasta la profundidad apropiada, comprobándola mediante las técnicas de medición que se explicaron en 2.3.2 y 2.3.3.

Para poder replantear la excavación que se realiza desde el fondo del pozo debemos transmitir la orientación al interior. Para ello se emplearán los métodos descritos en 5.3. La precisión que pueden proporcionar algunos de estos métodos es limitada, por lo que deben emplearse con las debidas precauciones. Las mismas consideraciones valen para el caso de que el ataque se realice a partir de rampas intermedias. Los cálculos necesarios para proyectar la labor auxiliar y realizar el replanteo se explicaron en el capítulo 6.

#### **10.5.- Medición de secciones transversales.**

A medida que la excavación progresa, es preciso comprobar la sección transversal (perpendicular al eje) de la misma y compararla con la sección teórica proyectada, de forma que se puedan corregir las desviaciones que se vayan produciendo. Estas desviaciones pueden obligarnos a picar manualmente algunas zonas y/o a aumentar el espesor del revestimiento en otras, lo que a veces resulta complicado y siempre incrementa el coste de la obra. Por tanto, conviene realizar estos controles con la debida frecuencia. La medición de secciones transversales se realizará a partir del eje del túnel, previamente replanteado y sirve también para calcular el volumen de tierras removido. Pueden emplearse los siguientes métodos:

##### **Por abscisas y ordenadas.**

Se empieza por marcar dos ejes en la sección que se pretende medir: el eje Y se marca con una plomada, colgada del techo, que pasará por el eje del



túnel; el eje X se marca mediante una cuerda tendida entre los hastiales y corresponde a una rasante sobreelevada (figura 10.14).

Mediante una cinta métrica medimos las coordenadas X de los puntos del perfil. La coordenada Y puede medirse con ayuda de una mira. El método es lento y sólo válido para túneles de pequeña sección.

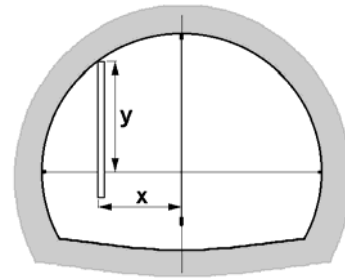


Fig. 10.14. Secciones: abscisas y ordenadas

**Por radiación con un instrumento topográfico.**

Se estaciona un taquímetro o estación total sobre un punto conocido, normalmente el correspondiente al eje del túnel, determinando la altura del aparato (figura 10.15). Si visamos en la dirección del eje y giramos  $100^g$  la alidada horizontal, el giro del anteojo nos materializa el plano vertical correspondiente a la sección. Visamos los puntos del perfil que interese y medimos la distancia reducida y la tangente topográfica a cada uno de ellos. A partir de esos datos, se pueden calcular las coordenadas de los puntos visados y trazar la sección correspondiente.

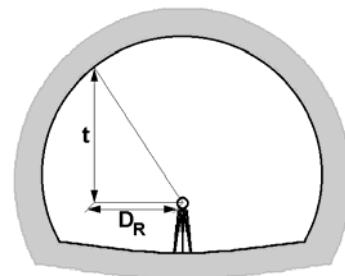


Fig. 10.15. Secciones: radiación

La operación se facilita enormemente usando estaciones totales láser “sin prisma”.

**Con medida de ángulos.**

Se estaciona un instrumento topográfico fuera del perfil a medir. Se sitúan dos puntos A y B pertenecientes al perfil, cuyas coordenadas se miden desde el punto de estación (figura 10.16). También se debe materializar el perfil, por ejemplo mediante un haz láser.

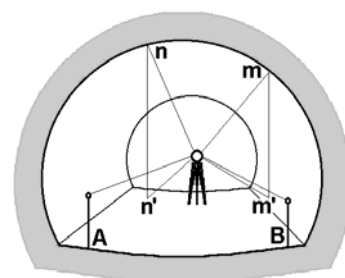


Fig. 10.16. Secciones: medida de ángulos

Para medir puntos del perfil (m, n, ...) basta visarlos y anotar los ángulos vertical y horizontal. Las coordenadas se calculan resolviendo los triángulos verticales y horizontales formados.

### **Por intersección.**

Se estacionan dos instrumentos topográficos en puntos del perfil a medir, uno de ellos en un punto de coordenadas conocidas. Se mide la distancia natural entre los puntos principales de ambos aparatos y la lectura vertical obtenida con cada uno al visar al punto principal del otro.

Visando un punto del perfil con ambos instrumentos y anotando los correspondientes ángulos verticales, tendremos datos suficientes para resolver el triángulo vertical formado y calcular las coordenadas del punto visado (figura 10.17).

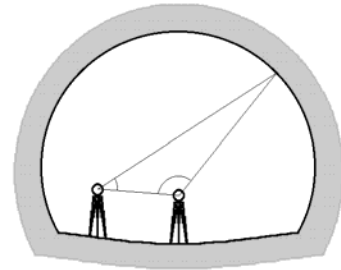


Fig. 10.17. Secciones: intersección

### **Con pantómetra de túneles.**

Se trata de un instrumento diseñado para medir secciones, que consiste en un círculo graduado de cuyo centro sale un vástago extensible graduado para medir distancias. Se estaciona en un punto conocido y permite medir ángulos verticales y distancias naturales a puntos situados en el perfil (figura 10.18).

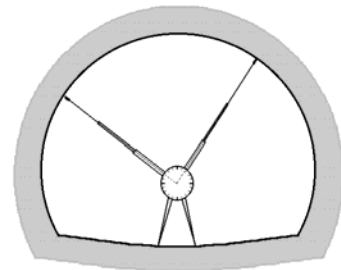


Fig. 10.18. Secciones: pantómetra de túneles

### **Con pantógrafos.**

Son instrumentos capaces de dibujar, en una mesa vertical, una figura homotética de la que recorre el extremo del sistema de barras articuladas de que van provistos (figura 10.19). Pueden emplearse para túneles de pequeña sección.

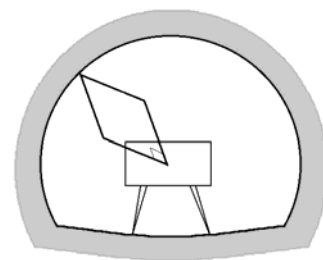


Fig. 10.19. Secciones: pantógrafo

### **Con perfilógrafos y perfilómetros.**

Se trata de aparatos diseñados para trazar perfiles.

El perfilógrafo Lechartier va montado sobre una plataforma que puede moverse sobre raíles (figura 10.20). Sobre la plataforma lleva una mesa trazadora y dos focos luminosos. En la mesa disponen de dos regletas que se sitúan paralelas a

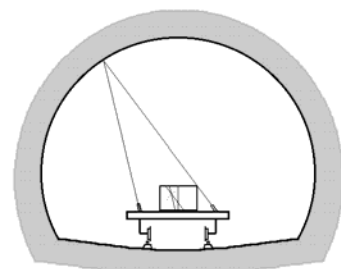


Fig. 10.20. Secciones: perfilógrafo Lechartier

los focos. Todos estos elementos se sitúan en el plano del perfil a medir. Si la intersección de los rayos luminosos se hace coincidir con un punto del perfil, la intersección de las regletas nos marcará en la mesa un punto homólogo de aquel.

El perfilógrafo Castan (figura 10.21) dispone de brazos extensibles cuyos extremos terminan en unos rodillos que se apoyan en los puntos del perfil a medir. Los movimientos se transmiten a una mesa trazadora a medida que el aparato se va desplazando por la galería.

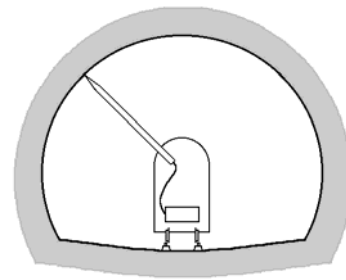


Fig. 10.21. Secciones: perfilógrafo Castan

El perfilómetro Prota (figura 10.22) dispone de un brazo extensible, que se sitúa paralelo al eje de la galería. En uno de los extremos del brazo, y perpendicular a él, se sitúa un anteojo. En el otro extremo se sitúa un espejo cuya misión es reflejar un haz láser emitido paralelamente al brazo. Si extendemos el brazo, hasta que el haz láser reflejado coincida con el punto del perfil visado por el anteojo, podremos calcular la distancia entre el centro del anteojo y el punto visado, ya que el ángulo de reflexión es fijo (y conocido) y el brazo está graduado para medir distancias. El equipo dispone de un sistema para medir ángulos centesales.

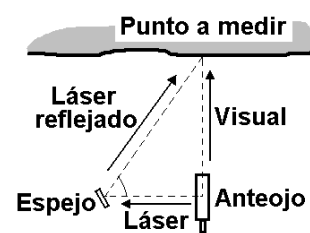


Fig. 10.22. Secciones: perfilómetro Prota

### **Por fotogrametría terrestre.**

El trazado completo puede obtenerse a partir de fotos del perfil, materializado por un proyector láser que se estaciona en un punto del mismo.

En algunos casos se emplea una sola fotografía, tomada en la dirección del eje y con la cámara situada, aproximadamente, en el punto central del túnel para que la perspectiva cónica fotográfica se aproxime a una proyección ortogonal. Para dar escala a la imagen se sitúa, en el plano del perfil, un triángulo equilátero de 1m de lado.

Otras veces se toman y se restituyen pares fotogramétricos, situando previamente, en el plano del perfil, un mínimo de cuatro puntos conocidos y bien distribuidos. Estos puntos deben aparecer bien definidos en los fotogramas y pueden materializarse mediante miras, placas reflectantes, etc.